УДК 62-714 : 621.184.54

А.А. ШЕВЕЛЕВ, канд. техн. наук, А.Н. ТАРАСЕНКО, аспирант

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

ЭФФЕКТИВНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

На основі модифікації неявного чисельного методу, «що біжить», розроблен удосконалений метод визначення показників нестаціонарних процесів трубчатих теплообмінних апаратів з перехресним рухом теплоносіїв. У статті наводяться результати досліджень динамічних характеристик трубчастого повітропідігрівника промислового парогенератора. Результати показали, що в перехідних процесах повітропідігрівника відсутнє транспортне запізнення і криві розгону визначаються тільки теплообміном і теплоємністю труб апарату і теплоносіїв.

In the basis of modification of non-obvious method of hurrying account the method of calculation of unstationary processes of tubular heat-exchange vehicles is developed with cross motion of heat-carrying agent. The results of researches of dynamic descriptions of tubular air heater industrial boiler, got on the developed method, are presented in the article. Results showed that in the transitional processes of air heater and the transporting delay and curves of acceleration is absent is determined only heat-exchange and heat capacity of pipes of vehicle and heat-carrying agent.

Состояние вопроса. Переходные тепловые процессы являются составной частью многих технологических процессов. Поэтому совершенствование методик определения рабочих характеристик динамики теплообменных аппаратов (ТА) относится к актуальному научно-техническому направлению в развитии автоматического управления тепловыми системами многих производств [1–3].

Применение ЭВМ в расчетной практике явилось сильным толчком для внедрения математических методов определения динамических характеристик ТА. Из этих методов наиболее эффективными оказались численные методы [4, 5].

В настоящей работе представлен метод численного анализа динамики трубчатого ТА с перекрестным движением теплоносителей и произвольным законом изменения температуры теплоносителей при входе в аппарат.

Метод разработан на основе модификации метода «бегущего счета» [6] для численного решения связанных дифференциальных уравнений математической модели (ММ) динамики трубчатого ТА.

Впервые численный алгоритм бегущего счета был использован в работе [7] для пластинчатых ТА с перекрестным движением теплоносителей.

Применение метода бегущего счета к трубчатым ТА потребовал дополнительных теоретических разработок в связи с прерывистой поверхностью теплообмена.

Математическая модель динамики трубчатого ТА. Дифференциальное уравнение переходного процесса:
для греющего теплоносителя

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} + A_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} + B_1 (t_1 - t) = 0\,, \qquad (1)$$

тоже для нагреваемого теплоносителя

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} + A_2 \frac{\partial t_2}{\partial y_2} + B_2 (t_2 - t) = 0\,, \tag{2}$$

для стенки произвольного ряда труб

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + C_1^* (t - t_1) + C_2^* (t - t_2) = 0\,, \tag{3}$$

где коэффициенты уравнений (1) – (3) определяются соотношениями:

$$A_1 = U_1\,, \tag{4}$$

$$A_2 = \frac{4 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot \left(1 - \dfrac{d_2}{S_1}\right) \cdot U_2}{4 \cdot S_1 \cdot S_2 - \pi \cdot d_2^2}\,, \tag{5}$$

$$B_1 = \frac{4 \cdot \alpha_1}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot d_1}\,, \tag{6}$$

$$B_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot \alpha_2}{(4 \cdot S_1 \cdot S_2 - \pi \cdot d_2^2) \cdot c_2 \cdot \rho_2}\,, \tag{7}$$

$$C_1^* = \frac{\alpha_1 \cdot d_1}{d \cdot \delta \cdot c \cdot \rho}\,, \tag{8}$$

$$C_2^* = \frac{\alpha_2 \cdot d_2}{d \cdot \delta \cdot c \cdot \rho}\,. \tag{9}$$

Таким образом, дифференциальные уравнения (1) – (3) представляют собой математическую модель динамики трубчатого теплообменника с перекрестным движением теплоносителей независимо от того, какой является греющим или нагреваемым.

Для решения системы дифференциальных уравнений (1) – (3) сформулируем начальные условия: $\tau = 0$, $0 \le x \le l_1$, $0 \le y \le l_2$:

$$t_1(x, y, 0) = f_1(x, y), \tag{10}$$

$$t_2(x, y, 0) = f_2(x, y), \tag{11}$$

$$t(x, y, 0) = f(x, y), \tag{12}$$

где $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$, $f(x, y)$ – известные функции распределения температуры соответственно первого и второго теплоносителей и стенки в начальный момент времени.

Граничные условия можно записать следующим образом:

для первого теплоносителя $\tau > 0$, $x = 0$, $0 \le y \le l_2$

$$t_1(0, y, \tau) = \varphi_1(y, \tau), \tag{13}$$

для второго теплоносителя $\tau > 0$, $y = 0$, $0 \le x \le l_1$

$$t_2(\mathrm{x}, 0, \tau) = \varphi_2(x, \tau), \tag{14}$$

где $\varphi_1(y, \tau)$, $\varphi_2(x, \tau)$ – заданные функции, например, при скачкообразном изменении температуры первого теплоносителя до значения $T_{\max}$ условие (14) будет записано

$$t_1(0, y, \tau) = T_{\max}; \tag{15}$$

при экспоненциальном соответственно

$$t_1(0,\, y,\, \tau) = \left(T_{\max} - T_{\text{н}}\right)\left[1 - \exp\left(-m_1 \tau\right)\right] + T_{\text{н}}\,. \tag{16}$$

В силу допущений об отсутствии теплоотвода на торцах граничные условия для стенки не формулируются.

Алгоритм численного решения уравнений ММ методом бегущего счета. Для перекрестного движения теплоносителей (рис. 1) математическая модель динамического процесса теплообменника представляет собой сопряженную систему уравнений. Это выражается в том, что система уравнений (1) – (3) состоит из дифференциальных уравнений в частных производных, которые связаны между собой, т.е. искомая температура одного компонента теплообменника зависит от температуры двух других, которые тоже являются неизвестными.

Поэтому получить аналитическое решение не представляется возможным, если не ввести ряд упрощений, которые в этом случае могут существенно ограничить область исследования. В настоящей работе предлагается численный метод, который базируется на неявных схемах бегущего счета [6], модифицированных с учетом сопряженности дифференциальных уравнений ММ и переменных во времени граничных условий (13) – (16).

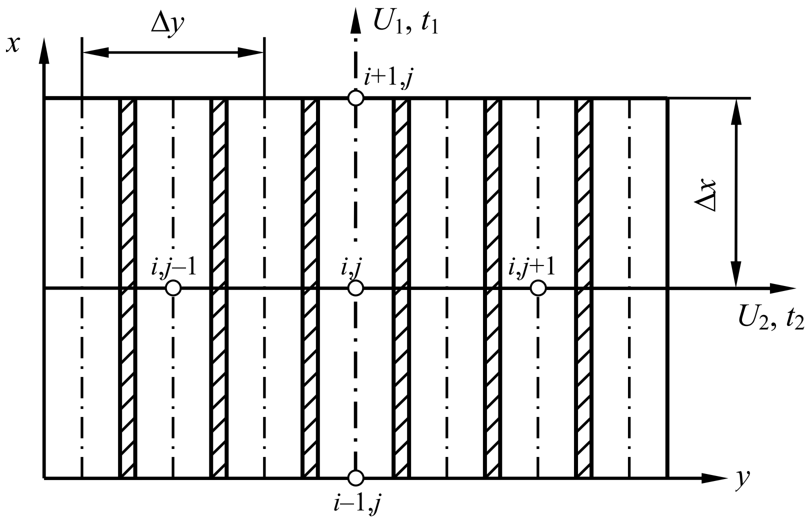

Рис. 1. К разработке численного алгоритма

Разностные уравнения бегущего счета для уравнений ММ могут быть записаны:
для первого теплоносителя

$$\frac{t_{1,i,j}^{k+1}-t_{1,i,j}^{k}}{\Delta\tau}+A_1\frac{t_{1,i,j}^{k+1}-t_{1,i-1,j}^{k+1}}{\Delta x}+B_1\left(t_{1,i,j}^{k+1}-t_{i,j}^{k}\right)=0, \qquad (17)$$

$$0<i\le N_1,\quad 0<j\le N_2;$$

для второго теплоносителя

$$\frac{t_{2,i,j}^{k+1}-t_{2,i,j}^{k}}{\Delta\tau}+A_2\frac{t_{2,i,j}^{k+1}-t_{2,i,j-1}^{k+1}}{\Delta y}+B_2\left(t_{2,i,j}^{k+1}-t_{i,j}^{k+1}\right)=0, \qquad (18)$$

$$0<j\le N_2,\quad 0<i\le N_1;$$

тоже для разделительной стенки

$$\frac{t_{i,j}^{k+1}-t_{i,j}^{k}}{\Delta\tau}+C_1^{*}\left(t_{i,j}^{k+1}-t_{1,i,j}^{k+1}\right)+C_2^{*}\left(t_{i,j}^{k+1}-t_{2,i,j}^{k}\right)=0, \qquad (19)$$

$$0<i<N_1,\quad 0<j<N_2;$$

Из систем уравнений (17) – (19) получим алгоритм бегущего счета переходного процесса трубчатого ТА:

для первого теплоносителя

$$t_{1,i,j}^{k+1} = \left(t_{1,i,j}^{k} + A_1 \frac{\Delta\tau}{\Delta x} t_{1,i-1,j}^{k+1} + B_1 \Delta\tau t_{i,j}^{k} \right) \cdot \left(1 + A_1 \frac{\Delta\tau}{\Delta x} + B_1 \Delta\tau \right)^{-1}, \quad 0 < i \le N_1, \quad j = 1, 2, \ldots, N_2; \tag{20}$$

для второго теплоносителя

$$t_{2,i,j}^{k+1} = \left(t_{2,i,j}^{k} + A_2 \frac{\Delta\tau}{\Delta y} t_{2,i,j-1}^{k+1} + B_2 \Delta\tau t_{i,j}^{k+1} \right) \cdot \left(1 + A_2 \frac{\Delta\tau}{\Delta y} + B_2 \Delta\tau \right)^{-1}, \quad 0 < i \le N_2, \quad j = 1, 2, \ldots, N_1; \tag{21}$$

для стенки труб

$$t_{i,j}^{k+1} = \left(t_{i,j}^{k} + C_1^* \Delta\tau t_{1,i,j}^{k+1} + C_2^* \Delta\tau t_{2,i,j}^{k} \right) \cdot \left(1 + C_1^* \Delta\tau + C_2^* \Delta\tau \right)^{-1}, \quad 0 < i \le N_1, \quad j = 1, 2, \ldots, N_2. \tag{22}$$

Последовательное решение системы алгебраических выражений (20) – (22) позволяет определить значение температуры теплоносителей и трубы во всех узлах i, j через интервал времени $\Delta\tau$.

Результаты численного эксперимента. Разработанный метод был применен для определения динамических характеристик воздухоподогревателя (ВП) промышленного парогенератора на низкие параметры пара (котел Е-25-14ГМ). Воздухоподогреватель выполнен одноходовым со стороны воздуха. В реальных условиях температура продуктов сгорания при входе в ВП изменяется сравнительно гладко, не превышая 500 °С. Это позволило рассматривать переходные режимы ВП при экспоненциальном законе изменения температуры газов. Температура воздуха на входе принималась постоянной, равной 30 °С.

Проведенные численные расчеты позволили определить все характеристики переходных процессов ВП при импульсном и экспоненциальном законе изменения температуры газов.

На рис. 2 представлены кривые разгона ВП для экспоненциального закона при темпе увеличения температуры газов $m_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$.

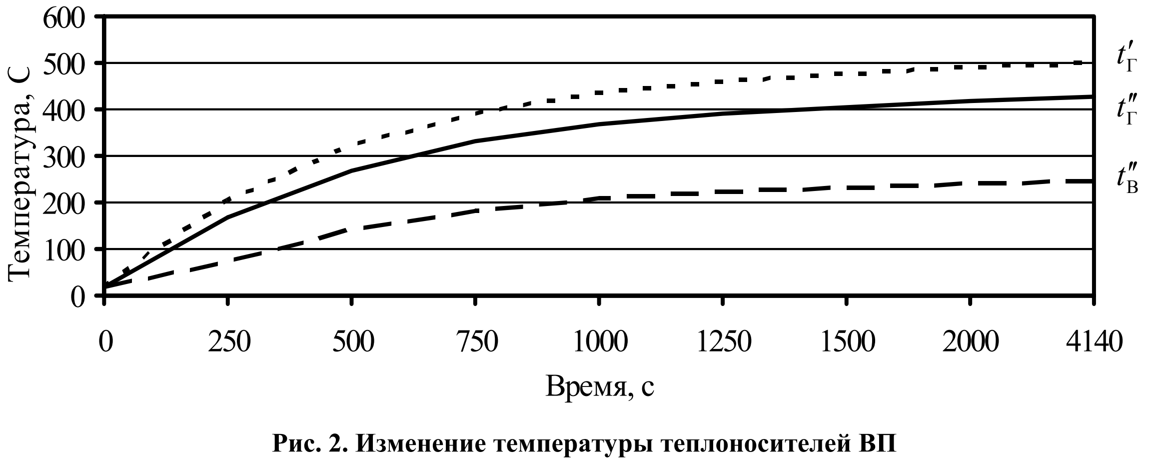

Рис. 2. Изменение температуры теплоносителей ВП

Анализ кривых разгона позволил сделать вывод, что в переходных процессах ВП отсутствует транспортное запаздывание и температура отклика $t''_{\text{в}}$ определяется исключительно теплообменом и теплоемкостью труб и теплоносителей.

Влияние темпа нагрева m_1 на время переходного процесса приведено на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что параметр сходимости ε сильно влияет на время переходного процесса при малых значениях параметра m_1. При импульсном изменении температуры t'_{Γ} $(m_1 \to \infty)$ время переходного процесса будет мало зависеть от параметра ε.

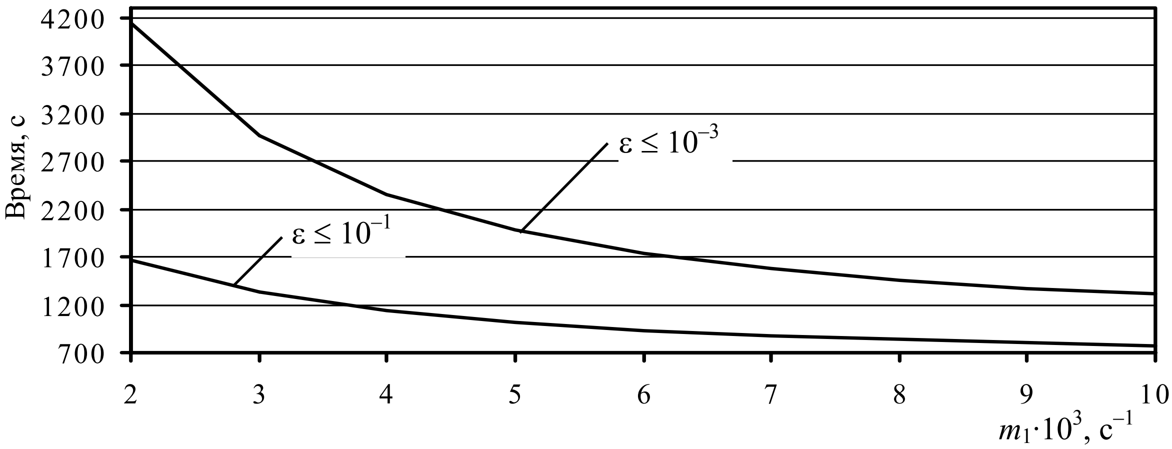

Рис. 3. Влияние параметра m_1 на время переходного процесса ($\varepsilon = \mathrm{abs}\left|t_{\text{В}}^{k+1} - t_{\text{В}}^{k}\right|$)

Численные исследования подтвердили устойчивость метода при любых отношениях шагов интегрирования, а также незначительное влияние Δx и Δy на точность показателей переходных процессов трубчатых ТА с перекрестной схемой теплоносителей.

Литература

1. *Кафаров. В.В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1976. – 464 с.

2. *Архипов Г.А.* Автоматическое регулирование поверхностных теплообменников. – М.: Энергия, 1971. – 304 с.

3. *Шевяков А.А.* Инженерные методы расчета динамики теплообменных аппаратов. – М: Машиностроение, 1968. – 319 с.

4. *Федоров В.И.* Метод элементарных балансов для расчета нестационарных процессов поверхностных теплообменных аппаратов / В.И. Федоров, З.А. Марценюк. – К.: Наукова думка, 1977. – 140 с.

5. *Роми Ф.Е.* Переходная характеристика теплообменника // Теплопередача. – 1984. – № 3. – С. 119-126.

6. *Шокин Ю.И.* Метод дифференциального приближения / Ю.И. Шокин, Н.Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1985. – 372 с.

7. *Абдулин С.Ю.* Динамика пластинчатого теплообменного аппарата с перекрестным током теплоносителей / С.Ю. Абдулин, А.Ю Абдулин, А.А. Шевелев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. – № 11. – С. 3-10.