Управляемые системы, ИМ,ИК СО АН СССР 1971 г. выпуск 8.

УДК.66.015.2.

РАСЧЕТ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБЧАТОГО РЕАКТОРА ПРИ МАЛОМ ВНУТРЕННЕМ ДИАМЕТРЕ ТРУБКИ

Ю.Ш.Матрос, В.Б.Накрохин, В.С.Бесков

Целью настоящей работы является разработка методики расчета частотных характеристик трубчатых контактных аппаратов в случае, когда переходные режимы в них можно описывать моделью идеального вытеснения. Разработанная методика иллюстрируется на примере процесса окисления метанола в формальдегид на окисном катализаторе в опытном реакторе с внутренним диаметром трубки 14 мм.

1. Методика расчета частотных характеристик

Если температуру хладоагента в межтрубном пространстве реактора можно принять одинаковой для всего объема и если перенос тепла стенкой трубки вдоль ее оси незначителен, то математическое описание нестационарных процессов в слое катализатора в виде модели идеального вытеснения записывается так:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial\theta}{\partial\xi}+A_1\frac{\partial\theta}{\partial t'}=-A_2(\theta-\theta_{cm})+\sum_{i=1}^{n}\Delta\theta_{ag_i}K_i f_i(\theta,C_1,C_2,\ldots,C_m)\\ &\frac{\partial\theta_{cm}}{\partial t'}=A_3(\theta-\theta_{cm})-A_4(\theta_{cm}-\theta_x);\\ &\frac{\partial C_i}{\partial\xi}+\varepsilon\frac{\partial C_i}{\partial t'}=-K_i f_i(\theta,C_1,C_2,\ldots,C_m);\end{aligned}\right\} \quad /1/$$

$$i=1,2,\ldots,m;\; n\le m$$

$$\theta=\frac{T-T_0}{RT_0^2/E_1};\quad \theta_{cm}=\frac{T_{cm}-T_0}{RT_0^2/E_1};\quad \theta_x=\frac{T_x-T_0}{RT_0^2/E_1};$$

$$A_1=\frac{C_\kappa+\varepsilon C_p}{C_p};\quad A_2=\frac{4\alpha_1\tau_\kappa}{C_p d};\quad A_3=\frac{4\alpha_1 d\cdot\tau_\kappa}{(D^2-d^2)C_{cm}};$$

$$A_4=\frac{4D\alpha_1}{(D^2-d^2)C_{cm}}\cdot\tau_\kappa;\quad \xi=\frac{\tau}{\tau_\kappa};\quad t'=\frac{t}{\tau_\kappa};$$

$$\Delta\theta_{ag_i}=\frac{\Delta T_{ag_i}}{RT_0^2/E_1};\quad \Delta T_{ag_i}=\frac{q_i}{C_p};\quad K_i=k_i(T_0)e^{\frac{\theta\eta_i}{1+b\theta}};$$

$$\eta_i=\frac{E_i}{E_1};\quad k_i(T_0)=k_{i0}e^{-\frac{E_i}{RT_0}}\tau_\kappa,$$

где

$T, T_{вх}, T_{cm}, T_x$ - температуры в зоне реакции, на входе в реактор, стенки трубки и хладоагента в межтрубном пространстве, соответственно, ^oK ; R - универсальная газовая постоянная, R =1,987$\frac{кал}{моль, град}$;

E_i - энергия активации константы скорости i -й реакции;
K_{i0} - предэкспоненты константы скорости i -й реакции;
t - время, τ_1, $\tau_к$ - текущее и общее условное время контакта;
$C_{cm}, C_к, C_p$ - теплоемкость металлической стенки трубки, катализатора и реакционной среды, соответственно;
α_1, α_2 - коэффициенты теплоотдачи реакционной среды к стенке трубки и хладоагента к стенке, соответственно;
d, D - внутренний и наружный диаметры трубки, соответственно;
q_i - тепловой эффект i -й реакции;
f_i - кинетическая функция i -й реакции, скорость которой зависит от температуры и состава реакционной смеси, состоящей из m компонентов;
$C_1, C_2, \ldots, C_m$ - концентрации соответствующих компонентов; n -число реакций, T_0 - температура начало отсчета;
ε - пористость слоя.

Недостающие $m-n$ уравнений, необходимые для решения системы /I/, определяются для данной модели из балансных соотношений. Начальные условия для системы /I/ определяются из решения соответствующей стационарной задачи, получающейся из /I/ приравниванием производных по времени нулю, /при этом предполагается, что решение стационарной задачи существует/:

$$\theta(0,\xi)=\theta(\xi);\ C_i(0,\xi)=C_i(\xi) \qquad /2/$$

при $\xi=0$ имеем:

$$\theta(t',0)=\theta_{вх}(t');\ C_i(t',0)=C_{i,вх}(t') \qquad /3/$$

После линеаризации системы /I/ в окрестности стационарного режима /2/ можно записать:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial\Delta\theta}{\partial\xi}+A_1\frac{\partial\Delta\theta}{\partial t'}=A_2\Delta\theta_{cm}+B_0\Delta\theta+\sum_{j=1}^{m}B_{0j}\Delta C_j;\\
&\frac{\partial\Delta C_{cm}}{\partial t'}=-(A_3+A_4)\Delta\theta_{cm}+A_3\cdot\Delta\theta+A_4\Delta\theta_x;\\
&\frac{\partial\Delta C_i}{\partial\Delta\xi}+\varepsilon\frac{\partial\Delta C_i}{\partial t'}=-B_i\Delta\theta-\sum_{j=1}^{m}B_{ij}\Delta C_j;
\end{aligned}\right\} \qquad /4/$$

$$B_0=-A_2+\frac{\partial}{\partial\theta}\left[\sum_{i=1}^{n}\Delta\theta_{aq_i}K_i f_i\right]\Bigg|_{\substack{\theta=\theta^*\\ C=C^*}};$$

$$B_{o,j}=\frac{\partial}{\partial C_j}\left[\sum_{i=1}^{n}\Delta\theta_{aq_i}K_i f_i\right]\Bigg|_{\substack{\theta=\theta^*\\ C=C^*}};$$

$$B_{i,j}=\frac{\partial}{\partial C_j}\left[K_i f_i\right]\Bigg|_{\substack{\theta=\theta^*\\ C=C^*}};\ B_i=\frac{\partial}{\partial\theta}\left[K_i f_i\right]\Bigg|_{\substack{\theta=\theta^*\\ C=C^*}};$$

$$\Delta\theta=\theta(t',\xi)-\theta(\xi);\ \Delta C_i=C_i(t',\xi)-C_i(\xi);$$

$$\Delta\theta_{cm}=\theta_{cm}(t'_1,\xi)-\theta_{cm}(\xi);\ \Delta\theta_x=\theta_x(t')-\theta_x(0),$$

причем $\theta^*(\xi)$ определяет стационарное распределение температур по длине стенки трубки, а $\theta_x(0)$ - температуру хладоагента при $t'\leq 0$. Условия /2/ и /3/ преобразуются к виду:

$$\Delta\theta(0,\xi)=0;\quad \Delta C_i(0,\xi)=0, \qquad /5/$$

$$\Delta\theta(t',0)=\Delta\theta_{\textit{в}x};\quad \Delta C_i(t',0)=\Delta C_{i,\textit{в}x}. \qquad /6/$$

В дальнейшем условимся входными параметрами в реактор называть температуру на входе $\theta_{\textit{в}x}$, концентрации компонентов - $C_i(t',0)$ и температуру хладоагента - θ_x /возмущение в виде изменения линейной скорости, т.е. τ_k, реакционной смеси здесь не рассматриваются/, выходными - $\theta(t',\xi)$, $C_j(t',\xi)$.

Преобразуем систему /4/ с учетом начальных условий /5/ по Лапласу:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d\Delta\bar{\theta}}{d\xi}=A_2\Delta\bar{\theta}_{cm}+(B_0-A_1S)\Delta\bar{\theta}+\sum_{j=1}^{m}B_{0,j}\,\Delta\bar{C}_j;\\ &0=-(A_3+A_4-S)\Delta\bar{\theta}_{cm}+A_3\Delta\bar{\theta}+A_4\,\Delta\bar{\theta}_x;\\ &\frac{d\Delta\bar{C}_i}{d\Delta\xi}=-B_i\,\Delta\bar{\theta}-\varepsilon S\Delta\bar{C}_i-\sum_{j=1}^{m}B_{i,j}\,\Delta\bar{C}_j, \end{aligned}\right\} \qquad /7/$$

где $\Delta\bar{\theta}$ соответствует изображению функции $\Delta\theta$, $\Delta\bar{\theta}_{cm}-\Delta\theta_{cm}$ и т.д., S - переменная Лапласа.

Начальными условиями для решения системы /7/ являются:

$$\overline{\Delta\theta(t',0)}=\Delta\bar{\theta}_{\textit{в}x};\quad \overline{\Delta C_i(t',0)}=\Delta\bar{C}_{i,\textit{в}x}. \qquad /8/$$

Пусть необходимо определить частотные характеристики системы по температуре на входе в реактор. Для этого разделим все члены системы /7/ и условий /8/ на $\Delta\bar{\theta}_{\textit{в}x}$:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dW_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}}{d\xi}=A_2W_{\frac{\Delta\theta_{cm}}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}+(B_0-A_1S)W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}+\sum_{j=1}^{m}B_{0,j}W_{\frac{\Delta C_j}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}};\\ &\theta=-(A_3+A_4-S)W_{\frac{\Delta\theta_{cm}}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}+A_3W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}};\\ &\frac{dW_{\frac{\Delta C_i}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}}{d\xi}=-B_iW_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}-\varepsilon SW_{\frac{\Delta C_i}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}-\sum_{j=1}^{m}B_{i,j}W_{\frac{\Delta C_j}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}; \end{aligned}\right\} \qquad /9/$$

$$W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}(0)=1;\qquad W_{\frac{\Delta C_i}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}(0)=0, \qquad /10/$$

где $W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}=\frac{\Delta\bar{\theta}}{\Delta\bar{\theta}_{\textit{в}x}}$; $W_{\frac{\Delta\theta_{cm}}{\Delta\theta_{\textit{в}x}}}=\frac{\Delta\bar{\theta}_{cm}}{\Delta\bar{\theta}_{\textit{в}x}}$ и т.д. - передаточные функции по каналам $\Delta\theta-\Delta\theta_{\textit{в}x}$, $\Delta\theta_{cm}-\Delta\theta_{\textit{в}x}$ и т.д.

На основании свойства коммутативности преобразования Лапласа относительно символических операций Re и Jm любая передаточная функция может быть представлена в виде:

$$W(S,\xi)=Re[W(\omega,\xi)]+iJm[W(\omega,\xi)], \qquad /11/$$

где $Re[W(\omega,\xi)]$ - вещественная, а $Jm[W(\omega,\xi)]$ - мнимая частотные характеристики, ω - частота.

Для расчета исходной частотной характеристики в /9/ положим $S = i\omega$, отделим действительные части от мнимой, используя соотношение /II/:

$$
\left.
\begin{aligned}
&\frac{d\,Re[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}]}{d\xi} = A_2 Re[W_{\frac{\Delta\theta_{cm}}{\Delta\theta_{\delta x}}}] + B_0 Re[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}] + \\
&\qquad + A_1\omega\, Jm[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}] + \sum_{j=1}^{m} B_{o,j}\, Re[W_{\frac{\Delta c_j}{\Delta\theta_{\delta x}}}];\\
&\frac{d\,Jm[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}]}{d\xi} = A_2 Jm[W_{\frac{\Delta\theta_{cm}}{\Delta\theta_{\delta x}}}] - A_1\omega\, Re[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}] + \\
&\qquad + B_0 Jm[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}] + \sum_{j=1}^{m} B_{o,j}\, Jm[W_{\frac{\Delta c_j}{\Delta\theta_{\delta x}}}];\\
&0 = -(A_3 + A_4) Re[W_{\frac{\Delta\theta_{cm}}{\Delta\theta_{\delta x}}}] + \omega\, Jm[W_{\frac{\Delta\theta_{cm}}{\Delta\theta_{\delta x}}}] + A_3 Re[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}]\\
&0 = -(A_3 + A_4) Jm[W_{\frac{\Delta\theta_{cm}}{\Delta\theta_{\delta x}}}] + \omega\, Re[W_{\frac{\Delta\theta_{cm}}{\Delta\theta_{\delta x}}}] + A_3 Jm[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}]\\
&\frac{d\,Re[W_{\frac{\Delta c_i}{\Delta\theta_{\delta x}}}]}{d\xi} = -B_i Re[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}] + \varepsilon\omega\, Jm[W_{\frac{\Delta c_i}{\Delta\theta_{\delta x}}}] - \\
&\qquad - \sum_{j=1}^{m} B_{i,j}\, Re[W_{\frac{\Delta c_j}{\Delta\theta_{\delta x}}}];\\
&\frac{d\,Jm[W_{\frac{\Delta c_i}{\Delta\theta_{\delta x}}}]}{d\xi} = -B_i Jm[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}] - \varepsilon\omega\, Re[W_{\frac{\Delta c_i}{\Delta\theta_{\delta x}}}] - \\
&\qquad - \sum_{j=1}^{m} B_{i,j}\, Jm[W_{\frac{\Delta c_j}{\Delta\theta_{\delta x}}}];
\end{aligned}
\right\} /12/
$$

Начальные условия:

$$
\left.
\begin{aligned}
&Re[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}(0)] = 1; \quad Jm[W_{\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_{\delta x}}}(0)] = 0;\\
&Re[W_{\frac{\Delta c_i}{\Delta\theta_{\delta x}}}] = 0; \quad Jm[W_{\frac{\Delta c_i}{\Delta\theta_{\delta x}}}(0)] = 0.
\end{aligned}
\right\} /13/
$$

Таким образом, получена система из $2(m+2)$ линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, которая решается на цифровой вычислительной машине известными методами /например, Рунге--Кутта/.

2. Частотные характеристики процесса окисления метанола

В работе /I/ приведено математическое описание нестационарного процесса в трубчатом реакторе для окисления метилового спирта на окисных катализаторах:

$$
\left.\begin{aligned}
&\frac{\partial\theta}{\partial\xi}+A_1\frac{\partial\theta}{\partial t'}=-A_2(\theta-\theta_{cm})+\Delta\theta_{aq_1}\cdot K_1'C_0(1-x)+\\
&\qquad\qquad+\Delta\theta_{aq_2}\cdot K_2'C_0\frac{y}{1+aC_0x}\ ;\\
&\frac{\partial\theta_{cm}}{\partial t'}=A_3(\theta-\theta_{cm})-A_4(\theta_{cm}-\theta_x)\ ;\\
&\frac{\partial x}{\partial\xi}+\varepsilon\frac{\partial x}{\partial t'}=K_1'(1-x);\\
&\frac{\partial y}{\partial\xi}+\varepsilon\frac{\partial y}{\partial t'}=K_1'(1-x)-K_2'\frac{y}{1+aC_0x}\ ;
\end{aligned}\right\}\qquad /14/
$$

$$\theta=\frac{T-T_0}{RT_0^2/E_1}\ ;\quad \theta_{cm}=\frac{T_{cm}-T_0}{RT_0^2/E_1}\ ;\quad \theta_x=\frac{T_x-T_0}{RT_0^2/E_1}\ ;$$

$$A_1=\frac{c_\kappa+\varepsilon c_p}{c_p}\ ;\quad A_2=\frac{4\alpha_1}{c_p d}\tau_\kappa\ ;\quad A_3=\frac{4d\alpha_1}{(D^2-d^2)C_{cm}}\tau_\kappa\ ;$$

$$A_4=\frac{4D\alpha_2}{(D^2-d^2)C_{cm}}\tau_\kappa\ ;\quad \xi=\frac{\tau}{\tau_\kappa}\ ;\quad t'=\frac{t}{\tau_\kappa}\ ;$$

$$\Delta\theta_{aq_1}=\frac{\Delta T_{aq_1}}{RT_0^2/E_1}\ ;\quad \Delta\theta_{aq_2}=\frac{\Delta T_{aq_2}}{RT^2/E_1}\ ;\quad \Delta T_{aq_1}=\frac{q_1\cdot 0{,}01}{c_p}\ ;$$

$$\Delta T_{aq_2}=\frac{q_2\cdot 0{,}01}{c_p}\ ;\quad K_1'=K_1(T_0)e^{\frac{\theta}{1+b\theta}};\ K_1(T_0)=K_{10}\cdot e^{-\frac{E_1}{RT_0}}\tau_\kappa\ ;$$

$$K_2'=K_2(T_0)^{-\frac{\theta\varrho}{1+b\theta}}\ ;\quad K_2(T_0)=K_{20}e^{-\frac{E_2}{RT_0}}\tau_\kappa\ ;\quad \varrho=\frac{E_2}{E_1}\ ,$$

где

T - температура в зоне контакта, $^\circ$К;

T_0 - температура входа исходной смеси в реактор, $^\circ$К;

T_{cm} - температура стенки трубчатки, $^\circ$К;

T_x - температура хлодоагента в межтрубном пространстве, $^\circ$К;

R - газовая постоянная, R = 1,987 $\frac{\text{кал}}{\text{моль.град}}$;

E_1, E_2 - энергия активации первой и второй реакции соответственно, $\frac{\text{кал}}{\text{моль}}$; C_0 - начальная концентрация метанола, %;

t - параметр, сек;

a - параметр, a - 2.7%$^{-1}$;

τ - условное время контакта, текущее, сек;

τ_k - общее время контакта, сек;

C_{cm}, C_k, C_p - теплоемкость металлической стенки катализатора и контактных газов, соответственно, $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^3\cdot\text{град}}$;

α_1, α_2 - коэффициенты теплоотдачи со стороны контактных газов к стенке трубчатки и со стороны хладогента к той же стенке, соответственно, $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\cdot\text{сек}\cdot\text{град}}$;

d, D - внутренний и наружный диаметры трубки, м;

q_1, q_2 - тепловые эффекты первой и второй реакции, соответственно, $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^3}$;

X - общая степень превращения метанола в долях единицы;

y - степень превращения метанола в формальдегид в долях единицы;

ε - пористость слоя катализатора.

Используемая здесь модель идеального вытеснения оправдана только в случае, если процесс осуществляется в трубках с малым внутренним диаметром и при высоких линейных скоростях. Экспериментальные данные, приведенные в /2/, свидетельствуют о возможности использования этой модели для расчета стационарного режима при d = 14 мм. Сравнение экспериментальных частотных характеристик позволит определить возможность использования модели идеального вытеснения для расчета переходных режимов.

После линеаризации /14/ переходим к уравнениям в отклонениях и, применив к последним преобразование Лапласа по переменной t' получим,

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{d\Delta\bar\theta}{d\xi} = (B_1 - A_1 S)\Delta\bar\theta + A_2\Delta\bar\theta_{cm} + B_2\Delta\bar X + B_3\Delta\bar y + B_4\Delta\bar Z + B_5\Delta\bar u;\\
&0 = A_3\Delta\bar\theta + (A_3 + A_4 - S)\Delta\bar\theta_{cm} + A_4\Delta\bar\theta_x + B_{13}\Delta\bar u;\\
&\frac{d\Delta\bar X}{d\xi} = B_6\Delta\bar\theta + (B_7 - S)\Delta\bar X + B_8\Delta\bar u;\\
&\frac{d\Delta\bar y}{d\xi} = B_9\Delta\bar\theta + B_{10}\Delta\bar X + (B_{11} - S)\Delta\bar y + B_{12}\Delta\bar Z + B_{14}\cdot\Delta\bar u;\\
&\Delta Z = \frac{\Delta C}{C}; \qquad \Delta u = \frac{\Delta\tau_k}{\tau_k};
\end{aligned}\right\} \quad /15/$$

где $\Delta\bar\theta, \Delta\bar\theta_{cm}, \Delta\bar X, \Delta\bar y, \Delta\bar Z, \Delta\bar u$ - изображения по Лапласу соответствующих отклонений параметров. Коэффициенты $B_1, B_2 \ldots B_{14}$ зависят от координаты и рассчитываются из уравнений стационарного режима /I/. После приведения /I4/ и /I5/ к выражениям в передаточных функциях и отделения действительных частей от мнимых получим:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{dU\overline{\Delta\theta}}{d\xi}=B_1U\overline{\Delta\theta}+\omega A_1V\overline{\Delta\theta}+A_2U\overline{\Delta\theta}_{cm}+B_2U\overline{\Delta x}+\\
&\qquad +B_3U\overline{\Delta y}+B_4U\overline{\Delta z}+B_5U\overline{\Delta u};\\
&\frac{dV\overline{\Delta\theta}}{d\xi}=B_1V\overline{\Delta\theta}-\omega A_1U\overline{\Delta\theta}+A_2V\overline{\Delta\theta}_{cm}+B_2V\overline{\Delta x}+B_3V\overline{\Delta y};\\
&0=A_3U\overline{\Delta\theta}+(A_3+A_4)U\overline{\Delta\theta}_{cm}+\omega V\overline{\Delta\theta}_{cm}+A_4U\overline{\Delta\theta}_x+B_{13}U\overline{\Delta u};\\
&0=A_3V\overline{\Delta\theta}+(A_3+A_4)V\overline{\Delta\theta}_{cm}-\omega U\overline{\Delta\theta}_{cm};\\
&\frac{dU\overline{\Delta x}}{d\xi}=B_6U\overline{\Delta\theta}+B_7U\overline{\Delta x}+\omega V\overline{\Delta x}+B_8U\overline{\Delta u},
\end{aligned}\right\}\quad /16/$$

$$\frac{dV\overline{\Delta x}}{d\xi}=B_6V\overline{\Delta\theta}+B_7V\overline{\Delta\theta}-\omega U\overline{\Delta x};$$

$$\frac{dU\overline{\Delta y}}{d\xi}=B_9U\overline{\Delta\theta}+B_{10}U\overline{\Delta x}+B_{11}U\overline{\Delta y}+\omega V\overline{\Delta y}+B_{12}U\overline{\Delta z}+B_{14}U\overline{\Delta u};$$

$$\frac{dV\overline{\Delta y}}{d\xi}=B_9V\overline{\Delta\theta}+B_{10}V\overline{\Delta x}+B_{11}V\Delta y-\omega U\overline{\Delta y};$$

где U - действительные, V - мнимые частотные характеристики по соответствующему каналу возмущения.

В зависимости от исследуемого канала начальными условиями для решения системы /I6/ могут быть:

$$U\overline{\Delta\theta}(0)=V\overline{\Delta\theta}(0)=U\overline{\Delta x}(0)=V\overline{\Delta x}(0)=U\overline{\Delta y}(0)=V\overline{\Delta y}(0)=0. \quad /17/$$

Кроме того, необходимо положить

$$U\overline{\Delta z}=1;\ U\overline{\Delta u}=U\overline{\Delta\theta}_x=V\overline{\Delta z}=V\overline{\Delta u}=V\overline{\Delta\theta}x=0.$$

При изменении температуры хладоагента в межтрубном пространстве начальные условия аналогичны. Кроме того, необходимо положить:

$$U\overline{\Delta\theta}_x=1;\ U\overline{\Delta z}=U\overline{\Delta u}=U\overline{\Delta z}=U\overline{\Delta u}=V\overline{\Delta z}=V\overline{\Delta u}=V\overline{\Delta\theta}x=0 \quad \text{и т.д.}$$

Решение системы /I6/ для $\xi=\xi_{г.т}$ $\xi_{г.т}$ - координата так называемой "горячей точки", т.е. сечения слоя, в котором температура достигает максимального значения /3/, было найдено на цифровой вычислительной машине для таких значений параметров:

$A_I = 600$; $A_2 = 6{,}2I$; $A_3 = 0{,}0052$; $A_4 = 0{,}0127$; $\Delta\theta_{ag_1} = 0{,}85$; $\Delta\theta_{ag_2} = I{,}23$; $K_I\,/T_0/ = I{,}I7$; $K_2\,/T_0/ = 0{,}83$; $C = 6{,}5$; $\delta = 0{,}52$; $\eta = 0{,}69$. Эти значения параметров соответствуют условиям проведения эксперимента, описанным в /3/.

На рис. 1 и 2 изображены рассчитанные амплитудофазовые частотные характеристики и приведены экспериментальные данные из /1/, полученные на основе экспериментально найденной передаточной функции.

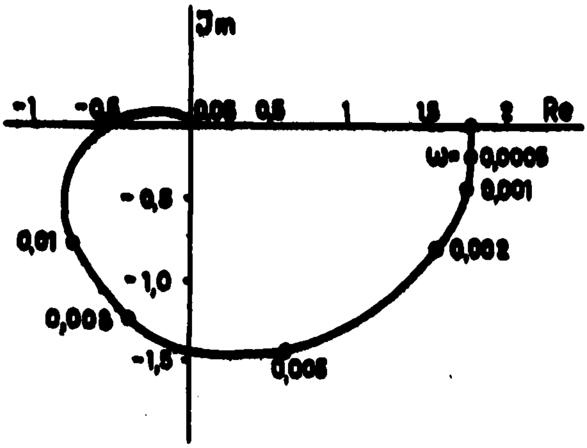

Рис. 1. Амплитудо-фазо-частотная характеристика по каналу: $\Delta\theta_{г.т.}$ температура в "горячей точке"; – $\Delta\theta_{х}$ температура хладоагента в межтрубном пространстве

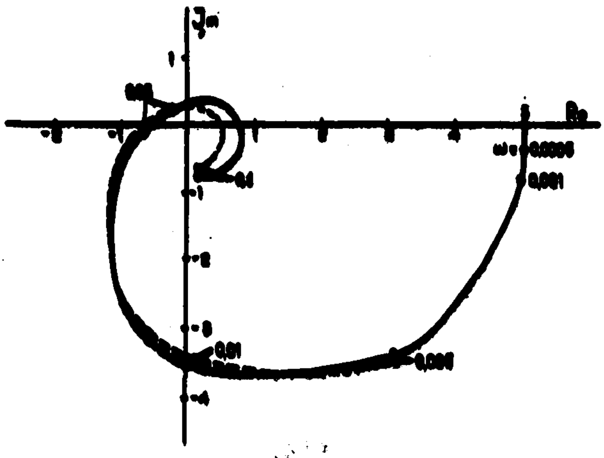

Рис. 2. Амплитудо-фазо-частотная характеристика по каналу: – $\Delta\theta_{г.т}$ температура в "горячей точке"; – ΔZ концентрация спирта в исходной спиртовоздушной смеси;

------------ экспериментальные данные ,

———————— расчетные данные.

Удовлетворительное совпадение рассчитанных и экспериментально найденных частотных характеристик свидетельствует о возможности использования модели идеального вытеснения для расчета переходных режимов в изучаемом здесь реакторе.

Поступила в редакцию 20.2.1971 г.

Литература

1. Ю.Ш.Матрос, В.С.Весков. Расчет контактного аппарата с внутренним теплообменом как объекта регулирования,-"Химическая промышленность", 1965, 5,357.

2. В.Г.Накрохин, Г.В.Шибанов, Г.И.Скуе, В.В.Накрохин, Ш.М.Итенберг, Х.Д.Рашрагович. Окисление метанола в формальдегид на окисных катализаторах,-"Химическая промышленность", 1968,2,97.

3. Ю.Ш.Матрос, В.С.Весков. Расчет контактного аппарата с внутренним теплообменом как объекта регулирования. Исследование статических характеристик,-"Химическая промышленность", 1963. 12,883.