

Таким образом, сложившаяся ситуация с отставанием в вопросах автоматизации процессов на производящих предприятиях России носит системный характер и преодоление этого отставания является единственной возможностью перейти к инновационной экономике. Однако, учитывая необходимость кардинальных перемен во всех сферах, начиная с подготовки кадров и кончая подбором ЛПП, ожидать адекватных организационных шагов сверху в ближайшие годы не представляется возможным, что с неизбежностью приведет к усилению сырьевого направления и поставит на грань выживания производящие предприятия, существующие во многом благодаря госзаказу. Сохранение производящих предприятий возможно через развитие кооперации не только хозяйствующих субъектов производственной сферы, но и их научного и кадрового сопровождения, что будет способствовать снижению издержек на всех стадиях ЖЦИ и обеспечит защиту продукции этих предприятий на рынке.

A. S. Degterev, V. I. Usakov, V. V. Khartov

THE PROBLEMS OF AUTOMATION OF PROCESSES AT MANUFACTURING ENTERPRISES

Contemporary situation with lag in the questions of automation of processes at Russian manufacturing enterprises is of system nature. First steps to overcome this lag were made in organizational sphere, in particular, in the sphere of cooperation development.

Keywords: automation of processes, manufacturing enterprises.

© Дегтерев А. С., Усаков В. И., Хартов В. В., 2011

УДК 62.52

Н. Д. Демиденко

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА

Получена математическая модель процесса массообмена в ректификационных колоннах тарельчатого типа. Построена система обыкновенных дифференциальных уравнений с переходом к уравнениям в частных производных. Проведены исследования процессов установления в динамических режимах. Рассчитаны статистические и динамические характеристики промышленной ректификационной колонны.

Ключевые слова: статические и динамические режимы, переходные процессы, время установления, метод суперпозиции стоячих волн, асимптотика.

Для математического описания процессов массообмена в ректификационных колоннах широко используются системы уравнений в частных производных [1; 2]. Такое описание вполне естественно для колонн насадочного типа, но требует отдельного обоснования для тарельчатых колонн, так как в последнем случае объект по своей природе дискретен. В [2] был развит подход, основанный на детальном рассмотрении процессов для отдельной тарелки. На основе физических представлений о гидродинамике жидкости в тарелке и барботаже парового потока были получены уравнения баланса массы с учетом фазо-

Библиографические ссылки

1. Адизес И. Управление жизненным циклом корпорации. СПб. : Питер, 2007.
2. Управление жизненным циклом продукции / А. Ф. Колчин, М. В. Овсянников, А. Ф. Стрекалов, С. В. Сумароков. М. : Анахарсис, 2002.
3. Судов Е. В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. М. : МВМ, 2003.
4. Энциклопедия PLM [Электронный ресурс]. URL: www.PLMpedia.ru (дата обращения: 18.10.2011).
5. Механика современных специальных систем. В 3 т. / Н. В. Василенко, Н. И. Галибей, В. К. Гупалов и др. ; под ред. проф. Н. В. Василенко, Н. И. Галибея. Красноярск, 2004.

Рассмотрим систему уравнений, описывающую массообмен для бинарной смеси в ректификационной колонне тарельчатого типа [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left((HS_1 + S_2 h(H)) nx \right) - \Delta l \frac{\partial (Qnx)}{\partial l} = \\ \frac{k_\tau \pi D^{3/n}}{6\tau} (y - kx) + \Phi_1, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(S_2 (\Delta l - h_0) ny \right) + \Delta l \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{k_\tau \pi D^{3/n} y}{6\tau} \right) = \\ \frac{k_\tau \pi D^{3/n}}{6\tau} (kx - y) + \Phi_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y – массовые, а \bar{n}, n – мольные концентрации компонентов в паре и жидкости соответственно; $H, h(H)$ – уровень жидкости в переливном патрубке и на тарелке; Q – поток жидкой фазы; Δl – расстояние между тарелками; S_1, S_2, k_τ, D – геометрические параметры тарелки; τ – величина, характеризующая время образования пузырька пара в жидкости; Φ_1, Φ_2 – функции внешнего воздействия, обусловленные вводом и выводом потоков сырья и целевых продуктов.

Большой интерес представляет исследование различных нестационарных режимов, в частности процессов установления. При малых отклонениях от равновесного состояния возможно проведение линеаризации системы и использование метода стоячих волн для исследования спектра собственных частот. Несмотря на простоту, этот метод позволяет не только получить качественное представление о характере процесса установления, но и определить важные количественные характеристики времени установления, резонансные свойства системы, а также выявить области неустойчивости в пространстве параметров системы.

Вычисление времени установления необходимо по двум причинам: во-первых, это важно для прогнозирования времени перехода с одного стационарного режима к другому при изменении скорости поступления сырья или его состава; во-вторых, это нужно для оптимального проведения расчетов в более сложных программах решения системы (1) по конечно-разностной методике. В этом случае программа вычисления собственных частот и времени установления включается как блок в общую программу и позволяет выбрать оптимальный шаг интегрирования по времени, совместимый с устойчивостью и удовлетворительной аппроксимацией. Для контроля точности расчетов по конечно-разностной методике в качестве тестовых также могут быть использованы аналитические решения, представленные в виде суперпозиции стоячих волн.

Если известно N собственных значений, то можно выписать соответствующее N параметрическое семейство решений в виде

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \sum_{n=1}^N c_n \begin{pmatrix} u_n \\ v_n \end{pmatrix} e^{\lambda_n t}, \quad (2)$$

где u_n, v_n – собственные функции частот; λ_n – комплексные числа; c_n – произвольные коэффициенты.

Для применения конечно-разностной методики к решению системы (1) введем следующие обозначения: $u = (HS_1 + S_2 h(H)) nx$, $v = \bar{n}y$, $k_y = \frac{k_\tau \pi D^{3/n}}{6\tau}$.

Линеаризуя (1) в окрестности стационарных параметров, получим систему без учета внешнего воздействия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - A \frac{\partial u}{\partial l} &= D_1 (v - k^* u), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + B \frac{\partial v}{\partial l} &= D_2 (k^* u - v), \end{aligned} \quad (3)$$

где A, B – величины, пропорциональные скоростям потоков. Граничные условия с учетом рециркуляции взаимодействующих для этой системы можно записать в виде [2]:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \frac{du}{dt} + \beta_1 \frac{dv}{dt} &= \gamma_1 u + \delta_1 v, \quad l = 0, \\ \alpha_2 \frac{du}{dt} + \beta_2 \frac{dv}{dt} &= \gamma_2 u + \delta_2 v, \quad l = L, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ ($i = 1, 2$) – коэффициенты, зависящие от параметров потоков в кубе ($l = 0$) и дефлегматоре ($l = L$). Конкретный вид этих коэффициентов приведен в работе [2].

Решение задачи (3), (4) ищем в виде

$$u = u(l) e^{\lambda t}, \quad v = v(l) e^{\lambda t}.$$

Подставим эти решения в систему (3) и граничные условия (4):

$$\begin{aligned} u(l)\lambda - Au'(l) &= D_1 (v(l) - k^* u(l)), \\ v(l)\lambda + Bv'(l) &= D_2 (k^* u(l) - v(l)), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 \lambda u(0) + \beta_1 \lambda v(0) &= \gamma_1 u(0) + \delta_1 v(0), \quad l = 0, \\ \alpha_2 \lambda u(0) + \beta_2 \lambda v(0) &= \gamma_2 u(0) + \delta_2 v(0), \quad l = L. \end{aligned} \quad (6)$$

Решим систему (5):

$$u(l) = ae^{\mu l}, \quad v(l) = be^{\mu l}.$$

Подставляя $u(l)$ и $v(l)$ в (3), получим систему на собственные значения λ :

$$\begin{aligned} a\lambda - Aa\mu &= D_1 (b - k^* a), \\ b\lambda + Bb\mu &= D_2 (k^* a - b), \end{aligned}$$

из которой найдем выражения для $\mu_{1,2}(\lambda)$:

$$\begin{aligned} \mu_{1,2} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{A} - \frac{\lambda}{B} - \frac{D_2}{B} + \frac{D_1 k^*}{A} \right) \pm \\ &\pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\lambda}{A} - \frac{\lambda}{B} - \frac{D_2}{B} + \frac{D_1 k^*}{A} \right)^2 + \frac{\lambda^2}{AB} + \frac{\lambda D_2}{AB} + \frac{\lambda k^* D_1}{AB}}. \end{aligned}$$

Затем решение системы (5)

$$u = ae^{\lambda t + \mu_1 l}, \quad v = be^{\lambda t + \mu_1 l}$$

запишем в векторном виде:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = a_1 \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{D_1}(\lambda - A\mu_1 + D_1 k^*) \end{pmatrix} e^{\mu_1 l + \lambda t} + a_2 \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{D_1}(\lambda - A\mu_2 + D_1 k^*) \end{pmatrix} e^{\mu_2 l + \lambda t}. \quad (7)$$

Для определения λ и, следовательно, $\mu_1(\lambda)$ и $\mu_2(\lambda)$ воспользуемся граничными условиями (6). Подставляя решение (7) в граничные условия при $l = 0$ и $l = L$, получим:

$$\begin{aligned} & a_1 e^{\lambda t} \left(\lambda \alpha_1 - \gamma_1 + (\lambda \beta_1 - \delta_1) \frac{1}{D_1} (\lambda - A\mu_1 + D_1 k^*) \right) + \\ & + a_2 e^{\lambda t} \left(\lambda \alpha_1 - \gamma_1 + (\lambda \beta_1 - \delta_1) \frac{1}{D_1} (\lambda - A\mu_2 + D_1 k^*) \right) = 0, \quad l = 0, \\ & a_1 e^{\mu_1 L} \left(\lambda \alpha_2 - \gamma_2 + (\lambda \beta_2 - \delta_2) \frac{1}{D_1} (\lambda - A\mu_1 + D_1 k^*) \right) + \\ & + a_2 e^{\mu_2 L} \left(\lambda \alpha_2 - \gamma_2 + (\lambda \beta_2 - \delta_2) \frac{1}{D_1} (\lambda - A\mu_2 + D_1 k^*) \right) = 0, \quad l = L. \end{aligned}$$

Итак, мы имеем систему уравнений для коэффициентов решения (7) a_1, a_2 . Ее определитель должен быть равен нулю:

$$\begin{aligned} f(\lambda) &= e^{\mu_2 L} \left(\lambda \alpha_1 - \gamma_1 + (\lambda \beta_1 - \delta_1) \frac{1}{D_1} (\lambda - A\mu_1 + D_1 k^*) \right) \times \\ & \times \left(\lambda \alpha_2 - \gamma_2 + (\lambda \beta_2 - \delta_2) \frac{1}{D_1} (\lambda - A\mu_2 + D_1 k^*) \right) = \\ & = -e^{\mu_1 L} \left(\lambda \alpha_2 - \gamma_2 + (\lambda \beta_2 - \delta_2) \frac{1}{D_1} (\lambda - A\mu_1 + D_1 k^*) \right) \times \\ & \times \left(\lambda \alpha_1 - \gamma_1 + (\lambda \beta_1 - \delta_1) \frac{1}{D_1} (\lambda - A\mu_2 + D_1 k^*) \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Вычислив корни λ этого трансцендентного уравнения, мы тем самым найдем спектр исходной задачи, который, вообще говоря, содержит бесконечное число значений λ . Поэтому процесс решения уравнения (8) разобьем на два этапа: сначала определим младшие корни λ внутри достаточно большого замкнутого контура C и получим точное численное решение уравнения (8), а затем исследуем асимптотику при $\lambda \rightarrow \infty$.

Для получения точного решения уравнения (8) воспользуемся методами теории функций комплексного переменного. Известно, что число нулей внутри замкнутого контура C аналитической функции $f(\lambda)$, не имеющей полюсов, определяется по формуле [3]:

$$N = \frac{1}{2\pi i} \int_C \frac{f'(\lambda)}{f(\lambda)} d\lambda.$$

Зная число корней, определим сами корни, воспользовавшись формулой [3]:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_C \lambda \frac{f'(\lambda)}{f(\lambda)} d\lambda = \sum_{k=1}^N n_k a_k,$$

где a_k – корень уравнения $f(\lambda) = 0$; n_k – его кратность.

Согласно этой формуле составим систему

$$\begin{aligned} \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n &= \frac{1}{2\pi i} \int_C \lambda \frac{f'(\lambda)}{f(\lambda)} d\lambda, \\ \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_n^2 &= \frac{1}{2\pi i} \int_C \lambda^2 \frac{f'(\lambda)}{f(\lambda)} d\lambda, \\ &\dots \\ \lambda_1^N + \lambda_2^N + \dots + \lambda_n^N &= \frac{1}{2\pi i} \int_C \lambda^N \frac{f'(\lambda)}{f(\lambda)} d\lambda, \end{aligned}$$

которая решается внутри достаточно большого контура C .

При исследовании асимптотики необходимо исходить из конкретных граничных условий. Поэтому возьмем задачу, например из работы [2], и применим к ней конечно-разностную методику.

Граничные условия из работы [2] приведем к виду

$$\begin{aligned} H_k \frac{dv}{dt} &= c_1 u - \frac{w c_2}{V} v - c_2 v, \quad l = 0, \\ \frac{H_d c_2}{L_d} \frac{du}{dt} &= c_2 v - \frac{V_d c_1}{L_d} u, \quad l = L, \end{aligned}$$

где $H_k, H_d, c_1, c_2, V_d, L_d, W$ – известные коэффициенты, откуда для системы (6) получим:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0, \quad \beta_1 = \frac{c_1 H_k}{V_d}, \quad \gamma_1 = c_1, \quad \delta_1 = -c_2 \left(\frac{W}{V_d} + 1 \right), \\ \alpha_2 &= \frac{H_d c_1}{L_d}, \quad \beta_2 = 0, \quad \gamma_2 = -\frac{c_1 V_d}{L_d}, \quad \delta_2 = c_2. \end{aligned}$$

В уравнении (8) исключим младшие члены, не содержащие λ и первого порядка относительно λ , и получим уравнение для достаточно больших λ :

$$e^{\frac{\lambda}{AB}(A+B)L} = - \frac{\left(\alpha_2 - \frac{\delta_2}{D_1} \left(1 + \frac{A}{B} \right) \right) \beta_1 k^*}{\alpha_2 \lambda \frac{\beta_1}{D_1} \left(1 + \frac{A}{B} \right)}.$$

Числитель правой части, не содержащий λ , обозначим c . Тогда

$$e^{\frac{\lambda}{AB}(A+B)L} = - \frac{c}{\alpha_2 \lambda \frac{\beta_1}{D_1} \left(1 + \frac{A}{B} \right)}.$$

Имея в виду, что λ – комплексное число, т. е. $\lambda = \xi + i\eta$, получим:

$$\frac{\lambda(A+B)L}{AB} = \ln \left[-\frac{c}{\alpha_2 \lambda \frac{\beta_1}{D_1} \left(1 + \frac{A}{B}\right)} \right] - \ln \lambda,$$

$$\xi = \frac{AB}{(A+B)L} \ln \left[-\frac{c}{\alpha_2 \lambda \frac{\beta_1}{D_1} \left(1 + \frac{A}{B}\right)} \right] - \frac{AB}{(A+B)L} \ln \eta,$$

$$\eta = -\frac{2\pi n AB}{(A+B)L} + \text{const.}$$

Перенумеровав полученные λ в порядке возрастания $|\text{Re}\lambda|$, решение системы (3) запишем в виде суперпозиции стоячих волн:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \sum_n e^{\lambda_n t} \left[a_n \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{D_1} (\lambda_n - A\mu_1 + D_1 k^*) \end{pmatrix} e^{\mu_1 l} + b_n \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{D_1} (\lambda_n - A\mu_2 + D_1 k^*) \end{pmatrix} e^{\mu_2 l} \right]$$

где a_n, b_n выбираются таким образом, чтобы удовлетворить заданному начальному условию.

При исследовании полученного спектра $\{\lambda_n\}$ нужно прежде всего обратить внимание на $\text{Re}\lambda_n$. Если среди комплексных чисел λ_n имеются такие, для которых $\text{Re}\lambda > 0$, то коэффициенты системы таковы, что режим будет расходящимся, и поэтому следует изменить значения параметров.

В заключение рассмотрим величину $\tau = \max \frac{1}{|\text{Re}\lambda|}$ –

время затухания самой медленной из гармоник, т. е. время установления для всей системы. От этой величины зависит выбор шага интегрирования по времени при расчетах по конечно-разностной методике. При расчетах периодических режимов следует иметь в виду, что существует возможность резонанса при совпадении частоты внешнего воздействия с одной из собственных частот (мнимой частью λ).

Приведем результаты расчетов, полученные с помощью конечно-разностной методике для прогнозирования поведения решения задачи (3), (4) (рис. 1–4). Были использованы следующие коэффициенты:

$$A = 36 \text{ м/с}, \quad B = 360 \text{ м/с}, \quad D_1 = D_2 = k_y \frac{B}{V},$$

$$V = 73,07 \text{ кмоль/ч}, \quad k^* = \frac{V \cdot A}{L \cdot B}, \quad \alpha = 45,21 \text{ кмоль/ч},$$

$$H_k = 30 \text{ кмоль/ч}, \quad H_d = 50 \text{ кмоль/ч},$$

$$W = 76,59 \text{ кмоль/ч}.$$

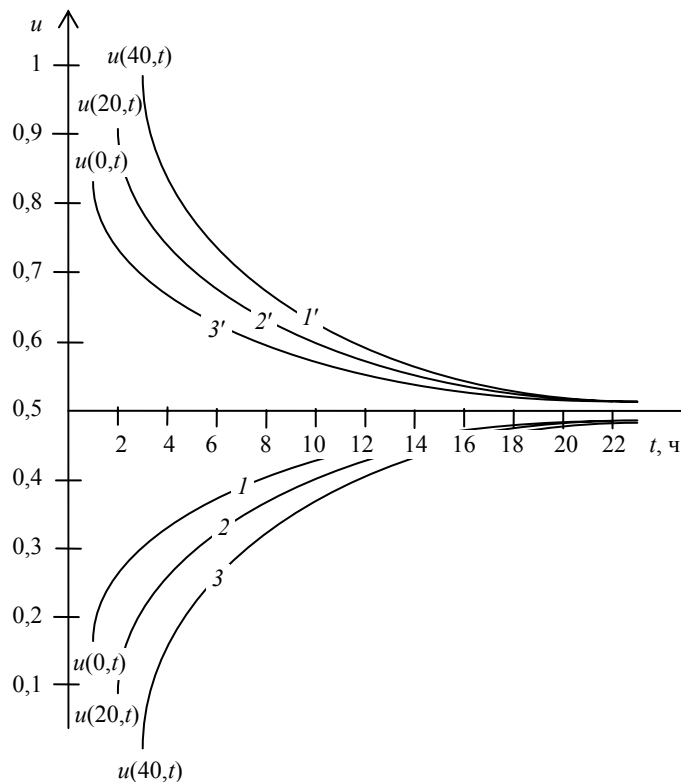


Рис. 1. Кривые переходных процессов при возмущении по концентрации сверху колонны для точек $l = 0, 20, 40$ м: $1', 2', 3'$ – при увеличении $u(L,0)$ на 50%; $1, 2, 3$ – при уменьшении $u(L,0)$ на 50%

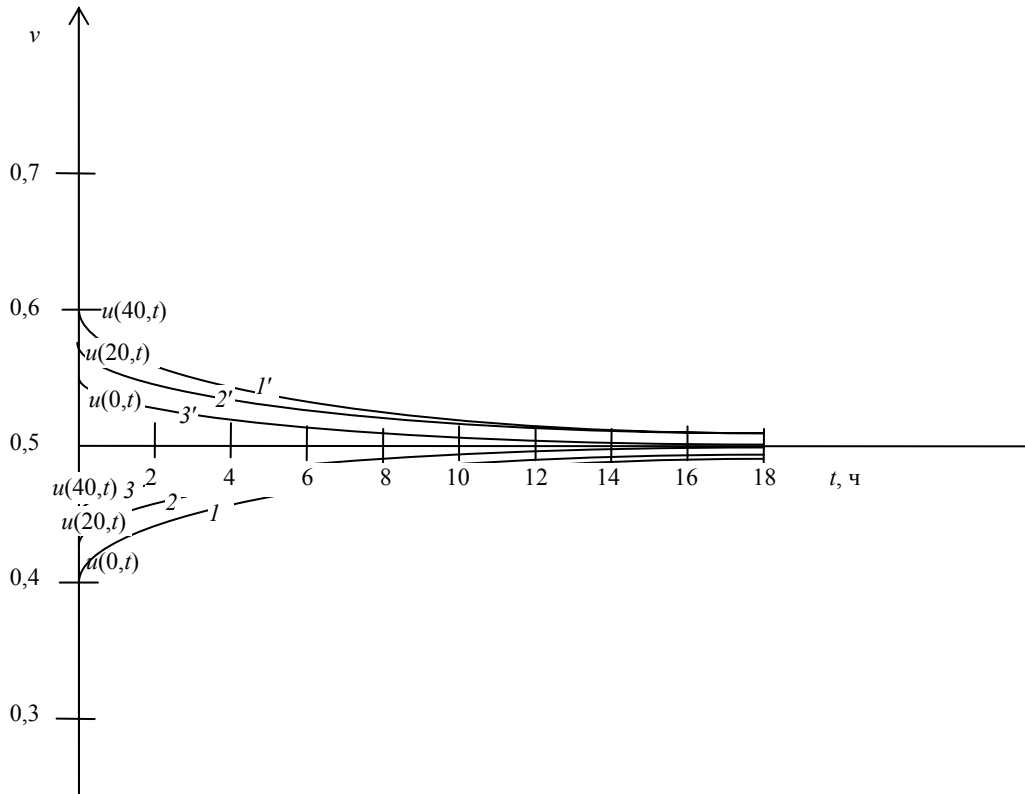


Рис. 2. Кривые переходных процессов при возмущении по концентрации сверху колонны для точек $l = 0, 20, 40$ м: $1', 2', 3'$ – при увеличении $v(L,0)$ на 50%; $1, 2, 3$ – при уменьшении $v(L,0)$ на 50%

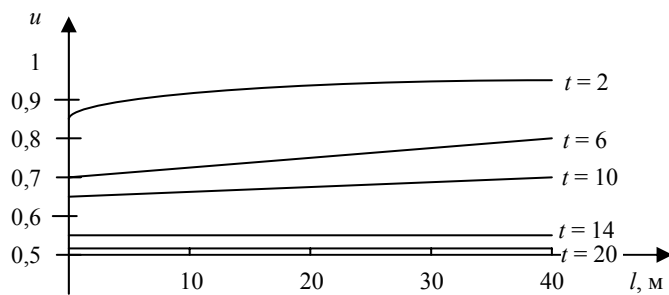


Рис. 3. Профиль концентраций в жидкости по длине колонны при возмущении на 50% сверху колонны для различных t , ч

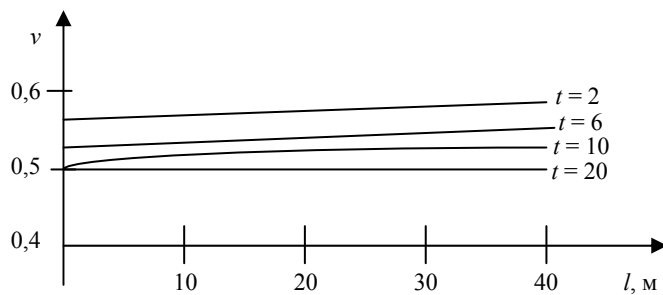


Рис. 4. Профиль концентраций в паре по длине колонны в различные моменты времени при возмущении на 50% сверху колонны для различных t , ч

Для этих коэффициентов все $\operatorname{Re} \lambda < 0$, что обеспечивает сходимость процесса. Кроме того, можно определить время установления $\tau = \max \frac{1}{|\operatorname{Re} \lambda|} = 6,39$ ч,

за которое амплитуда самой медленной гармоники уменьшается в e раз.

В сложных химико-технологических установках, состоящих из ряда соединенных аппаратов и имеющих систему потоков взаимодействия их сред, параметры которых чувствительны к возмущениям, все более важным становится построение высокоэффективных систем контроля и управления. Однако прежде чем создавать такие системы управления, полагая основным ее звеном управляемый объект, необходимо улучшить статические и динамические характеристики этого объекта.

В данной статье предложен подход к решению задачи моделирования нестационарных режимов объектов с рециркуляцией взаимодействующих потоков

(ректификационных установок), основанный на математическом аппарате, содержащем дифференциальные уравнения в частных производных. Для исследования процессов установления применялся метод стоящих волн, который позволяет получить сведения не только о качестве и характере процессов установления, но и определить важные характеристики времени установления, резонансные свойства системы и выявить области неустойчивости в пространстве параметров системы.

Библиографические ссылки

1. Демиденко Н. Д., Потапов В. И., Шокин Ю. И. Моделирование и оптимизация систем с распределенными параметрами. Новосибирск : Наука, 2006.
2. Демиденко Н. Д. Управляемые распределенные системы. Новосибирск : Наука, 1999.
3. Лаврентьев А. М. Методы теории функций комплексного переменного. М. : Наука, 1973.

N. D. Demidenko

INVESTIGATION OF STATIC AND DYNAMIC REGIMES OF MASS TRANSFER PROCESSES

A mathematical model for mass transfer process in rectification columns of poppet type is obtained. At the result of the investigation the ordinary differential equations system is obtained with the transition to equations in partial derivatives. Investigations of processes of detection establishment of mass transfer processes in dynamic regimes are performed. Static and dynamic characteristics for industrial rectification columns are calculated.

Keywords: static and dynamic regimes, the transients, transient periods, method of superposition of standing waves, asymptotics.

© Демиденко Н. Д., 2011

УДК 004.652.4

Д. В. Жучков

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ НАСЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО OLAP-АНАЛИЗА*

Описан подход к обеспечению возможности ретроспективного OLAP-анализа путем реализации механизмов наследования для аналитических измерений многомерных OLAP-кубов. Предлагаемый подход основан на использовании полей периода действия, журналов изменений и ретроспективных представлений.

Ключевые слова: OLAP-анализ, ретроспективный анализ, измерение, наследование, период действия.

Многомерная модель данных в технологии оперативной аналитической обработки (On-line Analytical Processing, OLAP) оперирует двумя базовыми понятиями: таблицами фактов и таблицами измерений. Таблицы фактов включают в себя описания некоторых событий реальной жизни (фактов) в разрезе показателей (Measures) и измерений (Dimensions), а таблицы измерений содержат шкалы, по которым анализируются показатели [1]. Как правило, таблицы измере-

ний состоят из редко изменяемого набора значений, исчерпывающе описывающего отдельный признак исследуемого объекта предметной области. Частота модификации измерений при этом может меняться в широком диапазоне. Например, измерения «месяцы», «пол» не изменяются никогда, измерения «страны», «города» изменяются очень редко, измерения «подразделения», «виды деятельности» – довольно редко, а измерения «клиенты», «проекты» – сравнительно часто.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (ГК № 02.740.11.0621 от 29 марта 2010 г.).