

УДК 621.184

АЛГОРИТМ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ ТЕПЛО-МАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ СО СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ПОТОКОВ

БАРОЧКИН Е.В., канд. техн. наук

Предложен алгоритм структурно-параметрического синтеза систем теплообменников аппаратов и разработан подход к повышению эффективности теплоэнергетического оборудования.

Ключевые слова: теплообменные аппараты, моделирование теплообмена, матрица коммутации.

STRUCTURE-PARAMETRIC SYNTHESIS ALGORITHM OF HEAT-MASS EXCHANGE APPARATUS SYSTEMS WITH COMPLEX FLOW CONFIGURATION

E.V. BAROCHKIN, Ph.D.

The work represents the algorithm of structure-parametric synthesis of heat-mass exchange apparatus systems and the approach for heat power engineering equipment effectiveness increase.

Key words: heat-mass exchange apparatus, heat-mass exchange simulation, commutation array.

Повышение потребления энергии на душу населения с одновременным ростом численности населения земного шара приводит к росту производства энергии и ставит перед человечеством глобальные проблемы теплового загрязнения окружающей среды, с одной стороны, и истощения разведанных запасов топлива, с другой. В связи с этим особую актуальность приобретает задача повышения эффективности систем генерации и использования энергии. На основе созданного алгоритма структурно-параметрического синтеза систем теплообменников предлагаются подходы к решению ряда оптимизационных задач.

На первом этапе решается задача моделирования теплообмена в ступени поверхностного и смешивающего подогревателя и струйного деаэраатора. Для описания всего спектра характерных областей теплообмена для двух теплоносителей разработаны следующие четыре модели: фазовый переход теплоносителей отсутствует (модель 1); фазовый переход только горячего теплоносителя (модель 2); фазовый переход только холодного теплоносителя (модель 3); фазовый переход одновременно холодного и горячего теплоносителей (модель 4).

В результате решения дифференциальных уравнений теплового и материального баланса найдено матричное описание процесса в ступени для каждой модели [1, 2]. Для унификации и автоматизации составления модели при произвольном задании двух известных параметров теплоносителей два уравнения системы дополняются двумя уравнениями связи, с помощью которых задаются известные из начальных условий значения параметров теплоносителей.

В ступени смешивающих подогревателей наряду с теплообменом осуществляется массообмен между теплоносителями. В качестве поверхности теплообмена рассматривается суммарная поверхность раздела фаз – поверхность струй.

Особый научный и практический интерес представляет теплообмен в смешивающих аппаратах – деаэрааторах, где наряду с нагревом воды осуществляется удаление из нее растворенных газов. Разница температур обуславливает теплообмен между водой и паром, разница концентраций газа – деаэрацию воды. Рассматривается сре-

да, состоящая из четырех компонентов: воды, водяного пара, газа в жидкой и газа в паровой фазе. Считается, что в ступени одновременно протекают следующие процессы: теплообмен между паром и водой; массообмен между паром и водой; массообмен между газом, растворенным в воде, и газом паровой фазы. В качестве определяющей координаты выбирается поверхность теплообмена F . На элементарном участке dF вода нагревается за счет теплопередачи от пара и смешения с его конденсатом. Из баланса энергий и массы через элементарную поверхность dF получена система дифференциальных уравнений, описывающая изменение температурного напора τ , массового расхода теплоносителей G и концентрации газа в воде (c_{g2}) и паре (c_{g1}) вдоль определяющей координаты F .

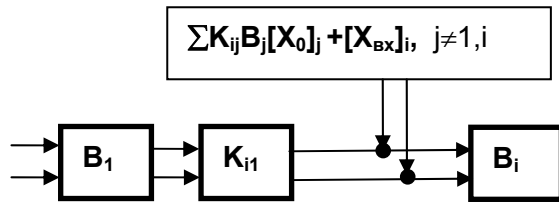
Обобщенное описание процесса в ступени представляется в виде матричного уравнения

$$\mathbf{X} = \mathbf{B}\mathbf{X}_0, \quad (1)$$

где \mathbf{B} – матрица процесса в ступени; \mathbf{X} – вектор параметров ступени; индекс «0» соответствует входным параметрам.

Для расчета многоступенчатых установок со сложной конфигурацией потоков предлагается метод синтеза модели системы из моделей ее элементов. Матрица-столбец (вектор) признаков \mathbf{X} составляется из аддитивных параметров теплоносителей, значения которых можно складывать при смешении потоков. Наиболее общий случай соединения ступеней предполагает возможность подачи на вход в i -й элемент потоков из всех остальных элементов (см. рисунок).

Пусть на вход в первый элемент подаются потоки холодного и горячего теплоносителя, которые характеризуются набором признаков $[\mathbf{X}_0]_1$ (индекс «0» внутри квадратных скобок указывает на входные параметры, индекс «1» за квадратными скобками относится к номеру ступени). Процесс тепло- и(или) массообмена описывается матрицей \mathbf{B} , произведение которой на вектор входных параметров, согласно (1), позволяет определить выходные параметры ступени $[\mathbf{X}]_1 = \mathbf{B}_1[\mathbf{X}_0]_1$. Для указания направления движения потока после ступени формируется матрица коммутации \mathbf{K}_1 , элементы которой показывают доли потока из первой ступени в i -ю. Матричное произведение $\mathbf{K}_i\mathbf{B}_i[\mathbf{X}_0]_1$ определяет параметры потока, подаваемого из первого элемента в i -й. Очевидно, что на вход в i -ю ступень могут подаваться потоки из остальных элементов



$[[X_0]_1 \rightarrow B_1[X_0]_1 \rightarrow K_{11}B_1[X_0]_1 \rightarrow [X_0]_i$

Расчетная схема формирования потоков на входе в i -й элемент установки

схемы и внешние потоки. Входной вектор признаков для i -го элемента определится как сумма аддитивных характеристик смешиваемых на входе в него потоков:

$$[X_0]_i = K_{i1}B_1[X_0]_1 + K_{i2}B_2[X_0]_2 + \dots + K_{ii}B_i[X_0]_i + \dots + K_{in}B_n[X_0]_n + [X_{вх}]_i, \quad (2)$$

где индекс «вх» соответствует внешним для установки потокам.

Уравнения, аналогичные (2), записываются для всех ступеней установки в виде системы матричных уравнений

$$\begin{pmatrix} -I & K_{12}B_2 & \dots & K_{1n}B_n \\ K_{21}B_1 & -I & \dots & K_{2n}B_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1}B_1 & K_{n2}B_2 & \dots & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [X_0]_1 \\ [X_0]_2 \\ \vdots \\ [X_0]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[X_{вх}]_1 \\ -[X_{вх}]_2 \\ \vdots \\ -[X_{вх}]_n \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где I – единичная матрица.

Матрица коммутации состоит из четырех элементов $K_{ij} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{pmatrix}_{ij}$, каждый из которых

показывает долю потока из j -го в i -й элемент: α_{11} – горячего теплоносителя в горячий; α_{12} – холодного в горячий; α_{21} – горячего в холодный; α_{22} – холодного в холодный (см. таблицу).

Вид матрицы коммутации K_{ij} при подаче из j -го в i -й элемент

Горячего теплоносителя	Холодного теплоносителя	Горячего и холодного теплоносителя	Теплоносители не подаются
$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

При известных матрицах B и K решение системы (3) позволяет определить значение параметров теплоносителей в любой точке установки. Система (3) для целого ряда практически важных случаев является системой линейных уравнений.

Рассмотрим порядок составления системы уравнений (3) и ее решение на примере расчета многоступенчатых деаэраторов. В деаэраторах наряду с подогревом воды происходит удаление растворенных в воде газов. Процесс деаэрации связан с незначительными массо- и энергопотоками, что позволяет рассматривать процессы теплообмена и деаэрации последовательно. На первом этапе решаем задачу определения температур и расходов теплоносителей. Движущей силой деаэрации является разность концентраций газа. В качестве вектора пара-

метров на втором этапе решения задачи выберем концентрации газа в паровой фазе и воде: $[X] = \begin{pmatrix} c_{g1} \\ c_{g2} \end{pmatrix}$. Полученная нами матрица процесса деаэрации [2] имеет вид

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix},$$

где

$$b_{11} = \frac{a_{11}}{a_{11} + a_{22}} \left(\frac{a_{22}}{a_{11}} + e^{(a_{11} + a_{22})F} \right);$$

$$b_{12} = -\frac{a_{12}}{(a_{11} + a_{22})} (1 - e^{(a_{11} + a_{22})F});$$

$$b_{21} = -\frac{a_{11}a_{22}}{a_{21}(a_{11} + a_{22})} (1 - e^{(a_{11} + a_{22})F});$$

$$b_{22} = \frac{a_{11}}{a_{11} + a_{22}} \left(1 + \frac{a_{22}}{a_{11}} e^{(a_{11} + a_{22})F} \right);$$

$$a_{11} = -\frac{k_m}{G_1}; \quad a_{12} = \frac{k_m k_g}{G_1}; \quad a_{21} = \frac{k_m}{G_2}; \quad a_{22} = -\frac{k_m k_g}{G_2};$$

k_m – коэффициент массопередачи; k_g – коэффициент, определяющий связь между концентрацией газа в воде и равновесной концентрацией газа в паровой фазе.

Составление материальных балансов по газу приводит систему (3) к виду

$$\begin{pmatrix} -G_{11} & K_{12}B_{2m}G_{22}B_2 & \dots & K_{1n}B_{nm}G_{nn}B_n \\ K_{21}B_{1m}G_{11}B_1 & -G_{22} & \dots & K_{2n}B_{nm}G_{nn}B_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1}B_{1m}G_{11}B_1 & K_{n2}B_{2m}G_{22}B_2 & \dots & -G_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [X_0]_1 \\ [X_0]_2 \\ \vdots \\ [X_0]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[GX_{вх}]_1 \\ -[GX_{вх}]_2 \\ \vdots \\ -[GX_{вх}]_n \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где матрица $B_{im} = \begin{pmatrix} 1 - \Delta x_i & 0 \\ \Delta x_i & 1 \end{pmatrix}$ определяет изменение

концентрации газа за счет смешения конденсата пара с водой; Δx_i – изменение степени сухости пара внутри ступени.

Решение системы (4) позволяет определить концентрации газа внутри установки.

В рамках предложенного алгоритма выполнен пример расчета пятиступенчатого деаэратора струйно-барботажного типа ($G_{10} = 3$ кг/с, $G_{20} = 100$ кг/с, $c_2 = 4$ кДж/кг/К, $k = 5000$ Вт/м²·К, $\tau_0 = 15$ с, $r = 2258$ кДж/кг, $c_{g10} = 0$ мкг/кг, $c_{g20} = 21$ мкг/кг). Вода поступает сверху в первую ступень на перфорированную тарелку и струями стекает последовательно во вторую, третью и четвертую ступени. После четырех ступеней струйной деаэрации вода попадает в пятую ступень – бак накопитель, где деаэрация осуществляется барботированием слоя воды паром. Пар подается в деаэратор тремя потоками: в деаэрационную головку, на вентиляцию бака и барботирование. Двигаясь снизу вверх, пар передает тепло воде, частично конденсирует и поглощает растворенный в воде газ. Барботажная ступень деаэрации считается аналогично струйной с учетом эффективной поверхности теплообмена.

Расчетные результаты по изменению концентрации газа в паровой и водяной фазах внутри деаэратора показали наличие экстремального значения концентрации газа в воде в первой ступени, что свидетельствует о неэффективности ее работы.

Разработанный алгоритм позволяет синтезировать модель системы теплообменников произвольной структуры с различными параметрами процессов и решать задачи структурно-параметрической оптимизации по выбранной целевой функции.

Барочкин Евгений Витальевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электростанций,
телефон (4932) 26-99-13,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Список литературы

1. Обобщенная модель каскадных теплообменных аппаратов с учетом фазовых переходов / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский и др. // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47. – Вып. 3. – С. 67–69.

2. Обобщенный метод расчета многоступенчатых деаэраторов / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский и др. // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47. – Вып. 9. – С. 100–103.