

## РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В СТРУЙНЫХ ДЕАЭРАТОРАХ

ЖУКОВ В.П., д-р техн. наук, БАРОЧКИН Е.В., канд. техн. наук, МАГДИЕВ Е.В., асп., НАЗАРОВ В.Е., инж.

На основе теории цепей Маркова построена модель переходных процессов в струйном деаэраторе, проведен расчетный анализ переходных процессов для различных профилей вероятностей переходов теплоносителей из ячейки в ячейку, приведены результаты численных экспериментов.

*Ключевые слова:* деаэратор, теплообмен, переходный процесс, ячейечная модель.

## COMPUTATIONAL ANALYSIS OF TRANSIENT HEAT EXCHANGE PROCESSES IN JET DEAERATORS

V.P. ZHUKOV, Doctor of Engineering, E.V. BAROCHKIN, Candidate of Engineering, E.V. MAGDIEV, Post-Graduate Student, V.E. NAZAROV, Engineer

A model of transient processes in a jet deaerator based on the theory of Markov chains is proposed, computational analysis of the transient processes for different profiles of transition probabilities for heat carriers is done, the results of numerical experiments are presented.

*Key words:* deaerator, heat exchange, transient process, cell model.

В смешивающих подогревателях-деаэраторах наряду с нагревом воды осуществляется удаление из нее растворенных газов [1–2], вызывающих активную коррозию технологического оборудования. Ранее нами предложена модель стационарного процесса деаэрации [3]. На основе теории цепей Маркова предлагается математическая модель переходных процессов теплообмена в деаэраторах.

При построении модели рабочий объем разбивается на ячейки. Основу модели составляет матрица переходных вероятностей, которая описывает изменение состояния системы за один временной шаг. Состояние системы описывается двумя векторами состояния. Вектор состояния  $\mathbf{S}$  характеризует массу и тепловую энергию в паровой и водяной фазах каждой ячейки:

$$\mathbf{S} = [S_{11} \ S_{21} \ S_{31} \ S_{41} \ \dots \ S_{3m} \ S_{4m}]^T,$$

где  $S_{ij}$  – параметр теплоносителя в ячейке, индекс  $i = 1$  соответствует массе горячего,  $i = 2$  – массе холодного,  $i = 3$  – энергии горячего,  $i = 4$  – энергии холодного теплоносителя, индекс  $j = 1, 2, \dots, n$  показывает номер ячейки.

Вектор состояния  $\mathbf{S}_g$  описывает содержание газа в паровой и водяной фазе ячейки:

$$\mathbf{S}_g = [S_{g11} \ S_{g21} \ \dots \ S_{g1m} \ S_{g2m}]^T,$$

где  $S_{gij}$  – масса газа в ячейке, индекс  $i = 1, 2$  характеризует соответственно горячий и холодный теплоноситель, индекс  $j = 1, 2, \dots, n$  показывает номер ячейки.

На каждом временном шаге  $k$  моделирование процесса осуществляется в два этапа. На первом этапе описывается преобразование по времени вектора состояния  $\mathbf{S}$ :

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P} * \mathbf{S}^k + \mathbf{Q} + \mathbf{C},$$

где

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{a1} & Z & \dots & Z & Z \\ P_t & P_{a2} & \dots & Z & Z \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z & Z & \dots & P_{am-1} & Z \\ Z & Z & \dots & P_t & P_{am} \end{bmatrix},$$

$$P_t = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_2 \end{bmatrix},$$

$$P_{ai} = \begin{bmatrix} 1-p_1 & 0 & 0 & A_1/S_{2i} \\ 0 & 1-p_2 & 0 & -A_1/S_{2i} \\ 0 & 0 & 1-p_1 & A_1/S_{2i} + A_1 c_{t_n}/S_{2i} r \\ 0 & 0 & 0 & 1-p_2 - A_1 t_n/S_{2i} \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \frac{k F}{r},$$

$p_1, p_2$  – вероятности перехода в соседнюю ячейку горячего и холодного теплоносителя соответственно;  $k$  – коэффициент теплопередачи;  $F$  – площадь поверхности обмена;  $r$  – удельная теплота парообразования; вектор питания системы  $\mathbf{Q}$  характеризует внешние массо- и энергопотоки теплоносителей, которые могут подаваться в любые ячейки;  $\mathbf{Z}$  – нулевая матрица; матрица свободных членов  $\mathbf{C}$  размера  $4n \times 1$  включает для каждой ячейки следующие четыре элемента:

$$C = \left[ \dots -A_1 t_H \quad A_1 t_H \quad -A_1 t_H - \frac{A_1 t_H^2}{r} \quad \frac{A_1 t_H r}{c} + A_1 t_H^2 \quad \dots \right]^T,$$

где  $t$  – температура теплоносителя; индекс  $T$  соответствует транспонированию матрицы; индекс  $n$  – состоянию насыщения.

Найденные распределения массы и энергии теплоносителей по ячейкам позволяют перейти ко второму этапу решения задачи – расчету деаэрации:

$$S_g^{k+1} = P_g * S_g^k + Q_g,$$

где

$$P_g = \begin{bmatrix} P_{g1} & Z & \dots & Z & Z \\ P_t & P_{g2} & \dots & Z & Z \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z & Z & \dots & P_{gm-1} & Z \\ Z & Z & \dots & P_t & P_{gm} \end{bmatrix}, \quad P_t = \begin{bmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{bmatrix},$$

$$P_{gi} = \begin{bmatrix} 1 - p_1 - \frac{A_2}{S_{1i}} & \frac{A_3}{S_{2i}} \\ \frac{A_2}{S_{1i}} & 1 - p_2 - \frac{A_3}{S_{2i}} \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} A_2 = k_m F, \\ A_3 = k_g A_2, \end{matrix}$$

$Q_g$  – вектор питания;  $k_m$  – коэффициент массо-передачи;  $k_g$  – коэффициент, определяющий связь между концентрацией газа в воде и равновесной концентрацией газа в паровой фазе [3].

Вероятности переходов теплоносителей в соседние ячейки  $p_1$  и  $p_2$  обуславливаются многими факторами: профилированием проходного канала для воды и пара; скоростями движения теплоносителей; процессами тепло- и массопереноса.

Профили изменения вероятностей по ячейкам считаются известными, но разными. Задачей исследования является определение влияния профиля вероятности на переходный процесс.

На рис. 1 приведены исследуемые сочетания зависимостей вероятностей переходов от номера ячейки для холодного и горячего теплоносителей соответственно: а) равномерная – равномерная; б) равномерная – линейная; в) линейная – равномерная; г) линейная – линейная; д) параболическая – равномерная; е) равномерная – параболическая; ж) параболическая – параболическая.

Для каждого из приведенных на рис. 1 профилей вероятности по выбранному возмущению рассчитаны переходные процессы и построены зависимости температуры холодного теплоносителя и концентрации газа в холодном теплоносителе от номера шага по времени. Результаты расчетного анализа представлены на рис. 2.

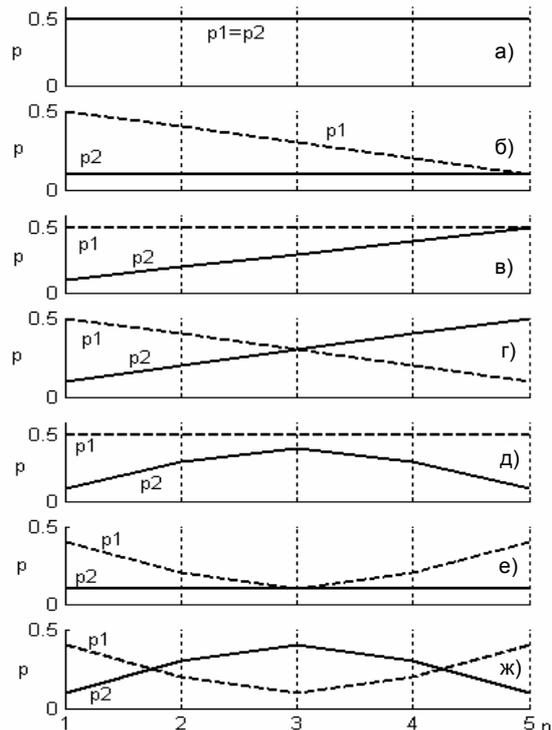


Рис. 1. Зависимости вероятностей переходов от номера ячейки: - - - - для горячего теплоносителя; — — — для холодного теплоносителя

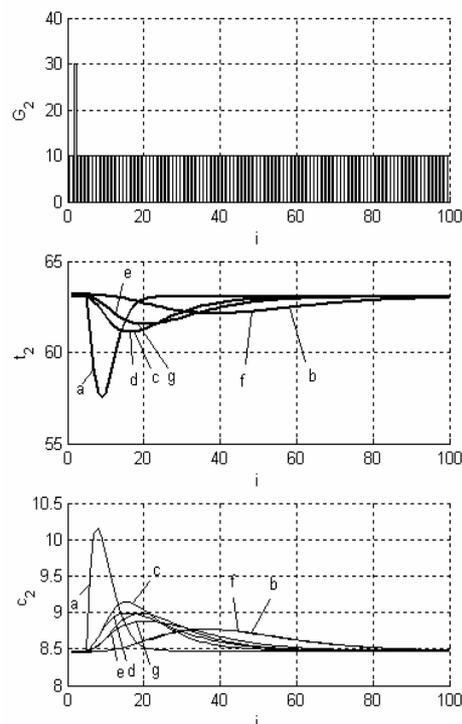


Рис. 2. Изменение температуры ( $t_2$ ) и содержания газа ( $c_2$ ) в холодном теплоносителе на выходе из деаэратора при скачкообразном увеличении его расхода на входе ( $G_2$ ) с 10 до 30 кг/с (буквенное обозначение линии соответствует профилю вероятностей переходов рис. 1)

Анализ полученных результатов показывает, что при равномерной зависимости вероятности (кривая а) значение параметров вос-

становливается наиболее быстро. Для профиля вероятности, изображенного на рис. 1,б, восстановление параметров после снятия возмущения происходит наиболее медленно. Следует отметить, что максимальное отклонение параметров в первом случае (кривая а) существенно выше. Наилучшая организация переходного процесса при этом должна определяться технологическими условиями.

Предложенный подход может быть использован при проектировании проточных каналов теплоносителей в деаэрационных установках или при построении систем автоматического регулирования. Выбор профиля проточной части аппарата по найденному профи-

лю распределения вероятностей планируется осуществить с использованием предложенной модели в ходе дальнейших исследований.

#### Список литературы

1. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы / Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2003.
2. **Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М.** Теплообменные аппараты ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
3. **Моделирование** теплообмена в струйных деаэраторах со сложной конфигурацией потоков / Е.В. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский и др. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. Вып. 9. – 2004. – Т. 47. – С. 76–79.

Жуков Владимир Павлович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,  
e-mail: zhukov@home.ivanovo.ru

Магдиев Евгений Викторович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры прикладной математики,  
телефон (4932) 26-97-45.

Барочкин Евгений Витальевич,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,  
телефон (4932) 41-60-56.

Назаров Василий Евгеньевич,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
инженер кафедры тепловых электрических станций,  
телефон (4932) 41-60-56.