

# МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 621.165

## МАТРИЧНАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА И АНАЛИЗ МНОГОПОТОЧНЫХ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ СО СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ПОТОКОВ

А.Е. БАРОЧКИН, В.П. ЖУКОВ, К.А. КАСАТКИН  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Ранее нами получено решение задачи матричного описания многоступенчатых двухпоточных систем теплообменных аппаратов, каждая ступень которых представлена в виде четырехполюсника с двумя входными и двумя выходными потоками. Однако на практике в теплообменные аппараты помимо двух основных потоков холодного и горячего теплоносителей часто направляются дополнительные потоки, обусловленные дренажированием, продувкой или аварийными режимами системы. Подача перечисленных потоков теплоносителей может производиться в разные точки теплообменного аппарата, что обуславливает разную эффективность анализируемых процессов. В настоящее время существуют модели для расчета двухпоточных и многоступенчатых или многопоточных и одноступенчатых систем теплообменных аппаратов, а модели для расчета многоступенчатых многопоточных систем теплообменных аппаратов отсутствуют. Разработка методов расчета многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов для проведения анализа их тепловой эффективности является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой и смежными отраслями промышленности.

**Материалы и методы.** Для исследования многопоточных тепломассообменных систем и подсистем тепловых электрических станций используются уравнения балансов массы и энергии, для решения которых применяются методы высшей математики и математического программирования.

**Результаты.** В рамках матричного подхода разработана модель многопоточных многоступенчатых теплообменных систем, каждая ступень которых может иметь произвольное число входных и выходных потоков. Порядок использования и возможности матричного подхода продемонстрированы на примере четырехступенчатой трехпоточной системы теплообменных аппаратов. Получены и проанализированы решения уравнений модели, показана достоверность и обоснованность предложенного подхода.

**Выводы.** Полученные результаты могут быть использованы для повышения степени обоснованности расчета систем многопоточных тепломассообменных аппаратов, создания компьютерных тренажеров и программных средств оптимизации режимов технологических систем и подсистем ТЭС.

**Ключевые слова:** матричная формализация, тепломассообменные системы, четырехполюсники, шестиполюсники, многополюсники, баланс энергии, баланс массы, многопоточные системы, многоступенчатые системы

## MATRIX FORMALIZATION OF CALCULATION AND ANALYSIS OF MULTI-FLOW MULTISTAGE HEAT EXCHANGERS WITH A COMPLEX FLOW CONFIGURATION

A.E. BAROCHKIN, V.P. ZHUKOV, K.A. KASATKIN  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

### Abstract

**Background.** We have earlier obtained a solution to the problem of matrix description of multistage two-flow systems of heat exchangers, in which each stage is represented as a quadrupole with two input and two output streams. However, in practice, in addition to the two main streams of cold and hot coolants, additional streams are often sent to heat exchangers, due to the drainage, purging or emergency operation of the system. The mentioned coolant flows can be supplied to different points of the

heat exchanger, which leads to different efficiency of the analyzed processes. There are currently models for calculating two-flow and multi-stage or multi-flow and single-stage systems of heat exchangers but there are none for calculating multistage multi-flow heat exchanger systems. Development of methods for calculating multi-flow multi-stage heat exchangers for analyzing their thermal efficiency is an urgent problem faced by the energy sector and related industries.

**Materials and methods.** For the study of multi-flow heat exchanger systems and subsystems of thermal power plants, the equations of mass and energy balances are used, which are solved by the methods of higher mathematics and mathematical programming.

**Results.** Within the framework of the matrix approach, we have developed a model of multi-flow multi-stage heat exchange systems, in which each stage can have an arbitrary number of input and output streams. The order of using and possibilities of the matrix approach are demonstrated on a four-stage three-flow system of heat exchangers as an example. Solutions to the model equations are obtained and analyzed, and the reliability and validity of the proposed approach are shown.

**Conclusions.** The obtained results can be used to increase the validity degree of calculating systems of multi-stream heat and mass transfer devices, creating computer simulators and software tools for optimizing the modes of technological systems and subsystems of TPPs.

**Key words:** matrix formalization, heat and mass transfer systems, quadrupoles, six-poles, multipoles, energy balance, mass balance, multi-flow systems, multi-stage systems

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.1.070-076

**Введение.** Ранее нами [1–3] получено решение задачи матричного описания систем, каждая подсистема которых состоит из двухпоточных теплообменных аппаратов, представленных в виде четырехполюсников. Однако на практике число потоков на входе или выходе аппарата может быть больше двух. Такие теплообменные аппараты будем называть многопоточными [4]. На тепловых станциях такая структура потоков может быть обусловлена подачей некоторых дополнительных потоков (дренажей или продувок других теплообменников) помимо двух основных потоков холодного и горячего теплоносителей, сбросами теплоносителей при аварийных режимах работы оборудования. Подача перечисленных потоков может производиться в разные точки теплообменного аппарата, что обуславливает разную эффективность исследуемых процессов. Следует отметить, что нами ранее была предложена модель для описания отдельной многопоточной ступени в виде системы дифференциальных уравнений [4], которая, однако, не позволяет рассчитать многоступенчатые системы с произвольной структурой потоков. Разработка в рамках единой методологии матричного описания многопоточных многоступенчатых систем теплообменных аппаратов, которое позволяет анализировать энергетическую и технологическую эффективность оборудования ТЭС, является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой.

Объектом представленного исследования является система многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов. В качестве предмета исследования рассматривается матричная формализация расчета многопоточных многоступенчатых теплообменных систем со сложной структурой потоков. Целью исследования является повышение эффективности функционирования системы многопоточных теплообменных аппаратов со сложной структурой

потоков на основе ее расчетного анализа с использованием матричных моделей.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка матричного описания системы многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов, каждый из которых в общем случае имеет произвольное число входных и выходных потоков;

- демонстрация возможностей предложенного математического описания на примере расчета четырехступенчатой трехпоточной системы теплообменных аппаратов.

**Методы исследования.** Для исследования многопоточных теплообменных систем применяются уравнения балансов массы и энергии, для решения полученных уравнений используются методы высшей математики и математического программирования [5–7].

Для разработки математического описания многопоточных многоступенчатых систем предлагается расчетная схема объекта исследования, представленная на рис. 1.

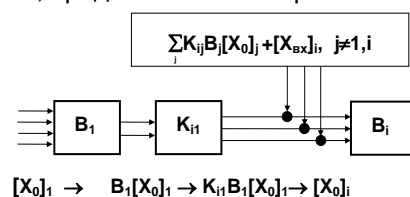


Рис. 1. Расчетная схема формирования параметров потока на входе в  $i$ -й элемент многопоточной многоступенчатой теплообменной установки

На схеме показана наиболее общая структура соединения  $n$  ступеней системы, при которой возможна коммутация любых выходных и входных потоков при произвольном их числе для каждой ступени. На рис. 1 схематично показано формирование потока на входе в  $i$ -й элемент (ступень) установки, более подробно представлена связь между пер-

вой и  $i$ -й ступенью. Так, на вход в первый элемент подаются потоки теплоносителей, которые характеризуются набором аддитивных признаков  $[X_0]_1$ , в качестве которых рассматриваются потоки массы или энергии. Индекс «0» внутри квадратных скобок указывает на входные параметры, индекс «1» за квадратными скобками относится к номеру ступени. Процесс теплообмена, массообмена или их совместное протекание описывается матрицей процесса  $\mathbf{B}$ , которая при линейной постановке задачи позволяет определить выходные параметры ступени в виде  $[X]_1 = \mathbf{B}_1[X_0]_1$ . Вид матрицы  $\mathbf{B}$  для описания процессов в ступени при различном числе входных и выходных потоков подробно комментируется ниже. Для указания направления движения потоков после ступени формируется матрица коммутации  $\mathbf{K}_{i1}$ , элементы которой показывают доли потоков теплоносителей, подаваемых из первой ступени в  $i$ -ю. При этом матричное произведение  $\mathbf{K}_{i1}\mathbf{B}_1[X_0]_1$  определяет параметры потоков, подаваемых из первого элемента в  $i$ -й. Очевидно, что на вход в  $i$ -ю ступень могут подаваться потоки не только из первой ступени, но и с остальных ступеней системы и внешние для системы потоки. Перечисленные потоки условно показаны в верхней части расчетной схемы на рис. 1. Входной вектор признаков для  $i$ -го элемента определится суммой значений аддитивных параметров смешиваемых на его входе потоков в узлах смешения, отмеченных на рисунке точками:

$$[X_0]_i = K_{i1}B_1[X_0]_1 + K_{i2}B_2[X_0]_2 + \dots + K_{in}B_n[X_0]_n + [X_{вх}]_i, \quad (1)$$

где индекс «вх» указывает на внешний поток, подаваемый на вход ступени.

Уравнения, аналогичные (1), записываются для каждой из  $n$  ступеней установки. Полученная при этом система уравнений после преобразований представляется в матричном виде:

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

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

При известных матрицах  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{K}$  решение системы (2) позволяет определить значения

параметров теплоносителей в любой точке системы.

Структура потоков в многоступенчатой установке задается матрицей коммутации  $\mathbf{K}_{ij} = \{\alpha_{ij}\}$ , размер которой определяется числом входных и выходных потоков ступеней. Матрица коммутации для четырехполюсника с двумя входными и двумя выходными потоками состоит из четырех элементов, каждый из которых показывает долю потока из  $j$ -го в  $i$ -й элемент:

$$\mathbf{K}_{ij} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{21} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{pmatrix}, \text{ где поток } \alpha_{11} \text{ – горячего теплоносителя в горячий; } \alpha_{12} \text{ – холодного в горячий; } \alpha_{21} \text{ – горячего в холодный; } \alpha_{22} \text{ – холодного в холодный.}$$

Наиболее простой и практически значимый вид матрицы коммутации представлен в табл. 1.

Дробные значения элементов матрицы  $\mathbf{K}_{ij}$  в диапазоне от 0 до 1 соответствуют делению потока и подаче его части на вход в  $i$ -ю ступень.

Матрица коммутации для шестиполюсника с тремя входными и тремя выходными потоками состоит из девяти элементов, каждый из которых показывает долю потока из  $j$ -го в  $i$ -й элемент для трех потоков теплоносителей: горячего, промежуточного и холодного, которые будем также называть первым, вторым и третьим теплоносителем. Примеры матриц коммутации для трехпоточных аппаратов с тремя входными и тремя выходными потоками приведены в табл. 2.

Вид матрицы процесса  $\mathbf{B}$  для описания теплообмена в двухпоточной ступени как с учетом, так и без учета фазового перехода в теплоносителях подробно рассматривается в [1]. Для известных температур теплоносителей на входе в ступень матрица  $\mathbf{B}$  позволяет определить температуры теплоносителей на выходе согласно выражению

$$\mathbf{T} = \mathbf{B} \times \mathbf{T}_0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{T}$  – матрица искомых температур;  $\mathbf{T}_0$  – матрица исходных температур;  $\mathbf{B} = \{b_{ij}\}$  – матрица процесса. Вид матрицы  $\mathbf{B}$  для двухпоточной ступени размера  $2 \times 2$  элемента для случая теплообмена без фазового перехода в теплоносителях представлен в табл. 3 [1].

Таблица 1. Примеры вида матрицы коммутации для ступеней двухпоточного теплообменника

Вид матрицы коммутации $\mathbf{K}_{ij}$ при подаче из $j$ -го в $i$ -й элемент			
только горячего теплоносителя	только холодного теплоносителя	горячего и холодного теплоносителей	теплоносители не подаются
$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

Таблица 2. Примеры вида матрицы коммутации для ступеней трехпоточного теплообменника

Вид матрицы коммутации $K_{ij}$ при подаче из $j$ -го в $i$ -й элемент			
только первого теплоносителя	первого и третьего теплоносителей	трех теплоносителей	теплоносители не подаются
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Таблица 3. Коэффициенты матрицы  $\mathbf{B}$  [1] для ступени двухпоточного теплообменника (расшифровка обозначений  $a_1, a_2, F$  приводится в пояснениях к формуле (4))

$\mathbf{B} = \{b_{ij}\}, i, j=1, 2,$
$b_{11} = (s_1 + s_2)/s_3; b_{12} = (1 - s_2)/s_3;$
$b_{21} = s_1(1 - s_2)/s_3; b_{22} = (1 + s_1 s_2)/s_3;$
$s_1 = \frac{a_2}{a_1}; s_2 = e^{-(a_1 + a_2)F}; s_3 = \frac{a_2}{a_1} + 1.$

Порядок определения вида матрицы  $\mathbf{B}$  для случая трехпоточного теплообмена без фазового перехода в теплоносителях рассмотрим более подробно. Описание теплообмена для случая проточного движения трех теплоносителей в ступени было получено нами ранее [1, 4] в виде системы трех дифференциальных уравнений относительно температур трех теплоносителей вдоль поверхности теплообмена  $F$ :

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = -a_1 t_1 + a_1 t_2, \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2 t_1 - (a_2 + a_3) t_2 + a_3 t_3, \\ \frac{dt_3}{dF} = a_4 t_2 - a_4 t_3, \end{cases} \quad (4)$$

где  $t_1, t_2, t_3$  – искомые температуры трех теплоносителей;

$$a_1 = \frac{k_{12}}{c_1 G_1}, \quad a_2 = \frac{k_{12}}{c_2 G_2}, \quad a_3 = \frac{k_{23}}{c_2 G_2}, \quad a_4 = \frac{k_{23}}{c_3 G_3};$$

$c$  – удельная теплоемкость;  $k$  – коэффициент теплопередачи;  $G$  – расход теплоносителя; одинарный индекс показывает номер теплоносителя, двойной индекс коэффициента теплопередачи соответствует номерам теплоносителей, между которыми происходит теплопередача.

Аналитическое решение системы уравнений (4), полученное методом пробных функций [5], после преобразований записывается в матричном виде (3). Выражения для найденных в ходе решения коэффициентов матрицы  $\mathbf{B} = \{b_{ij}\}$  теплообменника с тремя входными и тремя выходными потоками приводятся в табл. 4.

Таблица 4. Коэффициенты матрицы  $\mathbf{B}$  для ступени трехпоточного теплообменника с тремя входными и тремя выходными потоками

$\mathbf{B} = \{b_{ij}\}, i, j=1, 2, 3$
$b_{11} = 1 - s_6 + s_7 s_8 + (1 - s_7 + s_7 s_2) s_6 e^{r_2 F} + s_7 e^{r_3 F};$
$b_{12} = s_6 + s_9 s_8 - s_6 e^{r_2 F} - s_9 s_8 e^{r_2 F} + s_9 e^{r_3 F};$
$b_{13} = s_{12} - s_{11} e^{r_2 F} + s_{10} e^{r_3 F};$
$b_{21} = 1 - s_6 + s_7 s_8 + s_6 s_1 e^{r_2 F} - s_7 s_{13} s_1 e^{r_2 F} + s_7 s_2 e^{r_3 F};$
$b_{22} = s_6 + s_9 s_8 - s_1 s_6 e^{r_2 F} + s_9 s_{13} s_1 e^{r_2 F} + s_9 s_2 e^{r_3 F};$
$b_{23} = s_{12} - s_{11} s_1 e^{r_2 F} + s_{10} s_2 e^{r_3 F};$
$b_{31} = 1 - s_6 + s_7 s_8 + s_3 s_6 e^{r_2 F} - s_7 s_{13} s_3 e^{r_2 F} + s_7 s_4 e^{r_3 F};$
$b_{32} = s_6 + s_9 s_8 - s_3 s_6 e^{r_2 F} - s_9 s_{13} s_3 e^{r_2 F} + s_9 s_4 e^{r_3 F};$
$b_{33} = s_{12} - s_{11} s_3 e^{r_2 F} + s_{10} s_4 e^{r_3 F};$
$r_1 = 0; r_2 = (-\alpha + (\alpha^2 - 4\beta)^{0.5})/2; r_3 = (-\alpha - (\alpha^2 - 4\beta)^{0.5})/2;$
$\alpha = a_1 + a_2 + a_3 + a_4; \beta = a_1 a_3 + a_4 a_1 + a_4 a_2;$
$a_1 = k_{12}/(c_1 G_1); a_2 = k_{12}/(c_2 G_2);$
$a_3 = k_{23}/(c_2 G_2); a_4 = k_{23}/(c_3 G_3);$
$s_1 = (a_1 + r_2)/a_1; s_2 = (a_1 + r_3)/a_1;$
$s_3 = (r_2^2 + r_2(a_1 + a_2 + a_3) + a_1 a_3)/(a_1 a_3);$
$s_4 = (r_3^2 + r_3(a_1 + a_2 + a_3) + a_1 a_3)/(a_1 a_3);$
$s = (1 - s_2)(1 - s_3) - (1 - s_4)(1 - s_1);$
$s_6 = 1/(1 - s_1); s_7 = (s_1 - s_3)/s; s_8 = (s_1 - s_2)/(1 - s_1);$
$s_9 = (s_3 - 1)/s; s_{10} = (1 - s_1)/s; s_{11} = (1 - s_2)/s;$
$s_{12} = (s_1 - s_2)/s; s_{13} = (1 - s_2)/(1 - s_1).$

Система (2) для целого ряда практически важных случаев является системой линейных уравнений. Рассмотрим более подробно порядок составления системы уравнений (2) и ее решение на примере двух систем трехпоточных четырехступенчатых аппаратов, структурные схемы которых представлены на рис. 3.

На рис. 3,а приводится схема многоступенчатой установки из четырех реальных и одной мнимой ступени, которая показана на рисунке штриховой линией. Следует отметить, что пятая мнимая ступень включена в схему для удобного представления результатов расчета. Решение системы (2) позволяет опреде-

лить значение параметров на входе ступени. При введении пятой ступени значение параметра на входе в эту ступень соответствует выходному значению параметра из рассматриваемой системы. Движение всех трех теплоносителей на этой схеме организовано по прямой схеме, при которой все три теплоносителя двигаются в одном направлении. На схеме рис. 3,б показана более сложная структура потоков теплоносителей, в которой третий теплоноситель подается сначала в четвертую ступень, потом в третью, вторую и в первую. Такая структура схемы движения соответствует противоточному движению третьего теплоносителя относительно первых двух.

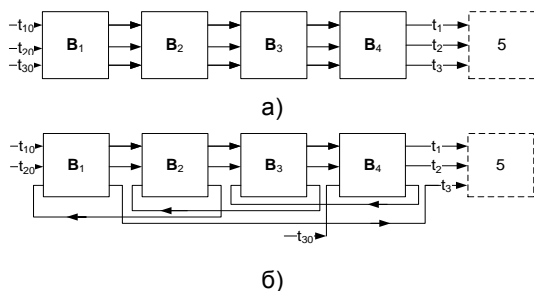


Рис. 3. Исследуемые структуры потоков для трехпоточной четырехступенчатой схемы

Систему уравнений (2), которая получена для определения аддитивных параметров, предлагается использовать для определения температуры теплоносителя с учетом рекомендаций [1, 2]. Для описания структуры пятиступенчатой трехпоточной системы, схемы которой представлены на рис. 3, составляются матрицы коммутации размера 5×5 блоков или 15×15 элементов. С учетом того, что для схемы рис. 3,а все потоки теплоносителей из первой ступени подаются во вторую, из второй в третью, из третьей в четвертую, а из четвертой в пятую ступень, только четыре блока матрицы коммутации имеют ненулевые элементы:

$$K_{11}=K_{12}=K_{13}=K_{14}=K_{15}=K_{22}=K_{23}=K_{24}=K_{25}=K_{31}=K_{33}=K_{34}=K_{35}=K_{41}=K_{42}=K_{44}=K_{45}=K_{51}=K_{52}=K_{53}=K_{55}=N; K_{21}=K_{32}=K_{43}=K_{54}=I.$$

Аналогичные блоки матрицы коммутации, описывающие более сложную структуру потоков теплоносителей согласно схеме рис. 3,б, имеют уже девять ненулевых блоков:

$$K_{11}=K_{13}=K_{14}=K_{15}=K_{22}=K_{24}=K_{25}=K_{31}=K_{33}=K_{35}=K_{41}=K_{42}=K_{44}=K_{45}=K_{52}=K_{53}=K_{55}=N; K_{12}=K_{23}=K_{23}=K_{34}=K_{51}=X; K_{21}=K_{32}=K_{43}=K_{54}=G,$$

где

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; N = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица процесса **B** для обеих схем определяется в соответствии с приведенными в табл. 4 формулами. Значения коэффициентов матрицы принимаются одинаковыми для всех ступеней системы.

При проведении численного расчета были использованы следующие исходные данные:  $t_{10} = 67,62\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{20} = 67,62\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{30} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $G_1 = 20,55\text{ кг/с}$ ,  $G_2 = 657,22\text{ кг/с}$ ,  $G_3 = 2143,33\text{ кг/с}$ , где индекс «0» показывает значение температуры на входе в систему. В ходе расчетных исследований определяли зависимости температуры теплоносителей на выходе из системы от площади поверхности теплообмена в одной ступени.

Для проведения расчетных исследований согласно модели (1)–(4) разработаны алгоритм и компьютерная программа для его реализации в среде MATLAB.

**Результаты.** Результаты расчетного анализа, проведенного в рамках предложенной модели (1)–(4), представлены на рис. 4 в виде зависимости температуры теплоносителя на выходе из системы от площади поверхности теплообмена в ступени.

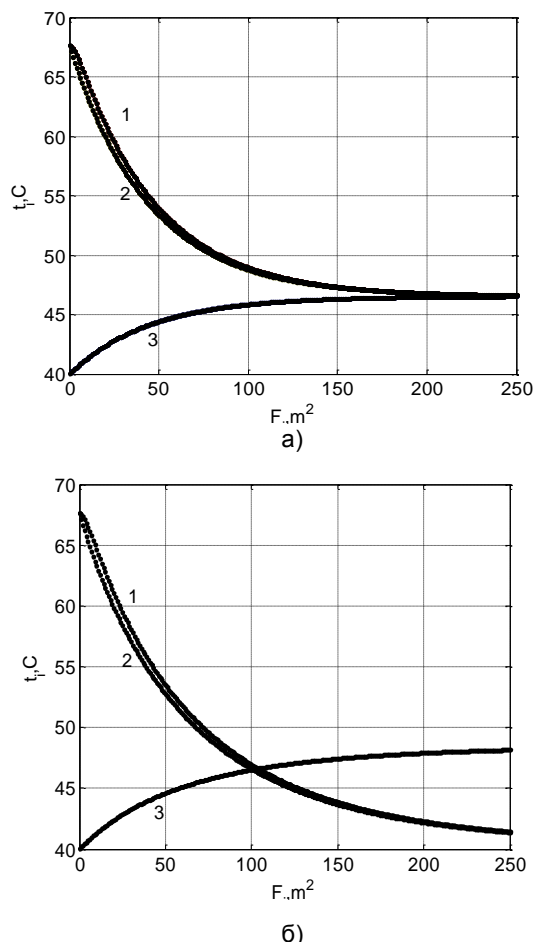


Рис. 4. Зависимости температуры теплоносителей от площади поверхности теплообмена ступени для структур потоков, приведенных на рис. 3,а (а) и рис. 3,б (б) (цифры рядом температурными зависимостями соответствуют номеру теплоносителя)

Анализ приведенных данных показывает, что полученные результаты, представленные на рис. 4,а, достоверно описывают поведение температурных зависимостей для проточных теплообменных аппаратов [8]. Аналогичные зависимости для более сложного движения потоков, структура которого приближается к противоточной схеме движения теплоносителей, представлены на рис. 4,б. Характер поведения приведенных температурных зависимостей также подтверждается опубликованными данными для противоточных и комбинированных схем движения теплоносителей [8].

Выполненный расчетный анализ показал, что найденное решение системы (2) позволяет исследовать теплообменные процессы в многопоточных многоступенчатых установках. Предложенный подход с учетом фазового перехода в теплоносителях может быть использован для решения задачи конденсации водяных паров из дымовых газов ТЭС и для анализа других многопоточных систем в технологии производства электроэнергии [11–13].

Важно отметить, что представленный метод расчета, полученный с рядом допущений, может быть существенно детализирован через введение в модель (2) более точных подмоделей для расчета фазовых переходов как в одном, так и в нескольких теплоносителях [14–19].

**Выводы.** Предложенная методология матричной формализации позволяет в рамках единого подхода проводить расчетный анализ многопоточных многоступенчатых систем и подсистем ТЭС в целях определения условий их эффективного функционирования, разработки компьютерных тренажеров и программных средств оптимизации режимов оборудования ТЭС. На основе анализа полученных результатов расчета могут быть разработаны системы диагностики технического состояния энергетического оборудования.

#### Список литературы

1. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
2. Барочкин А.Е., Жуков В.П., Беляков А.Н. Исследование процесса теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, вып. 11. – С. 116–119.
3. Моделирование тепломассопередачи в многофазной среде конденсатора турбины / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, А.Н. Беляков, Г.В. Ледуховский // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1. – С. 52–56.
4. Барочкин А.Е., Жуков В.П. Моделирование и расчет многопоточных теплообменных аппаратов // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 3. – С. 70–75.

5. Власов В.Г. Конспект лекций по высшей математике. – М.: Айрис, 1996. – 287 с.

6. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Физматлит, 2004. – 264 с.

7. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 208 с.

8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.

9. Исследование технологических процессов атмосферной деаэрации воды / Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, С.Д. Горшенин, А.А. Коротков. – Иваново, 2016. – 420 с.

10. Шарпов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 560 с.

11. Разработка компьютерной модели и расчет оптимальных режимов работы циркуляционной системы ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго» / Н.А. Зройчиков, В.А. Кудинов, А.Г. Коваленко и др. // Теплоэнергетика. – 2007. – № 11. – С. 14–21.

12. Компьютерные модели тепловых сетей и циркуляционных систем / В.В. Дикоп, В.А. Кудинов, А.Г. Коваленко и др. // Теплоэнергетика. – 2006. – № 8. – С. 66–68.

13. Щинников П.А., Ноздренко Г.В., Томилов В.Г. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 528 с.

14. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново, 2015. – 468 с.

15. Hesselgreaves J.E. Compact Heat Exchangers. – Elsevier, 2016. – 484 p.

16. Аронсон К.Э., Блинков С.Н., Брезгин В.И. Теплообменники энергетических установок. – Екатеринбург: Сократ, 2003. – 968 с.

17. Xie G.N., Sunden B., Wang Q.W. Optimization of compact heat exchangers by a genetic algorithm // Applied Thermal Engineering. – 2008. – № 28. – S. 895–906.

18. Sunden B. Introduction Heat Transfer. – WITpress, 2012. – 366 p.

19. Amano R.S., Sundén B. Impingement Jet Cooling in Gas Turbines. – WITpress, 2014. – 252 p.

#### References

1. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennykh ustanovok* [System analysis of power heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.
2. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Belyakov, A.N. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, vol. 54, issue 11, pp. 116–119.
3. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Belyakov, A.N., Ledukhovskiy, G.V. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 1, pp. 52–56.
4. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 70–75.
5. Vlasov, V.G. *Konspekt lektsiy po vysshey matematike* [Synopsis of lectures on higher mathematics]. Moscow: Ayris, 1996. 287 p.
6. Karmanov, V.G. *Matematicheskoe programmirovaniye* [Mathematical Programming]. Moscow: Fizmatlit, 2004. 264 p.
7. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: tasks, principles, methodology].

objectives, principles, methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 208 p.

8. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 416 p.

9. Ledukhovskiy, G.V., Vinogradov, V.N., Gorshenin, S.D., Korotkov, A.A. *Issledovanie tekhnologicheskikh protsessov atmosfery deaeratsii vody* [A study of technological processes of atmospheric water deaeration]. Ivanovo, 2016. 420 p.

10. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ul'yanovsk: UIGTU, 2003. 560 p.

11. Zroychikov, N.A., Kudinov, V.A., Kovalenko, A.G. *Teploenergetika*, 2007, no. 11, pp. 14–21.

12. Dikop, V.V., Kudinov, V.A., Kovalenko, A.G. *Teploenergetika*, 2006, no. 8, pp. 66–68.

13. Shchinnikov, P.A., Nozdrenko, G.V., Tomilov, V.G. *Kompleksnye issledovaniya TES s novymi tekhnologiyami* [Comprehensive research into TPPs with new technologies]. Novosibirsk: NGTU, 2004. 528 p.

14. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Raschet i normirovanie pokazateley teplovy ekonomichnosti oborudovaniya TES* [Calculation and normalization of indicators of thermal efficiency of the TPP equipment]. Ivanovo, 2015. 468 p.

15. Hesselgreaves, J.E. *Compact Heat Exchangers*. Elsevier, 2016. 484 p.

16. Aronson, K.E., Blinkov, S.N., Brezgin, V.I. *Teploobmenniki energeticheskikh ustanovok* [Heat exchangers of power plants]. Ekaterinburg: Sokrat, 2003. 968 p.

17. Xie, G.N., Sunden, B., Wang, Q.W. Optimization of compact heat exchangers by a genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 2008, no. 28, pp. 895–906.

18. Sunden, B. *Introduction Heat Transfer*. WITpress, 2012. 366 p.

19. Amano, R.S., Sundén, B. *Impingement Jet Cooling in Gas Turbines*. WITpress, 2014. 252 p.

*Барочкин Алексей Евгеньевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru

*Barochkin Aleksei Yevgenyevich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department, address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building «V» (B), Room 408, tel.: (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru

*Жуков Владимир Павлович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

*Zhukov Vladimir Pavlovich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor, Head of the Applied Mathematics Department, address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building A, Room 202, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

*Касаткин Кирилл Андреевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, e-mail: vip\_kirill16@mail.ru

*Kasatkin Kirill Andreyevich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Master Course student, address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, e-mail: vip\_kirill16@mail.ru

---

## ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

### Выпуск 1

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ N 77-13527 от 20.09.02 г.

Подписано в печать 15.02.2019. Выход в свет 28.02.2019. Формат 60x84 1/8.

Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 9,62. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Ивановский государственный энергетический университет, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.  
Типография ООО «ПресСто», 153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, оф. 307.