

Int. J. Heat Mass Transf. – 2011. – Vol. 54. – P. 4702–4709.

7. **Huang L.J., Ayyaswamy P.S., Cohen I.M.** Melting and solidification of thin wires: class of phase-change problems with a mobile interface – I. Analysis // Int. J. Heat Mass Transf. – 1995. – Vol. 38. – P. 1637–1645.

8. **Cohen I.M., Huang L.J., Ayyaswamy P.S.** Melting and solidification of thin wires: class of phase-change problems with a mobile interface – II. Experimental confirmation // Int. J. Heat Mass Transf. – 1995. – Vol. 38. – P. 1647–1659.

9. **Jingtang Ma, Yingjun Jiang.** Moving mesh methods for blowup in reaction–diffusion

equations with traveling heat source // J. Comput. Phys. – 2009. – Vol. 228. – P. 6977–6990.

10. **Moallemi M.K., Viskn R.** Analysis of melting around a moving heat source // Int. J. Heat Mass Trans. – 1996. – Vol. 29. – P. 1271–1282.

11. **Mizonov V., Yelin N.** Numerical study of melting a rod by a periodically moving local heat source // Int. J. Therm. Sci. – 2015. – Vol. 97. – P. 1–8. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2015.06.005

12. **Mizonov V., Yelin N., Sakharov A.** Theoretical study of the thermal state of building envelop in the neighborhood of embedded item // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 79. – P. 149–152.

Мизонов Вадим Евгеньевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, e-mail: mizonov46@mail.ru

Mizonov Vadim Evgen'evich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering (Postdoctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, e-mail: mizonov46@mail.ru

Митрофанов Андрей Васильевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, e-mail: and2mit@mail.ru

Mitrofanov Andrey Vasil'yevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering (Postdoctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, e-mail: and2mit@mail.ru

Басова Елена Владимировна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры высшей математики, e-mail: nowikowa.elena@mail.ru

Basova Elena Vladimirovna,

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of Higher Mathematics Department, e-mail: nowikowa.elena@mail.ru

Шуина Елена Александровна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, зав. кафедрой высшей математики, e-mail: barantseva77@mail.ru

Shuina Elena Aleksandrovna,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering (Postdoctoral degree), Head of Higher Mathematics Department, e-mail: barantseva77@mail.ru

УДК 621.165

МАТРИЧНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ СИСТЕМ С МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

А.Е. БАРОЧКИН, В.П. ЖУКОВ, М.С. ШУМИЛОВА, Е.В. БАРОЧКИН, А.Н. БЕЛЯКОВ
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 теплообмена в многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратах с однокомпонентными теплоносителями. Однако в энергетической, пищевой и нефтехимической отраслях промышленности часто в теплообменных процессах участвуют теплоносители, состоящие из компонентов, теплофизические свойства которых существенно различают-

ся. Из литературных источников известны подходы, когда для проведения теплотехнических расчетов с такими теплоносителями выполняется усреднение указанных свойств компонентов. Однако в ряде промышленных технологий на основе различия теплофизических свойств, в частности различия температуры кипения компонентов, реализуются процессы по их разделению путем перегонки или ректификации. В этом случае при расчете тепломассообменных процессов для получения чистых компонентов с допустимым содержанием примесей необходимо учитывать именно различия в их теплофизических свойствах. Разработка методов расчета систем многопоточных многоступенчатых теплообменных процессов с многокомпонентными теплоносителями для проведения анализа эффективности их разделения является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой и смежными отраслями промышленности.

Материалы и методы. Для исследования и моделирования тепломассообменных систем используются уравнения балансов массы и энергии и методы линейной алгебры.

Результаты. В рамках матричного подхода для случая использования в качестве теплоносителей смеси компонентов с разной температурой кипения получена модель процесса тепломассообмена, позволяющая оценить степень разделения компонентов и качество готового продукта по содержанию в нем примесей при различных способах организации процесса. Получены и проанализированы решения уравнений модели.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности ресурсо- и энергосберегающих технологий при решении задач по оптимальному распределению температур по ступеням системы за счет рециркуляции выделенных компонентов и для получения чистых компонентов с допустимым содержанием примесей в энергетической, химической и пищевой отраслях промышленности.

Ключевые слова: матричная формализация, тепломассообменные системы, баланс энергии, баланс массы, многокомпонентные смеси, ректификация, многопоточные системы, многоступенчатые системы

THE MATRIX METHOD FOR CALCULATING COMPLEX HEAT AND MASS TRANSFER SYSTEMS WITH MULTICOMPONENT COOLANTS

A.E. BAROCHKIN, V.P. ZHUKOV, M.S. SHUMILOVA, E.V. BAROCHKIN, A.N. BELYAKOV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Abstract

Background. Earlier, we obtained a solution to the heat transfer problem in multi-threaded multi-stage heat-exchanging units with one-component heat carriers. However, in the energy, food, and petrochemical industries, often heat and mass transfer processes involve coolants consisting of components whose heat and physical properties differ significantly. For carrying out heat engineering calculations with such coolants, averaging of the indicated properties of the components is usually performed. However, in a number of industrial technologies based on distinguishing thermo-physical properties, in particular, differences in the boiling temperature of the components, processes for their separation by distillation are used. In this case, when calculating heat and mass transfer processes to obtain pure components with acceptable impurities, it is necessary to take into account the difference in their thermo-physical properties precisely. The development of calculating methods for the systems of multi-threaded multi-stage heat transfer processes with multi-component coolants to analyze the efficiency of their separation is a topical issue facing the energy sector and related industries.

Materials and methods. To study and simulate heat and mass transfer systems, the equations of mass and energy balances and linear algebra methods of are used.

Results. Within the framework of the matrix approach, for the case of using a mixture of components with different boiling points as heat transfer agents, a heat and mass transfer process model has been obtained. The model allows evaluating the degree of separation of components and the quality of the finished product by the content of impurities in it for various methods of organizing the process. The solutions of the model equations have been obtained and analyzed.

Conclusions. The results can be used to increase the efficiency of resource and energy-saving technologies in solving problems of the optimal distribution of temperatures at the system stages due to recirculation of the selected components and to obtain pure components with an acceptable content of impurities in the energy, chemical and food industries.

Key words: matrix formalization, heat and mass transfer systems, energy balance, mass balance, multi-component mixtures, rectification, multithreaded systems, multistage systems

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.1.059-068

Введение. Разработка технологий получения чистых продуктов с нормируемыми концентрациями примесей является актуальной задачей для пищевой, химической и энергетической отраслей промышленности [1–7]. Мероприятия, направленные на совершенствование таких технологий, наиболее эффективно могут быть реализованы на основе простых и адекватных моделей и методов расчета, позволяющих учитывать специфику анализируемых процессов. Ранее нами получено решение задачи теплообмена в многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратах с однокомпонентными теплоносителями [8–9]. Однако в энергетике, в пищевой и нефтехимической отраслях промышленности часто в теплообменных процессах участвуют многокомпонентные теплоносители, теплофизические свойства компонентов которых существенно различаются [5, 7, 10–12]. Для проведения теплотехнических расчетов с такими смесями обычно выполняется усреднение значений теплофизических параметров компонентов. Однако в ряде технологий на основе различий теплофизических свойств, в частности различий температуры кипения компонентов, реализуются процессы по разделению этих компонентов, например при перегонке или ректификации продуктов в пищевой и нефтехимической промышленности. В этом случае именно различия в теплофизических свойствах каждого компонента необходимо учитывать при расчете теплообменных процессов. Разработка методов расчета систем многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов с многокомпонентными теплоносителями для эффективного разделения компонентов является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой и смежными отраслями промышленности.

Объектом исследования являются процессы теплообмена в многопоточных и многоступенчатых системах с участием теплоносителей, состоящих из нескольких компонентов или фракций. В качестве предмета исследования рассматривается матричная формализация расчета многопоточных и многоступенчатых систем, в которых в качестве одного из теплоносителей рассматривается смесь компонентов с разными температурами кипения [2–5, 10–13].

Целью исследования является повышение эффективности теплообмена на основе разработанного математического описания процесса в многопоточной многоступенчатой системе, где один из теплоносителей является смесью компонентов с разными температурами кипения.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка матричного описания процессов теплообмена в системе многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов, один из теплоносителей в которой представлен многокомпонентной смесью;
- демонстрация возможностей предложенного математического описания на примере расчета процесса для многоступенчатой системы, один из теплоносителей которой представлен смесью компонентов с разными температурами кипения.

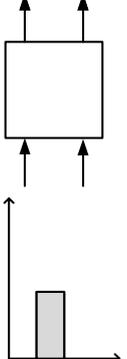
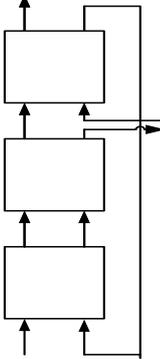
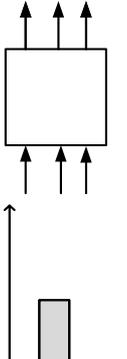
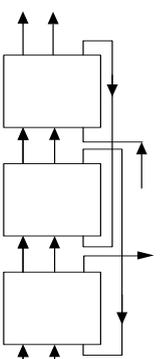
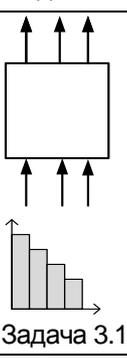
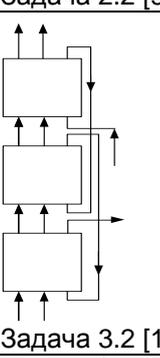
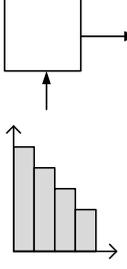
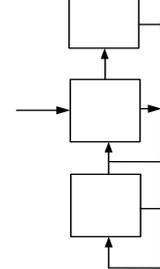
Методы исследования. Для исследования многопоточных теплообменных систем применяются уравнения балансов массы и энергии и методология матричной формализации расчета и анализа сложных технологических систем с произвольной конфигурацией связей между подсистемами [1, 8–9].

В табл. 1 представлена разработанная классификация матричных моделей теплообмена. Классификация теплообменных систем выполнена по числу потоков теплоносителей, по числу ступеней в системе теплообмена и по числу компонентов или фракций, из которых состоят теплоносители.

По признаку числа ступеней системы классифицируются на одноступенчатые и многоступенчатые. К многоступенчатым [1] будем относить системы, которые включают две и более ступеней. По числу потоков теплоносителей системы подразделяются на однопоточные, двухпоточные и многопоточные. По числу компонентов выделяются однокомпонентные и многокомпонентные системы. Ранее нами были рассмотрены матричные модели для одноступенчатых двухпоточных систем [1] (задача 1.1), для многоступенчатых двухпоточных систем [1] (задача 1.2), для трехпоточных одноступенчатых и для трехпоточных многоступенчатых систем [8, 9] (задачи 2.1 и 2.2). За пределами рассмотрения в рамках матричной формализации в настоящее время

остались модели с многокомпонентными теплоносителями.

Таблица 1. Классификация систем теплообмена по числу ступеней, числу потоков и числу компонентов (фракций) теплоносителей

Система	Одноступенчатая	Многоступенчатая
Двухпоточная однокомпонентная	 Задача 1.1 [1]	 Задача 1.2 [1]
Многopotочная однокомпонентная	 Задача 2.1 [8]	 Задача 2.2 [9]
Многopotочная многокомпонентная	 Задача 3.1 [14]	 Задача 3.2 [14]
Однопоточная многокомпонентная	 Задача 4.1	 Задача 4.2

В [14] сделана попытка представить двухкомпонентную смесь дымовых газов и водяных паров в виде двухпоточной теплообменной системы, тем самым свести многокомпонентную задачу (3.1, 3.2) к многопоточной, но однокомпонентной задаче (2.2). Данный прием был успешно использован при решении задачи выделения влаги из уходящих газов ТЭС [14]. Сложности при реализации данного модельного подхода заключаются в определении точки начала фазового перехода в низкокипящем теплоносителе и организации в этой точке перехода с одной расчетной модели на другую [1]. Особенно эти расчетные трудности проявляются при сложной структуре потоков теплоносителей, которая реализуется, например, в ректификационных колонках при получении большого числа фракций.

Для решения задачи теплообмена с многокомпонентными теплоносителями при описании ректификации нефти предлагается подход, который в табл. 1 представлен задачами 4.1 и 4.2. Многокомпонентные теплоносители в нефтехимии характеризуются массовым содержанием компонентов (фракций) с разными температурами кипения. Фракционный состав нефтепродуктов по истинным температурам кипения (ИТК) является одной из важных и широко используемых характеристик нефти [4]. Состав нефти по ИТК выражается в виде дискретных значений массового распределения фракций по температурам кипения (табл. 2). При проведении анализа ИТК получается интегральная кривая вероятности $F(\Theta)$, значение которой показывает массовую долю смеси, у которой температура кипения ниже Θ . Дифференциальная плотность распределения фракций по температурам кипения может определяться дифференцированием интегральной функции распределения по температуре кипения фракций: $f(\Theta) = dF/d\Theta$. Произведение плотности распределения на ширину температурного диапазона показывает долю компонентов с температурами кипения в диапазоне $[\Theta; \Theta+d\Theta]$:

$$f(\Theta) d\Theta = dF. \quad (1)$$

Для разделения многокомпонентных смесей на отдельные фракции в нефтехимической отрасли используются ректификационные колонки. Принцип действия и

схему потоков в таких колонках иллюстрирует рис. 1.

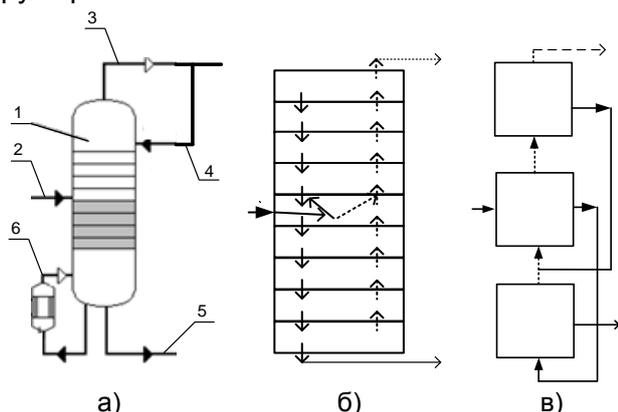


Рис. 1. Ректификационная колонка (а), схема потоков (б), расчетная схема модели (в): 1 – ректификационная колонка; 2 – исходная смесь (питание); 3 – дистиллят; 4 – флегма; 5 – кубовый остаток; 6 – испаритель кубового остатка

Ректификация – это процесс многократного испарения и конденсации, в ходе которого исходная смесь разделяется на 2 или более компонентов, паровая фаза насыщается легколетучим (низкокипящим) компонентом, а жидкая часть смеси насыщается тяжелолетучим (высококипящим) компонентом. Исходная смесь, нагретая до температуры питания в паровой, парожидкостной или жидкой фазе, поступает в колонну 1 в качестве питания 2. Пары 3 поднимаются в верхнюю часть колонны, охлаждаются, конденсируются в холодильнике-конденсаторе и подаются обратно на верхнюю тарелку колонны в качестве орошения (флегма) 4. Отношение количества возвращаемой в колонну флегмы к количеству отводимого дистиллята называется флегмовым числом [4, 5]. Таким образом, в верхней части колонны (укрепляющей) противотоком вверх движутся пары и вниз стекает жидкость. Стекая вниз по тарелкам, жидкость обогащается высококипящими компонентами, а пары обогащаются низкокипящими компонентами. Продукт, отводимый с верха колонны и обогащенный легкокипящим компонентом, называют дистиллятом. Для создания восходящего потока паров в кубовой (нижней) части ректификационной колонны часть кубовой жидкости 5 направляют в теплообменник 6, образовавшиеся пары подают обратно под нижнюю тарелку колонны. В случае, если разгоняемый продукт состоит из двух компонентов, конечными продуктами являются дистиллят, выходящий из верхней части

колонны, и кубовый остаток, вытекающий из нижней части колонны.

Наличие пакетов прикладных программ для расчета ректификационных установок, например HYSYS Crude Module [15] и др., не снимает актуальность разработки альтернативных отечественных методов расчета и средств их компьютерной поддержки.

Для моделирования тепломассообмена в системах с многокомпонентным теплоносителем предложен новый вероятностный подход, суть которого заключается в следующем. Для описания процесса ректификации в ступени (табл. 1, задача 4.1) предлагается использовать вероятностную оценку [16, 17] попадания фракции определенной температуры кипения в дистиллят. Считается, что в стационарном режиме фракционные потоки между ступенями стабилизируются, поэтому из ступени в виде пара отводится фиксированная доля каждого компонента. В качестве основной характеристики разделения в ступени предлагается использовать кривую разделения ректификации $\varphi(\Theta)$, значение которой показывает вероятность перехода в дистиллят фракции с температурой кипения Θ . Очевидно, что значение этой доли будет зависеть от той температуры, которая установилась в ступени, с одной стороны, и от значения температуры кипения фракции, с другой. Для аппроксимации кривой разделения ректификации $\varphi(\Theta)$ воспользуемся известным видом S-образной зависимости [18], которая удовлетворяет граничным значениям вероятностей: при нулевых значениях температуры вероятность приближается к единице, а при увеличении значений температуры – к нулю:

$$\varphi(\Theta) = \frac{1}{1 + (\Theta/\Theta_0)^{k_s}}, \quad (2)$$

где Θ_0 – граничное, или медианное значение температуры, при которой вероятность фракции перейти в дистиллят равна 0,5; k_s – параметр эффективности, или острота разделения, которая характеризует качество разделения.

Основные расчетные формулы процесса ректификации для одной ступени, по аналогии с процессом разделения продуктов при классификации, принимают следующий вид [16]:

$$f_3(\Theta) = \frac{f_1(\Theta)\varphi(\Theta)}{\bar{\varphi}}; \quad (3)$$

$$f_2(\Theta) = \frac{f_1(\Theta)(1-\varphi(\Theta))}{1-\bar{\varphi}}; \quad (4)$$

$$\bar{\varphi} = \int_0^{\Theta_{\max}} f_1(\Theta)\varphi(\Theta)d\Theta, \quad (5)$$

где $f_1(\Theta)$ – фракционный состав питания; $f_3(\Theta)$ – фракционный состав дистиллята; $f_2(\Theta)$ – фракционный состав остатка; $\bar{\varphi}$ – доля исходного продукта ступени, перешедшего в дистиллят.

Расчетные зависимости (3)–(4) для ступени ректификации для конечного числа фракций записываются в матричном виде следующим образом [6]:

$$f_3 = C f_1; \quad (6)$$

$$f_2 = (I - C) f_1, \quad (7)$$

где f_1, f_2, f_3 – матрицы размера $m \times 1$ фракционного состава питания ступени, остатка и дистиллята соответственно; C – диагональная матрица размера $m \times m$, на главной диагонали которой находятся вероятности попадания соответствующих фракций в дистиллят.

Матрица C определяется через кривую разделения (2) согласно выражению

$$C = \begin{bmatrix} \varphi_1(\Theta) & \dots & 0 \\ \dots & \varphi_j(\Theta) & \dots \\ 0 & \dots & \varphi_m(\Theta) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Ректификационная колонка в промышленных технологических установках собирается из большого числа ступеней (тарелок) [4]. Для многоступенчатых систем (табл. 1, задача 4.2) разработаны формальные правила составления матричных расчетных зависимостей. Считается, что для каждой ступени кривые разделения ректификации известны и могут быть аппроксимированы выражением (2). Для вывода расчетных зависимостей рассмотрим наиболее общую систему ректификации, которая представлена на рис. 2. Пусть система состоит из n элементов (ступеней), в которых происходит испарение и конденсация фракций нефти. В каждом элементе схемы происходит преобразование входного фракционного состава f в выходной f' , связь между которыми определяется уравнениями (6)–(7). В обобщенном матричном виде эти уравнения удобней записать как

$f' = P f$, где P – квадратная матрица размера $m \times m$, вид которой для перехода в дистиллят и остаток определяется соответственно матрицам C и $I - C$.

Математическое описание системы произвольной структуры строится на основании материальных фракционных балансов для i -го элемента согласно расчетной схеме, представленной на рис. 2.

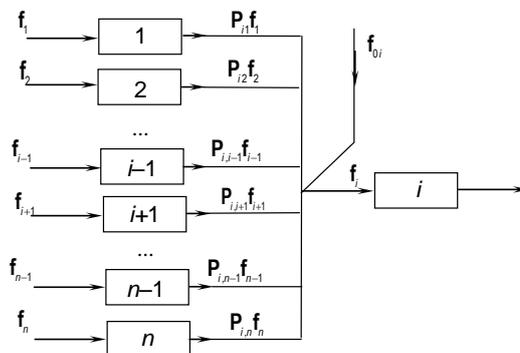


Рис. 2. Схема материальных потоков на входе i -го элемента

В общем случае на вход i -го элемента могут поступать массопотоки из остальных элементов и внешние потоки с известным фракционным составом f_{0i} . Уравнение материального баланса для узла смешения на входе в i -й элемент имеет вид

$$-I f_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n P_{ik} f_k = -f_{0i}.$$

Аналогичные балансовые уравнения для всех n ступеней колонки после преобразований записываются в виде системы линейных уравнений в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} -I & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & -I & P_{23} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -f_{01} \\ -f_{02} \\ \dots \\ -f_{0n} \end{pmatrix}$$

или

$$K F = -F_0, \quad (9)$$

где

$$K = \begin{pmatrix} -I & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & -I & P_{23} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & -I \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Здесь I – единичная матрица размера $m \times m$; матрица P_{ik} соответствует матрице P в уравнении для k -го элемента; i – номер элемента схемы, на вход которого подается материал с выхода k -го элемента (если

материал из k -го элемента не попадает в i -й, то соответствующее слагаемое в уравнении принимает нулевое значение; матрица \mathbf{K} является блочной матрицей размера $n \times n$ блоков или $mn \times mn$ элементов); \mathbf{F} – блочная матрица-столбец размера $n \times 1$ блоков-столбцов или $mn \times 1$ элементов, описывающая фракционные составы продуктов на входе во все n элементов схемы; \mathbf{F}_0 – блочная матрица такого же размера, описывающая фракционные составы внешних продуктов, подаваемых в систему.

Решение уравнения (9), полученное методом обращения матриц, записывается в виде

$$\mathbf{F} = -\mathbf{K}^{-1}\mathbf{F}_0, \quad (11)$$

где \mathbf{K}^{-1} – матрица, обратная \mathbf{K} . Зная матрицу \mathbf{K} , можно рассчитать фракционные составы продуктов в произвольной точке системы.

Матрица \mathbf{K} может быть построена на основе универсального алгоритма для всех возможных вариантов схем, содержащих ступени ректификации, узлы питания и вывода готового продукта. Алгоритм с учетом специфики представленных процессов сводится к следующим правилам построения матрицы \mathbf{K} .

1. Матрица \mathbf{K} – квадратная блочная матрица размера $n \times n$ блоков или $(mn) \times (nm)$ элементов, на главной диагонали которой размещены единичные матрицы со знаком минус.

2. Каждый столбец матрицы соответствует элементу (ступени) системы.

3. Если рассматриваемый элемент – ступень ректификации, то в его столбце размещаются диагональная матрица \mathbf{C} в строке, соответствующей элементу, в который подают дистиллят, и матрица $(\mathbf{I}-\mathbf{C})$ в строке, соответствующей элементу, в который подают остаток. Все остальные элементы столбца – нулевые.

4. Если материал из какого-либо элемента полностью покидает систему, то матрица схемы не содержит матрицы этого элемента.

5. В матричном уравнении векторы фракционных составов питания \mathbf{f}_{0i} размещаются в строках блочной матрицы \mathbf{F}_0 , соответствующих номерам элементов, в которые подается сырье. Если в i -й элемент сырье не подается, то в i -й строке матрицы \mathbf{F}_0 размещается нулевой вектор.

Построив матрицу \mathbf{K} и решив уравнение (11), можно рассчитать фракционный состав продукта перед любым элементом схемы.

Результаты. В качестве демонстрационного примера рассматривается расчет технологической системы ректификационной колонки, представленной на рис. 1. С учетом структуры потоков в ректификационной колонке, представленной на рис. 1,б, составляется ее расчетная схема, приведенная на рис. 1,в. Ряд тарелок могут объединяться в одну ступень, которая моделируется одной кривой разделения. Число ступеней в расчетном примере равно трем ($n = 3$), число контролируемых бензиновых фракций 17 ($m = 17$). Фракционный состав (ИТК) питания колонки приведен в табл. 2 [2]. Значения параметров кривой разделения (2) для трех ступеней в расчетном примере выбираются следующим образом: $\Theta_{01} = 463$; $\Theta_{02} = 438$; $\Theta_{03} = 300$ К; $k_{s1} = k_{s2} = k_{s3} = 30$.

Таблица 2. Фракционный состав (ИТК) исходной широкой бензиновой фракции питания колонки

№	Θ, K	$F(\Theta)$
1	0	0
2	303	0,018
3	315	0,072
4	327	0,140
5	339	0,213
6	351	0,29
7	363	0,371
8	375	0,456
9	387	0,542
10	399	0,625
11	411	0,704
12	423	0,779
13	435	0,85
14	447	0,914
15	459	0,96
16	471	0,986
17	483	0,997
18	495	1

В ходе расчетного анализа определялись фракционные составы и массопотоки продуктов на выходе колонки.

Для рассматриваемого примера матрица \mathbf{K} , составленная по разработанным правилам, представляется блочной матрицей размера 3×3 или обычной матрицей размера 51×51 элементов:

$$K = \begin{bmatrix} -I & I-C_2 & 0 \\ C_1 & -I & I-C_3 \\ 0 & C_2 & -I \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Для проведения расчетных исследований согласно модели (11)–(12) разработаны алгоритм и компьютерная программа для его реализации в среде MATLAB. Результаты расчетного анализа, проведенного в рамках предложенной модели, представлены на рис. 3 в виде дифференциальных фракционных составов питания (1) и дистиллята (2). Массовая доля дистиллята на выходе из колонки составила 0,5442, при этом доля нормируемой целевой фракции в дистилляте, выкипающей в интервале температур 303–411 К, составила 0,998.

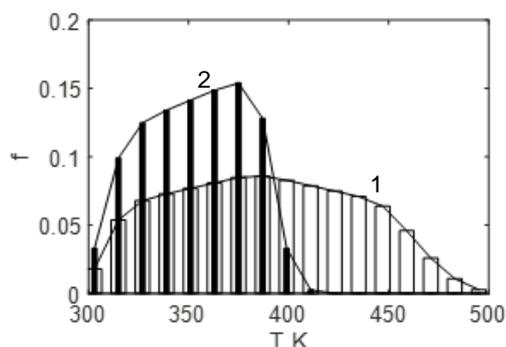


Рис. 3. Результаты расчетного анализа ректификационной колонки, представленные в виде фракционного состава питания (1) и дистиллята (2)

Анализ показывает, что полученные результаты, представленные на рис. 3, достоверно описывают процесс ректификации для многоступенчатой установки.

Следует отметить, что модель позволяет исследовать ректификационные процессы в многопоточных многоступенчатых установках, варьируя число ступеней, значения температуры в них, эффективность разделения в каждой ступени. Предложенный подход позволяет решать задачи по оптимальному распределению температур по тарелкам за счет рециркуляции конденсата выделенных фракций. Предложенный подход также позволяет выбирать число ступеней и структуру потоков между ними для получения заданного числа товарных фракций с допустимой концентрацией примесей. В качестве ограничения предложенного подхода следует отметить необходимость предварительного определения кривых разделения ступеней, для нахождения которых требуется проведение дополни-

тельных расчетно-экспериментальных исследований.

Выводы. Применение методологии матричной формализации позволяет в рамках единого подхода проводить расчетный анализ многопоточных многоступенчатых и многокомпонентные систем в целях определения условий их эффективного функционирования. На основе предложенной модели в рамках методологии матричной формализации могут разрабатываться системы диагностики технического состояния исследуемого оборудования.

Список литературы

1. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
2. Майков В.П., Моругин К.К. Ректификация непрерывных смесей. Системно-информационный подход. – М.: МИХМ, 1979. – 88 с.
3. Поляков К.М., Носенко В.Н. Влияние различных видов питания ректификационных колонн на энергопотребление установки первичной переработки нефти // Вестник Омского университета. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 53–59.
4. Кирсанов Ю.Г., Шишов М.Г., Коняева А.П. Анализ нефти и нефтепродуктов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 88 с.
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 2006. – 829 с.
6. Mizonov V.E., Zhukov V.P., Bernotat S. Simulation of Grinding: New Approaches. – Ivanovo, 1997. – 108 p.
7. 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.
8. 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.
9. Барочкин А.Е., Жуков В.П. Моделирование и расчет многопоточных теплообменных аппаратов // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 3. – С. 70–75.
10. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 2011. – 1230 с.
11. Лисицын Н.В., Федоров В.И. Исследование технологического процесса осушки природного газа. – СПб.: СПбГТУ, 2004. – 28 с.
12. Клинов А.В., Разинов А.И. Никешин В.В. Моделирование многокомпонентного массопереноса при ректификации в насадочных колоннах на основе потенциалов межмоле-

кулярного взаимодействия // Вестник Казанского технологического университета. – 2002. – № 1–2. – С. 382–388.

13. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 560 с.

14. **Разработка** математической модели многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях / К.А. Касаткин, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.Г. Орлов // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 5. – С. 61–67.

15. **HYSYS**. Process, версия 2.4. Базис. – М.: ЗАО «Технефтехим», 2001. – 257 с.

16. **Мизонов В.Е., Ушаков С.Г.** Аэродинамическая классификация порошков. – Иваново, 2014. – 160 с.

17. **Бобков С.П.** Применение вероятностных подходов для моделирования технологических процессов // Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология. – 2005. – Т. 48, № 7. – С. 105–112.

18. **Шувалов С.И., Новосельцева С.С., Жуков В.П.** Обоснование выбора зависимости, используемой для аппроксимации кривой разделения Тромпа // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 15–23.

References

1. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.

2. Maykov, V.P., Morugin, K.K. *Rektifikatsiya nepreryvnykh smesey. Sistemno-informatsionnyy podkhod* [Rectification of continuous mixtures. System-information approach]. Moscow: MIKhM, 1979. 88 p.

3. Polyakov, K.M., Nosenko, V.N. *Vestnik Omskogo universiteta*, 2018, vol. 23, no. 1, pp. 53–59.

4. Kirsanov, Yu.G., Shishov, M.G., Konyaeva, A.P. *Analiz nefiti i nefteproduktov* [Analysis of oil and oil products]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural. un-ta, 2016. 88 p.

5. Kasatkin, A.G. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 2006. 829 p.

6. Mizonov, V.E., Zhukov, V.P., Bernotat, S. *Simulation of Grinding: New Approaches*. Ivanovo, 1997. 108 p.

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

8. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Belyakov, A.N. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, vol. 54, issue 11, pp. 116–119.

9. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 70–75.

10. Komissarov, Yu.A., Gordeev, L.S., Vent, D.P. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Processes and devices of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 2011. 1230 p.

11. Lisitsyn, N.V., Fedorov, V.I. *Issledovanie tekhnologicheskogo protsessa osushki prirodnogo gaza* [Study of the process of drying natural gas]. Saint-Petersburg: SPbGTU, 2004. 28 p.

12. Klinov, A.V., Razinov, A.I. Nikeshin, V.V. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2002, no. 1–2, pp. 382–388.

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

14. Kasatkin, K.A., Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Orlov, G.G. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 5, pp. 61–67.

15. **HYSYS**. Process, versiya 2.4. Bазis. Moscow: ЗАО «Технефтехим», 2001. 257 p.

16. Mizonov, V.E., Ushakov, S.G. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Aerodynamic classification of powders]. Ivanovo, 2014. 160 p.

17. Bobkov, S.P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2005, vol. 48, no. 7, pp. 105–112.

18. Shuvalov, S.I., Novosel'tseva, S.S., Zhukov, V.P. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 15–23.

Барочкин Алексей Евгеньевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru
Barochkin Aleksey Yevgenyevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department, telephone (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, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru
Zhukov Vladimir Pavlovich,
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering (Postdoctoral degree), Head of the Applied Mathematics Department, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Шумилова Мария Сергеевна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», магистрант,
e-mail: bobrova_m_s@mail.ru
Shumilova Maria Sergeevna,
Ivanovo State State University of Chemical Technology, master student, e-mail: bobrova_m_s@mail.ru

Барочкин Евгений Витальевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com
Barochkin Evgeny Vitalievich,
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering (Postdoctoral degree), Professor of the Heat Power Plants Department, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

Беляков Антон Николаевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры прикладной математики, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru
Belyakov Anton Nikolaevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering (Post-doctoral degree), Associate Professor of the Applied Mathematics Department, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru