

УДК 536.24.08

Алексей Евгеньевич Барочкин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru

Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в контактных аппаратах с учетом фазового перехода в теплоносителях

Авторское резюме

Состояние вопроса. Приоритетами государственной энергетической политики Российской Федерации, в том числе, являются: переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, рациональное природопользование и энергетическая эффективность. Одним из направлений энергосбережения является максимальное использование теплоты сгорания топлива с одновременным получением конденсата из продуктов сгорания природного газа. Несмотря на большое количество научных публикаций по утилизации тепла дымовых газов на большинстве газовых котельных, энергетических предприятий и тепловых электрических станций, в нашей стране конденсационные теплоутилизаторы не применяются. Этому есть ряд причин, вызванных отсутствием универсальных методик расчета и проектирования теплоутилизаторов конденсационного типа. В связи с этим разработка новых методов моделирования многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях является актуальной задачей для энергетики.

Материалы и методы. Для решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах с учетом фазового перехода в теплоносителях использованы матричные модели теплопередачи, построенные на уравнениях баланса массы и энергии.

Результаты. Разработан метод расчета и выбора конструкций многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях. Для иллюстрации эффективности предложенного метода выполнено численное решение задачи по выбору конструкции контактного экономайзера парового котла ТЭС, используемого для утилизации тепла дымовых газов.

Выводы. Предложенный метод решения обратной задачи теплопередачи обеспечивает возможность одновременного поиска наиболее приемлемых значений параметров теплоносителей и конструктивных характеристик теплообменных аппаратов различного назначения.

Ключевые слова: обратная задача теплопередачи, матричная модель теплопередачи, фазовый переход, многопоточный теплообменник, баланс энергии, баланс массы, теплообменные аппараты, дымовые газы, тепловые электрические станции

Aleksei Yevgenyevich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: acorp27@yandex.ru

Matrix method to solve inverse problem of heat transfer in heat exchangers with phase transition in heat carriers

Abstract

Background. The transition to environmentally friendly and resource-saving energy, efficient use of natural resources and energy performance are the key priorities of the state energy policy of the Russian Federation. Maximum use of heat combustion of fuel and simultaneously production of condensate water of the combustion products of natural gas is one of the directions of energy saving policy. Despite many scientific papers on the issues of utilization of flue gas heat, condensation heat exchangers are not used in most gas boiler houses, energy power providers and thermal power plants in this country. And there are several reasons to explain this fact due to the lack of universal methods to calculate and design condensation-type heat exchangers. Thus, the development of new methods to simulate multithreaded heat exchangers considering the phase transition in heat carriers is an urgent task of power engineering and industry sectors.

Materials and methods. Matrix models of heat transfer based on mass and energy balance equations are applied to solve the inverse problem of heat transfer in heat exchangers, considering the phase transition in heat carriers.

Results. A method to calculate and select the designs of multi-threaded heat exchangers, considering the phase transition in heat carriers, has been developed. The author suggests a numerical solution to choose the design of a contact economizer of a heat power plant steam boiler used for heat recovery of flue gases to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Conclusions. The proposed method to solve the inverse problem of heat transfer provides the possibility to identify simultaneously the most acceptable values of the parameters of heat carriers and design characteristics of heat exchangers for various purposes.

Key words: inverse heat transfer problem, matrix model of heat transfer, phase transition, multithreaded heat exchanger, energy balance, mass balance, heat exchangers, flue gases, thermal power plants

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.068-075

Введение. По способу использования математических моделей при проведении теплотехнических расчетов можно выделить прямые и обратные задачи. Прямые задачи предполагают выполнение конструкторского или поверочного расчетов, которые в первом случае необходимы для определения поверхности теплообмена и конструктивных размеров выбранного аппарата, а во втором – для проверки возможности получения требуемых параметров теплоносителей на выходе из теплообменного аппарата при фиксированных конструктивных параметрах [1–3]. В обратных задачах реализуются проектные расчеты, которые ориентированы на одновременный подбор как конструктивных, так и режимных параметров работы теплообменных аппаратов, обеспечивающих наиболее эффективную работу оборудования [1], что сокращает общее время и количество расчетов.

Ранее [4] была рассмотрена задача решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах без фазового перехода. Ниже выполнено развитие данного подхода на случай учета фазового перехода в теплоносителях. Возможности матричного метода решения обратной задачи теплопередачи продемонстрированы на примере контактных многопоточных теплообменников, используемых для утилизации влаги и тепловой энергии дымовых газов на ТЭС [5–10]. В качестве греющих потоков теплоносителей в данных аппаратах выступают дымовые газы и водяные пары, в качестве нагреваемого потока – охлаждающая вода. Объем водяных паров, получаемых при сжигании 1 м^3 природного газа, составляет $2,1\text{--}2,5 \text{ м}^3$. Конденсация водяных паров из дымовых га-

зов позволяет увеличить КПД парового или водогрейного котла, а также получить дополнительный поток теплоносителя, который может быть использован в тепловой схеме ТЭС или котельной. Внедрение в энергетике теплообменных аппаратов для утилизации тепла дымовых газов сдерживается отсутствием методов расчета многопоточных теплообменных аппаратов с возможным фазовым переходом в теплоносителях. Таким образом, моделирование и расчет многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях являются для энергетики актуальной задачей.

Объектом исследования являются многопоточные теплообменные аппараты.

Предметом исследований является метод решения обратной задачи теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах с учетом фазового перехода в теплоносителях [2, 3, 11].

Целью исследования является определение наиболее эффективных конструктивных и режимных характеристик многопоточных теплообменных установок с фазовым переходом теплоносителей.

Методы исследования. Для решения обратной задачи теплопередачи с фазовым переходом теплоносителей используются математические модели теплообмена, построенные на дифференциальных уравнениях баланса массы и энергии [11–14]. Для решения полученной в ходе моделирования системы дифференциальных уравнений применяются численные и аналитические методы, а также методы математического программирования [15–18].

Схема установки контактного теплообменного аппарата представлен на рис. 1.

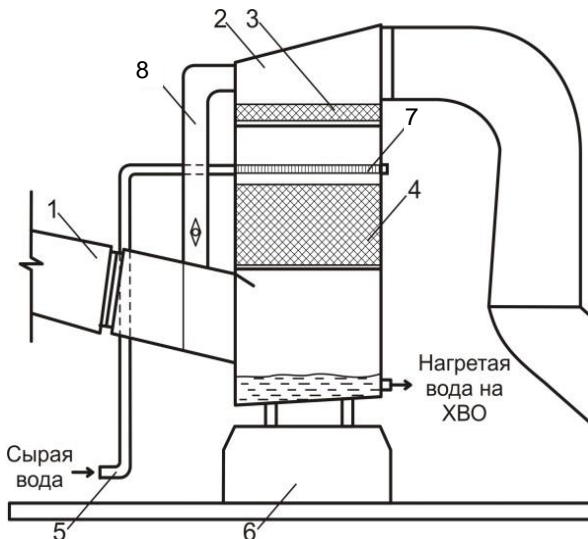


Рис. 1. Схема установки контактного экономайзера: 1 – входной газоход из конвективной части котла; 2 – контактный экономайзер; 3 – каплеулавливающая насадка; 4 – слой рабочей насадки; 5 – вход сырой воды; 6 – фундамент; 7 – водораспределитель из перфорированных труб; 8 – байпасный газоход

Расчетная схема процесса теплопередачи с фазовым переходом первого теплоносителя и с указанием направления движения потоков теплоносителей представлена на рис. 2. Поверхность нагрева разделена на две части: без фазового перехода (F_1) и с фазовым переходом (F_2). Принимается допущение, что потоки теплоносителей двигаются по отдельным каналам без перемешивания внутри аппарата. Смешение теплоносителей происходит на выходе из установки.

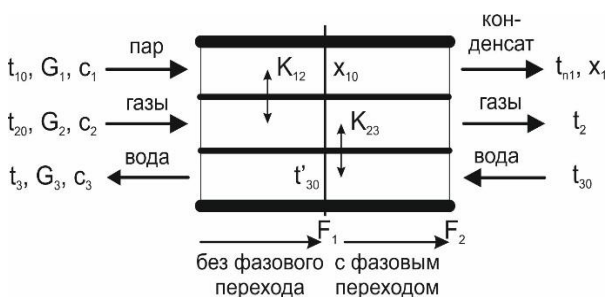


Рис. 2. Расчетная схема трехпоточного теплообменного аппарата с указанием направления движения потоков теплоносителей и потоков тепловой энергии за счет теплопередачи

Разработка модели процесса осуществляется в два этапа: на первом этапе происходит охлаждение дымовых газов без фазового перехода до точки росы, на втором – конденсация водяных паров. Математическая модель теплопередачи для

первого этапа в виде системы трех дифференциальных уравнений относительно температур водяных паров t_1 , дымовых газов t_2 и охлаждающей воды t_3 при отсутствии в них фазового перехода записывается следующим образом [13, 19]:

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = -a_1 t_1 + a_1 t_2, \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2 t_1 - (a_2 + a_3) t_2 + a_3 t_3, \\ \frac{dt_3}{dF} = -a_4 t_2 + a_4 t_3, \end{cases} \quad (1)$$

где K – коэффициент теплопередачи; c – удельная теплоемкость; G – расход теплоносителя; $a_1 = K_{12} / (c_1 G_1)$, $a_2 = K_{12} / (c_2 G_2)$, $a_3 = K_{23} / (c_2 G_2)$, $a_4 = K_{23} / (c_3 G_3)$; одинарный индекс показывает номер теплоносителя; двойной индекс коэффициента теплопередачи соответствует номерам теплоносителей, между которыми происходит теплопередача.

Для начальных условий $t_1|_{F=0} = t_{10}$,

$t_2|_{F=0} = t_{20}$, $t_3|_{F=F_1} = t_{30}$ (F_1 – площадь поверхности теплообмена) решение системы (1) запишем в следующем виде [4]:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$$b_{11} = \frac{(S_2 - S_1) + (S_3 e^{F_2 F_1} - S_1) \left[(S_2 - S_1) + (1 - S_2) e^{F_2 F} + (S_1 - 1) e^{F_3 F} \right] + S(S_1 - e^{F_2 F})}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{12} = \frac{(S_2 - S_1) + (1 - S_3 e^{F_2 F_1}) \left[(S_2 - S_1) + (1 - S_2) e^{F_2 F} + (S_1 - 1) e^{F_3 F} \right] + S(e^{F_2 F} - 1)}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{13} = \frac{(S_2 - S_1) + (1 - S_2) e^{F_2 F} + (S_1 - 1) e^{F_3 F}}{S};$$

$$b_{21} = \frac{(S_3 e^{r_2 F_1} - S_1) \left[\begin{array}{l} (S_2 - S_1) + \\ + (1 - S_2) S_1 e^{r_2 F} + \\ + (S_1 - 1) S_2 e^{r_3 F} \end{array} \right] + S_1 S (1 - e^{r_2 F})}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{22} = \frac{(1 - S_3 e^{r_2 F_1}) \left[\begin{array}{l} (S_2 - S_1) + \\ + (S_1 - 1) S_2 e^{r_3 F} + \\ + (1 - S_2) S_1 e^{r_2 F} \end{array} \right] + S(S_1 e^{r_2 F} - 1)}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{23} = \frac{(S_1 - 1) S_2 e^{r_3 F} + (1 - S_2) S_1 e^{r_2 F} + (S_2 - S_1)}{S};$$

$$b_{31} = \frac{(S_3 e^{r_2 F_1} - S_1) \left[\begin{array}{l} (S_2 - S_1) + \\ + (S_1 - 1) S_4 e^{r_3 F} + \\ + (1 - S_2) S_3 e^{r_2 F} \end{array} \right] - S(S_3 e^{r_2 F} - S_1)}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{32} = \frac{(1 - S_3 e^{r_2 F_1}) \left[\begin{array}{l} (S_2 - S_1) + \\ + (S_1 - 1) S_4 e^{r_3 F} + \\ + (1 - S_2) S_3 e^{r_2 F} \end{array} \right] - S(-S_3 e^{r_2 F} + 1)}{S(S_1 - 1)};$$

$$b_{33} = \frac{(S_1 - 1) S_4 e^{r_3 F} + (S_2 - S_1) + (1 - S_2) S_3 e^{r_2 F}}{S};$$

$$S = S_4 e^{r_3 F_1} (S_1 - 1) + S_2 - S_1 + (1 - S_2) S_3 e^{r_2 F_1};$$

$$S_1 = \frac{a_1 + r_2}{a_1}; \quad S_2 = \frac{a_1 + r_3}{a_1};$$

$$S_3 = \frac{r_2^2 + r_2(a_1 + a_2 + a_3) + a_1 a_3}{a_1 a_3};$$

$$S_4 = \frac{r_3^2 + r_3(a_1 + a_2 + a_3) + a_1 a_3}{a_1 a_3};$$

$$r_{1,2} = \frac{-\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 - 4\beta}}{2};$$

$$\alpha = a_1 + a_2 + a_3 - a_4, \quad \beta = a_1 a_3 - a_4 a_1 - a_4 a_2.$$

Система (2) включает три уравнения, записанные относительно шести температур. Это позволяет произвольно задавать три температуры и определять оставшиеся три неизвестные температуры из решения системы. Для унификации и автоматизации составления модели при произвольном задании трех независимых параметров система (2) дополняется тремя уравнениями связи, с помощью которых задаются известные значения параметров теплоносителей [4]:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \bar{t}_{10} \\ \bar{t}_{20} \\ \bar{t}_{30} \end{pmatrix} \quad (3)$$

или

$$\mathbf{BT} = \mathbf{T}_0, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{T}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \bar{t}_{10} \\ \bar{t}_{20} \\ \bar{t}_{30} \end{pmatrix},$$

где \bar{t}_{10} , \bar{t}_{20} , \bar{t}_{30} – численные значения известных параметров теплоносителей.

Математическая модель второго этапа теплопередачи, описывающая фазовый переход в первом теплоносителе, для рассматриваемой на рис. 2 расчетной схемы трехпоточного теплообменного аппарата записывается в следующем виде [13]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dF} = -\bar{a}_1 t_{m1} + \bar{a}_1 t_2, \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2 t_{m1} - (a_2 + a_3) t_2 + a_3 t_3, \\ \frac{dt_3}{dF} = -a_4 t_2 + a_4 t_3, \end{cases} \quad (5)$$

где $\bar{a}_1 = K_{12} / (r G_1)$; r – удельная теплота парообразования; t_{m1} – температура водяного пара; x_1 – степень сухости пара.

Для начальных условий $x_1|_{F=0} = x_{10}$,

$t_2|_{F=0} = t_{20}$, $t_3|_{F=F_2} = t_{30}$ (F_2 – площадь поверхность теплообмена) решение системы (5) запишем в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_1 \\ -d_2 \\ -d_3 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где

$$b_{11} = 1;$$

$$b_{12} = \frac{(-S_1 e^{r_3 F_2} + S_2 e^{r_2 F_2} + S_1 e^{r_2 F} e^{r_3 F_2} - S_2 e^{r_3 F} e^{r_2 F_2})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$b_{13} = \frac{(S_1 S_4 - S_2 S_3 - S_4 S_1 e^{r_2 F} + S_3 S_2 e^{r_3 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$d_1 = -t_{n1} \left[\frac{(-S_1 e^{r_3 F_2} + S_2 e^{r_2 F_2} + S_1 e^{r_2 F} e^{r_3 F_2} - S_2 e^{r_3 F} e^{r_2 F_2})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} + \frac{(S_1 S_4 - S_2 S_3 - S_4 S_1 e^{r_2 F} + S_3 S_2 e^{r_3 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} \right];$$

$$b_{21} = 0;$$

$$b_{22} = \frac{(S_3 e^{r_2 F} e^{r_3 F_2} - S_4 e^{r_3 F} e^{r_2 F_2})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$b_{23} = \frac{(S_3 S_4 e^{r_3 F} - S_3 S_4 e^{r_2 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$d_2 = t_{n1} \left[1 - \frac{(S_3 e^{r_2 F} e^{r_3 F_2} - S_4 e^{r_3 F} e^{r_2 F_2})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} - \frac{(S_3 S_4 e^{r_3 F} - S_3 S_4 e^{r_2 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} \right];$$

$$b_{31} = 0;$$

$$b_{32} = \frac{(e^{r_3 F_2} e^{r_2 F} - e^{r_2 F_2} e^{r_3 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$b_{33} = \frac{(S_3 e^{r_3 F} - S_4 e^{r_2 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}};$$

$$d_3 = t_{n1} \left[1 - \frac{(e^{r_3 F_2} e^{r_2 F} - e^{r_2 F_2} e^{r_3 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} - \frac{(S_3 e^{r_3 F} - S_4 e^{r_2 F})}{-S_4 e^{r_2 F_2} + S_3 e^{r_3 F_2}} \right];$$

$$S_1 = \frac{\bar{a}_1 S_3}{r_2}, \quad S_2 = \frac{\bar{a}_1 S_4}{r_3}, \quad S_3 = \left(1 - \frac{r_2}{a_4} \right),$$

$$S_4 = \left(1 - \frac{r_3}{a_4} \right),$$

$$r_{1,2} = \frac{-\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 + 4\beta}}{2}, \quad \alpha = a_2 + a_3 - a_4, \quad \beta = a_2 a_4.$$

Система (6) дополняется тремя уравнениями связи, с помощью которых задаются известные значения параметров теплоносителей:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -1 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & -1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{10} \\ t_{20} \\ t_{30} \\ x_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_1 \\ -d_2 \\ -d_3 \\ \bar{x}_{10} \\ \bar{t}_{20} \\ \bar{t}_{30} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где \bar{x}_{10} , \bar{t}_{20} , \bar{t}_{30} – численные значения известных параметров теплоносителей.

Модели (3) и (7) описывают изменение параметров теплоносителей в разных диапазонах значений температуры теплоносителя: первая – до, а вторая – после достижения им температуры насыщения. Полученные модели предлагается использовать для решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах при наличии фазового перехода в одном или нескольких теплоносителях.

Рассмотрим последовательность решения обратной задачи при скользящей границе фазового перехода. Считаем, что в качестве исходных данных заданы температуры теплоносителей на входе в аппарат. Для решения задачи предлагается использовать следующий алгоритм.

1. На первом этапе теплообменный аппарат рассматривается как одноступенчатая установка. Рассчитываются температуры теплоносителей на выходе из установки. Полученные значения сравниваются с температурами насыщения теплоносителей, определяется наличие фазового перехода в установке.

2. При наличии фазового перехода система условно делится на две зоны (подсистемы) по границе начала фазового перехода. Формируется матрица для расчета двухступенчатого аппарата: одна ступень описывается моделью без учета, а вторая – с учетом фазового перехода в теплоносителе.

3. Расчет по п. 2 повторяется при изменении границы между двумя зонами до достижения одинаковых значений температуры теплоносителя на границе между зонами с температурой насыщения.

Для демонстрации расчётных возможностей предлагаемого метода рассматривается пример определения наиболее

лее эффективной поверхности нагрева утилизационной установки дымовых газов для блока 800 МВт при сжигании природного газа. Значения расходов, теплоемкостей и начальных температур теплоносителей, которые были использованы при расчете, приведены в таблице.

Исходные данные для расчетного примера

| Наименование параметра | Значение параметра | | |
|--|--------------------|--------------|------------------|
| | водяной пар | дымовые газы | охлаждающая вода |
| Расход G , кг/с | 20,6 | 657,2 | 2143,3 |
| Теплоемкость c , кДж/кг К | 2,0 | 1,0 | 4,187 |
| Скрытая теплота парообразования r , кДж/кг | 2 200 | — | — |
| Температура на входе t_1 , °C | 67,6 | 67,6 | 20 |
| Температура насыщения t_n , °C [20] | 46,9 | — | — |

Для рассматриваемой расчетной схемы сначала выполняется расчет процесса теплопередачи во второй части теплообменного аппарата (рис. 2) с фазовым переходом первого теплоносителя. Такая очередность определяется противоточным характером движения третьего теплоносителя на расчетной схеме, из-за чего для расчета первой части теплообменного аппарата требуется сначала определить температуру охлаждающей воды t'_{03} . На этом этапе производится подбор оптимальной поверхности теплообмена F_2 исходя из условия необходимости полной конденсации водяных паров (т.е. получения $x_1 = 0$). Данный расчет реализуется с помощью уравнения (7). Результаты расчетного анализа в виде расчетных зависимостей изменения температур и степени сухости теплоносителей вдоль поверхности теплообмена представлены на рис. 3.

Анализ полученной графической зависимости показывает, что полная конденсация водяных паров при заданных параметрах теплоносителей достигается при поверхности нагрева $F_2 = 2150 \text{ м}^2$.

На втором этапе производится расчет процесса теплопередачи в первой части теплообменного аппарата (рис. 2) без фазового перехода первого теплоносителя. Задача сводится к поиску поверхности теплооб-

мена F_1 исходя из необходимости снижения температуры водяных паров до точки насыщения (т.е. получения $t_1 = t_n = 46,9 \text{ °C}$). Данный расчет реализуется с помощью уравнения (3). Поскольку рассматриваемая схема теплообменного аппарата предполагает противоточную схему движения третьего (вода) и первых двух (пар и газы) теплоносителей, то в качестве начальной температуры воды в первой части теплообменного аппарата для уравнения (3) используется результат расчета температуры воды на выходе из второй части теплообменного аппарата, полученного по рис. 3 ($t_3 = t_{30к} = 27,0 \text{ °C}$). Результаты расчетного анализа в виде расчетных зависимостей изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена представлены на рис. 4.

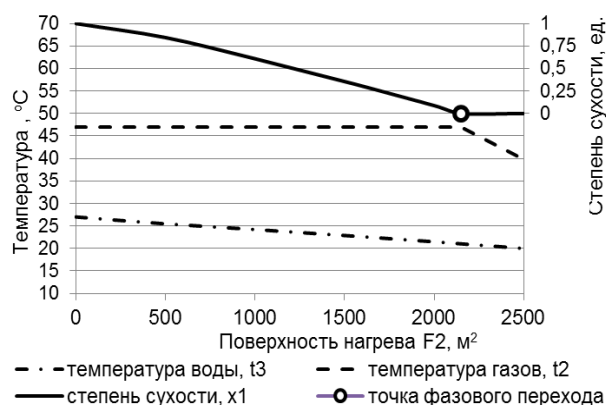


Рис. 3. Зависимости температур теплоносителей и степени сухости пара от площади теплообмена для второй зоны теплообмена с фазовым переходом

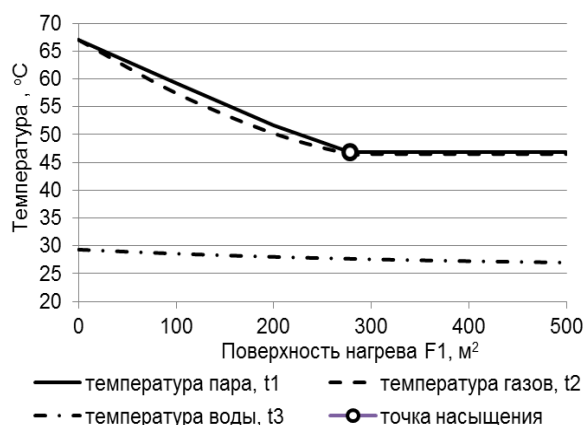


Рис. 4. Зависимости температур теплоносителей от площади теплообмена для первой зоны теплообмена без фазового перехода

Анализ полученной графической зависимости показывает, что охлаждение водяных паров до параметров насыщения дости-

гается при поверхности нагрева $F_1 = 278 \text{ м}^2$. Таким образом, площадь рассматриваемого теплообменного аппарата для принятых параметров теплоносителей составляет $278 + 2150 = 2428 \text{ м}^2$.

Выполненный расчетный анализ утилизационной установки дымовых газов показал, что предложенная методика решения обратной задачи теплопередачи в контактных аппаратах позволяет определить изменение температуры теплоносителей и процент сконденсированных водяных паров в каждой точке теплообменника, что обеспечивает выбор наиболее эффективных конструкции и режимов работы теплообменной установки.

Выводы. Разработанный матричный метод решения обратной задачи теплопередачи для многоступенчатых теплообменных аппаратов со скользящей границей фазовых переходов теплоносителей служит основой для создания более эффективных методов организации процессов теплопередачи в технологических установках различного назначения с произвольным числом теплоносителей с учетом фазового перехода.

Список литературы

1. **Майков В.П.** Введение в системный анализ. – М.: МГУИЭ, 2005. – 100 с.
2. **Цой П.В.** Системные методы расчета краевых задач тепломассопереноса. – М.: МЭИ, 2005. – 568 с.
3. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
4. **Матричный** метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах / В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, М.С. Боброва и др. // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 2. – С. 62–69. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.062-069.
5. **Седлов А.С., Солодов А.П., Бухонов Д.Ю.** Получение конденсата из уходящих дымовых газов на экспериментальной установке ОАО ГРЭС-24 // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 5(43). – С. 76–77.
6. **Беспалов В.В., Беспалов В.И.** Технология осушения дымовых газов ТЭС с использованием теплоты конденсации водяных паров // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 56–59.
7. **Аронов И.З.** Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
8. **Установка** утилизации тепла дымовых газов / Н.Ф. Свиридов, Р.Н. Свиридов,

И.Н. Ивуков, Б.Л. Терк // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 8. – С. 29–31.

9. **Галустов В.С.** Утилизация теплоты дымовых газов // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 6. – С. 44.

10. **Андреев Е.И.** Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 172 с.

11. **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.

12. **Матричный** метод расчета сложных тепломассообменных систем с многокомпонентными теплоносителями / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, М.С. Шумилова и др. // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 1. – С. 59–68.

13. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

14. **Жуков В.П., Барочкин А.Е., Беляков А.Н.** Исследование процесса теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, № 11. – С. 116–119.

15. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.

16. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Высш. шк., 1973. – 500 с.

17. **Моисеев Н.Н.** Математические задачи системного анализа. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.

18. **Таха Х.** Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.

19. **Барочкин А.Е., Жуков В.П., Касаткин К.А.** Матричная формализация расчета и анализ многопоточных многоступенчатых теплообменных аппаратов со сложной конфигурацией потоков // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 1. – С. 70–76. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.070-076.

20. **Тепловой** расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: ЦКТИ, 1998. – 258 с.

References

1. Maykov, V.P. *Vvedenie v sistemnyy analiz* [Introduction to system analysis]. Moscow: MGUIE, 2005. 100 p.
2. Tsoy, P.V. *Sistemnye metody rascheta kraevykh zadach teplomassoperenosa* [System methods for calculating boundary value problems of heat and mass transfer]. Moscow: MEI, 2005. 568 p.
3. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 416 p.

4. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Bobrova, M.S., Belyakov, A.N., Shuvalov, S.I. *Matrichnyy metod resheniya obratnoy zadachi teploperedachi v teploobmennyykh apparatakh* [Matrix method to solve the inverse problem of heat transfer in heat exchangers]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 2, pp. 62–69. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.062-069.
5. Sedlov, A.S., Solodov, A.P., Bukhonov, D.Yu. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2006, no. 5(43), pp. 76–77.
6. Bepalov, V.V., Bepalov, V.I. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 56–59.
7. Aronov, I.Z. *Kontaktnyy nagrev vody produktami sgoraniya prirodnogo gaza* [Contact heating of water by natural gas combustion products]. Leningrad: Nedra, 1990. 280 p.
8. Sviridov, N.F., Sviridov, R.N., Ivukov, I.N., Terk, B.L. *Novosti teplosnabzheniya*, 2002, no. 8, pp. 29–31.
9. Galustov, V.S. *Energiya i menedzhment*, 2004, no. 6, p. 44.
10. Andreev, E.I. *Raschet teplo- i massoobmena v kontaktnyykh apparatakh* [Calculation of heat and mass transfer in contact devices]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 172 p.
11. Kasatkin, K.A., Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Orlov, G.G. *Razrabotka matematicheskoy modeli mnogopotoknykh teploobmennyykh apparatov s uchetom fazovogo perekhoda v teplonositelyakh* [Development of a mathematical model of multi-current heat exchangers taking into account phase transition in heat carriers]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 5, pp. 61–67.
12. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Shumilova, M.S., Barochkin, E.V., Belyakov, A.N. *Matrichnyy metod rascheta slozhnykh teploobmennyykh sistem s mnogokomponentnymi teplonositelyami* [The matrix method for calculating complex heat and mass transfer systems with multicomponent coolants]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 59–68.
13. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.
14. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. *Issledovanie protsessa teploperedachi v mnogopotoknykh teploobmennyykh apparatakh* [Study of heat transfer process in multi-stream heat exchangers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, vol. 54, no. 11, pp. 116–119.
15. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operation Research: Objectives, Principles, Methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 207 p.
16. Korn, G., Korn, T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Handbook of Mathematics (for Scientists and Engineers)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. 500 p.
17. Moiseev, N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1981. 488 p.
18. Takha, Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to Operation Research]. Moscow: Vil'yams, 2005. 901 p.
19. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Kasatkin, K.A. *Matrichnaya formalizatsiya rascheta i analiz mnogopotoknykh mnogostupenchatykh teploobmennyykh apparatov so slozhnoy konfiguratsiyey potokov* [Matrix formalization of calculation and analysis of multi-threaded multi-stage heat exchangers with a complex flow configuration]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 1, pp. 70–76. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.070-076.
20. *Teplovoy raschet kotlov (Normativnyy metod)* [Thermal calculation of boilers (Normative method)]. Saint-Petersburg: TsKTI, 1998. 258 p.