

УДК 66.01.011

ОПТИМАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НЕСКОЛЬКИМИ УРОВНЯМИ АГРЕГИРОВАНИЯ

© 2024 г. В. А. Налетов*, М. Б. Глебов, Л. В. Равичев, А. Ю. Налетов

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва

**e-mail: jacen23@yandex.ru*

Поступила в редакцию 13.02.2024

После доработки 25.09.2024

Принята в печать 30.09.2024

В статье на основе информационного подхода приводится алгоритм повышения организованности химико-технологических систем с несколькими уровнями агрегирования. Алгоритм предполагает последовательное решение оптимизационных задач по принципу “сверху-вниз”, начиная с верхнего к нижним макроскопическим уровням, и затем к задаче оптимизации на микроуровне. Критерием оптимизации при решении оптимизационных задач на всех макроуровнях является макроэнтропия, максимизация которой в соответствии с нулевым началом термодинамики отвечает за оптимальное распределение энергии между элементами и подсистемами. Реализация разработанного алгоритма проиллюстрирована на примере системы с двухкамерной нагревательной печью, состоящей из камер конвекции и радиации, объединенных в единый тепловой агрегат. На основании диаграммы распределения эквивалентных температурных уровней, определяющих весовые коэффициенты процессов, входящих в критерий макроэнтропии, были определены тенденции оптимальной организации химико-технологической системы с печью как единым тепловым агрегатом и печи как подсистемы с дискретной элементной структурой.

Ключевые слова: система, иерархическая структура, информация, дискретность макроуровней, макроэнтропия, оптимальная организация, алгоритм

DOI: 10.31857/S0040357124050116 EDN: WCPPLR

ВВЕДЕНИЕ

Как показано в работе [1], оптимальная организация химико-технологических систем (ХТС), обладающих дискретной элементной структурой, связана с позиции системного информационного подхода с решением оптимизационных задач как на макро-, так и на микроуровнях. Макроуровень представлен статистическим ансамблем весовых коэффициентов, учитывающих в вероятностном виде флуктуации средних энергетических уровней преобразований в элементах по отношению к уровню ХТС как единого целого. В свою очередь, микроуровень представлен статистическим ансамблем, учитывающим вероятности возможных состояний технологических потоков в ходе их превращений.

При этом доминирующую роль играет организация макроуровня, связанная с оптимальным согласованием элементов в системах, что приводит к повышению степеней их макроскопичности, целостности и автономности. В технологическом аспекте эти тенденции приводят к повышению показателей устойчивости и энер-

гоэффективности химико-технологических систем, когда минимизируются притоки свободной энергии извне путем максимальной эффективности использования ее внутри системы. Так, в работе [2] было показано, что в оптимально организованной системе получения электроэнергии, холода и товарного диоксида углерода из дымовых газов (энергоблок тригенерации) наблюдается эффект синергизма в показателях энергоэффективности.

Организация на макроуровне связана с оптимальным распределением весовых коэффициентов элементов (или подсистем) на основе нулевого начала термодинамики, которое определяет тенденцию и условие их оптимального энергетического взаимодействия в системе, а на микроуровне – с оптимальной организацией собственно элементов при определении параметров их организации, отвечающих оптимальным весовым коэффициентам и минимизирующих необратимые потери.

В соответствии с постулатами нулевого начала термодинамики, определяющими параметры

равновесия взаимодействующих друг с другом статистически описываемых подсистем, находящихся в рамках замкнутой термодинамической системы, возможно минимизировать их энергетическое взаимодействие, то есть достичь оптимального их согласования при решении поставленных задач. Применение нулевого начала термодинамики в ХТС полностью согласуется с исходными предпосылками системного информационного подхода.

Однако в ряде случаев химико-технологические системы имеют несколько макроскопических уровней.

Во-первых, это наблюдается при их интеграции с другими ХТС при создании кооперированных химических производств, обладающих более высокими уровнями агрегирования.

Во-вторых, это имеет место в ХТС, включающих сложные процессы, имеющие дискретную элементную структуру. К последним, в частности, можно отнести системы с двухкамерными или многокамерными печами, объединенными в рамках единых тепловых агрегатов.

Выберем в качестве объекта исследования систему с двухкамерной нагревательной печью радиационно-конвекционного типа и рекуперативным подогревом воздуха, используемую в процессах подогрева нефти на нефтеперерабатывающих предприятиях (НПП).

В иерархической структуре выбранного объекта исследования можно выделить два макроскопических уровня. С одной стороны, химико-технологическая система представлена дискретной элементной структурой с печью как единым тепловым агрегатом, а с другой – собственно печь представляет подсистему, объединяющую две камеры: радиации и конвекции.

В целом нагревательные печи в силу их универсальности широко используются во многих технологических процессах: установках разделения нефти, газофракционирующих установках, высокотемпературных реакторах пиролиза, конверсии углеводородных газов, дожигания органических отходов и ряде других.

Все печи относятся к энергоемким технологическим агрегатам. В частности, доля нагревательных печей в энергетическом балансе нефтеперерабатывающих предприятий составляет от 65 до 83% и обусловлена в основном затратами котельно-печного топлива [3–5], что в практическом аспекте актуализирует проблему ресурсо- и энергосбережения в системах с нагревательными печами.

Для повышения эффективности систем с нагревательными печами последние объединяют

с рекуператорами подогрева воздуха, нагнетаемого компрессором в печь [6].

Топливом в нагревательных печах является либо мазутная фракция, либо природный или попутный нефтяной газ.

Иногда при использовании мазута в качестве топлива для улучшения экологических характеристик в топливоздушную смесь добавляют водяной пар.

Целью исследования является разработка алгоритма и методики оптимальной организации химико-технологических систем, иерархическая структура которых имеет несколько макроскопических уровней.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Оптимальная организация неоднородной ХТС с позиции информационного подхода представляется как минимаксная оптимизационная задача, для которой на макроуровне энтропия максимизируется, а на микроуровне – минимизируется и решается в соответствии с алгоритмом условно названным “сверху-вниз”. Однако это относится к ХТС, иерархическая структура которых содержит только один макроскопический уровень.

Особенностью оптимальной организации химико-технологических систем, иерархическая структура которых имеет как минимум два макроскопических уровня, как в выбранном объекте исследования, заключается в том, что в данном случае оптимизационная задача решается последовательно, начиная с верхнего макроуровня (макроуровень I) к нижнему макроуровню (макроуровень II) по единому критерию – макроэнтропии и далее к микроуровню.

В частности, для выбранного объекта исследования верхний макроуровень принятия решений относится к оптимальной организации системы с нагревательной печью как единым тепловым агрегатом, а нижний макроуровень – относится непосредственно к подсистеме двухкамерной нагревательной печи, состоящей из радиационной (РК) и конвекционной (КК) камер (рис. 1).

При этом задача оптимальной организации печи как подсистемы должна строго соответствовать оптимальным условиям для печи как единого теплового агрегата, полученным на уровне всей системы.

В дальнейшем подобная логика в решении задачи оптимальной организации может быть распространена на сложные химико-технологические системы, иерархическая структура которых имеет больше макроскопических

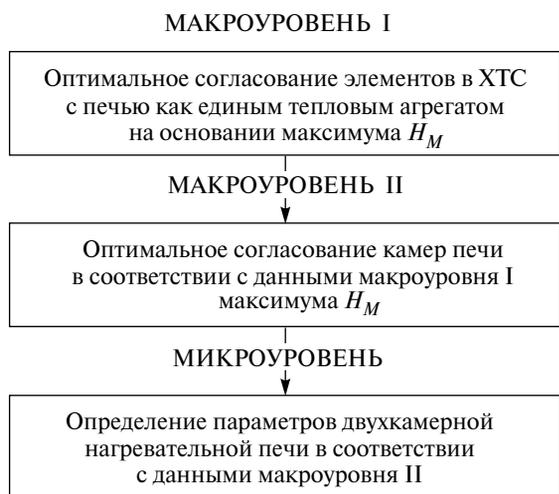


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оптимальной организации системы с печью радиационно-конвекционного типа.

уровней. При этом следует учесть, что в ряде случаев условие максимизации макроэнтропии на верхнем уровне для сложных интегрированных химико-технологических систем может интерпретироваться как декомпозиция на квазизамкнутые подсистемы, энергетическое взаимодействие между которыми незначительно для того, чтобы рассматривать их оптимальную организацию независимо.

Формулировку задачи оптимальной организации на макроуровне для обоих случаев можно представить следующим образом:

$$H_M = -\sum_i^Z n_i \ln n_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\sum_i^Z n_i = 1, \quad (2)$$

$$\sum_i^z n_i \langle U_i \rangle = \langle U_c \rangle, \quad (3)$$

где H_M – макроэнтропия, Z – число преобразований технологического потока в элементах системы или камерах печи, n_i – весовой коэффициент i -го превращения в виде вероятности флуктуации математического ожидания энергии (в статике равно среднему значению энергии в i -м превращении), которое определяется его эквивалентным температурным уровнем [7]:

$$n_i = \exp\left(-\frac{C_{vi}(T_\varepsilon)}{2RT_\varepsilon^2} \Delta T_{\varepsilon i}^2\right), \quad (4)$$

где C_{vi} – средняя теплоемкость при постоянном объеме, кДж/(кмоль·К), рассчитанная при средней температуре системы как единого целого; RT_ε – уровень энергии ХТС в целом (может быть принят равным уровню окружающей среды), R – мольная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К).

Термин “эквивалентный” введен для газодинамических процессов, сопровождающихся как изменением температуры, так и давления. Оценку эквивалентных температурных уровней проводят на основании зависимости [7]:

$$\Delta T_{\varepsilon i} = \varepsilon_i \Delta T_{Ti} \left(1 - \frac{R}{C_{pi}} \ln \frac{p_{ni}}{p_{ki}}\right), \quad (5)$$

где ε_i – мольная доля потока до смесителя или после сепаратора, p_k, p_n – конечное и начальное давление в газодинамическом процессе, C_{pi} – средняя мольная теплоемкость при постоянном давлении, ΔT_{Ti} – средний логарифмический температурный уровень i -го процесса.

Задачей нижнего иерархического уровня (микроуровня) в блок-схеме алгоритма оптимальной организации ХТС (рис. 1) является определение параметров двухкамерной нагревательной печи в соответствии с данными оптимальной организации, полученными на макроуровнях.

Представим методику оптимальной организации сложных ХТС на примере системы с двухкамерной нагревательной печью.

Максимизации макроэнтропии вида (1) соответствует симметричный вид диаграммы распределения эквивалентных температурных уровней. Под симметричным видом диаграммы распределения будем понимать равенство эквивалентных температурных уровней, условно объединенных в обобщенные источник и сток, которые разделяют диаграмму на две части.

При этом в соответствии с нулевым началом термодинамики задача оптимальной организации системы на макроуровне заключается в максимизации макроэнтропии системы за счет минимизации рассогласования эквивалентных температурных уровней обобщенных источника и стока вплоть до сведения его к нулю.

Расчет эквивалентных температурных уровней обобщенных источника или стока проводится на основании зависимости [7]:

$$\Delta T_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_i^L \alpha_i \Delta T_{\varepsilon i}^2}{L}}, \quad (6)$$

где $\Delta T_{\varepsilon i}$ – эквивалентный температурный уровень i -го процесса согласно (5), L – число технологических процессов, объединенных

в обобщенный источник (сток), $\alpha_i = C_{vi}/R$ – безразмерный коэффициент.

Поскольку двухкамерная нагревательная печь представляет минимальный фрагмент системы с иерархической структурой, то есть в данном случае подсистему, то задача максимизации макроэнтропии имеет смысл и на уровне двухкамерной нагревательной печи.

В этом случае выражение (5) для эквивалентных температурных уровней для камер печи (поскольку отсутствуют газодинамические процессы) можно представить в виде:

$$\Delta T_{zi} = \varepsilon_i \Delta T_{Ti}, \quad (7)$$

где ε_i – мольная доля потока дымовых газов в i -й камере печи; ΔT_{Ti} – значение средней температуры дымовых газов в i -й камере печи, полученное, например, в ходе расчета математической модели.

Для сохранения требуемого масштаба вычисления эквивалентных температурных уровней мольная доля потока с максимальным расходом дымовых газов принимается за 1. В существующих конструкциях двухкамерных нагревательных печей мольные доли потоков дымовых газов по камерам, как правило, одинаковые и равны соответственно 1.

Для построения диаграммы распределения эквивалентных температурных уровней система с нагревательной печью как единым тепловым агрегатом была смоделирована в программной среде ChemCad.

На рис. 2 представлена расчетная схема объекта.

В соответствии с представленной расчетной схемой (рис. 2) на диаграмме распределения эквивалентных температурных уровней должно

быть отображено пять процессов: 1 – нагнетание воздуха (элемент 1), 2 – подогрев воздуха в рекуператоре (элемент 2), 3 – сгорание топлива в смеси с воздухом (элементы 3–5), 4 – нагревание нефти в печи как едином тепловом агрегате (элементы 7 и 8) и 5 – использование теплоты дымовых газов на выходе из печи для подогрева воздуха (поток 14).

В работе акцент сделан на связи двух макроэкономических уровней, то есть на совмещении тенденции оптимального расположения эквивалентного температурного уровня печи как единого теплового агрегата (элемента системы) с тенденцией оптимального расположения эквивалентных температурных уровней по камерам печи.

При этом для построения диаграммы эквивалентных температурных уровней по камерам нагревательной печи была разработана математическая модель двухкамерной печи трубчатого типа с заданными конструкционными параметрами.

Основные допущения при разработке модели сводились к следующим:

процесс считается стационарным;

процесс сгорания топлива является мгновенным;

в отопительных простенках камер радиации и конвекции принята модель идеального смешения (по дымовым газам);

в трубных пучках камер радиации и конвекции принята модель идеального вытеснения (по нагреваемому сырью – нефти);

потери теплоты в окружающую среду пренебрегаем.

Расчет теплового баланса для трубного сегмента длиной dx проводился в соответствии со следующими соотношениями:

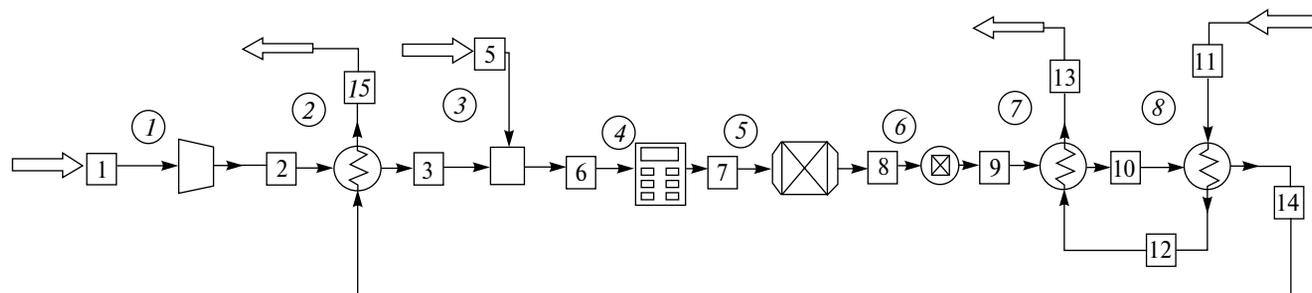


Рис. 2. Расчетный вариант системы с печью и рекуператором в программе ChemCad.

Элементы представлены номерами в кружочках, потоки – номерами в квадратах. Потоки на входе и выходе: 1 – воздух; 5 – мазут; 11 – сырая нефть; 13 – подогретая нефть в колонну; 15 – дымовые газы в атмосферу. Элементы: 1 – компрессор; 2 – рекуператор; 3 – смеситель; 4 – модуль-калькулятор для расчета сгорания мазута; 5 – реактор Гиббса; 6 – модуль для расчета температуры; 7 – камера радиации печи; 8 – камера конвекции печи.

$$\begin{aligned}
 dQ &= \alpha(T - T_{\text{ст1}})\pi d_{\text{н}} dx = \\
 &= \frac{2\lambda}{d_{\text{н}} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}}} (T_{\text{ст1}} - T_{\text{ст2}})\pi d_{\text{н}} dx = \\
 &= \alpha_{\text{нефть}} \frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{н}}} (T_{\text{ст2}} - T_{\text{нефть}})\pi d_{\text{н}} dx = \\
 &= G_{\text{нефть}} C_{p,\text{нефть}} dT_{\text{нефть}}.
 \end{aligned} \quad (8)$$

При этом зависимость температуры сырья по длине трубного участка dx выражается соотношением:

$$\begin{aligned}
 \alpha(T - T_{\text{ст1}})\pi d_{\text{н}} &= \frac{2\lambda}{d_{\text{н}} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}}} (T_{\text{ст1}} - T_{\text{ст2}})\pi d_{\text{н}} = \\
 &= \alpha_{\text{нефть}} \frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{н}}} (T_{\text{ст2}} - T_{\text{нефть}})\pi d_{\text{н}} = \\
 &= G_{\text{нефть}} C_{p,\text{нефть}} \frac{dT_{\text{нефть}}}{dx}.
 \end{aligned} \quad (9)$$

В приведенных выше соотношениях принято: Q – поток теплоты от дымовых газов к нагреваемому сырью; T , $T_{\text{нефть}}$ – температуры дымовых газов и нефти соответственно, К; $T_{\text{ст1}}$ и $T_{\text{ст2}}$ – температуры стенки со стороны дымовых газов и нефти соответственно, К; α – коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке; $d_{\text{вн}}$, $d_{\text{н}}$ – внутренний и внешний диаметр труб змеевика, м; λ – теплопроводность труб змеевика, Вт/(м·К); $\alpha_{\text{нефть}}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки к нефти, Вт/(м²·К); x – координата длины змеевика, м; $G_{\text{нефть}}$, $C_{p,\text{нефть}}$ – расход (кг/с) и теплоемкость нефти (Дж/(кг·К)) соответственно.

При определении температур стенки $T_{\text{ст1}}$ и $T_{\text{ст2}}$ можно воспользоваться методом простых итераций.

В вычислительных экспериментах принято, что механизмами теплоотдачи в камере радиации являются конвекция и излучение, а в камере конвекции – только конвекция.

Общий коэффициент теплоотдачи α можно рассчитать следующим образом [8]:

$$\alpha(T, G_{\text{дг}}) = 1.1(\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}), \quad (10)$$

где $G_{\text{дг}}$ – расход дымовых газов; $\alpha_{\text{к}}$ и $\alpha_{\text{л}}$ рассчитываются при средней температуре дымовых газов [Вт/(м²·К)].

Методика расчета коэффициентов теплоотдачи конвекцией заимствована из работы [8].

Для расчета коэффициентов теплоотдачи излучением использовалась формула Шака, аппроксимирующая большой массив экспериментальных данных по печам радиационного типа [9].

$$\begin{aligned}
 \alpha_{\text{CO}_2}^{изл} &= \frac{4.1868 \cdot 8.9\epsilon}{3600(T - T_{\text{ст1}})} (p_{\text{CO}_2} S_{\text{эф}})^4 \times \\
 &\times \left[\left(\frac{T}{100} \right)^{3.2} - \left(\frac{T_{\text{ст1}}}{100} \right)^{3.2} \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^{0.65} \right],
 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{\text{H}_2\text{O}}^{изл} &= \frac{4.1868 \cdot \epsilon}{T - T_{\text{ст1}}} (40 - 73 p_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}}) (p_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}})^{0.6} \times \\
 &\times \left[\left(\frac{T}{100} \right)^{2.32 + 1.37 \sqrt[3]{p_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}}}} - \left(\frac{T_{\text{ст1}}}{100} \right)^{2.32 + 1.37 \sqrt[3]{p_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{эф}}}} \right],
 \end{aligned} \quad (12)$$

где p_{CO_2} , $p_{\text{H}_2\text{O}}$ – парциальные давления диоксида углерода и водяных паров соответственно; $S_{\text{эф}}$ – эффективная длина лучей, рассчитанная по среднему диаметру, м: $S_{\text{эф}} = d_{\text{экв}} \cdot \eta_{\text{S}}$; η_{S} – коэффициент, характеризующий долю излучения, достигающую стен (принимается равным 0,9); $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр камеры радиации.

Общий коэффициент излучения определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha_{\text{CO}_2}^{изл} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}}^{изл}. \quad (13)$$

Для сравнения полученных оптимальных тенденций в изменении положений эквивалентных температурных уровней по камерам печи дополнительно проводился эксергетический анализ печи с целью оценки суммарных потерь эксергии по камерам.

Методика эксергетического анализа заимствована из работы [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении вычислительных экспериментов полагалось, что в нагревательной печи в качестве топлива используется мазутная фракция следующего состава (табл. 1). Пар на сгорание не подается.

Также принимается, что в печи нагревается сырая нефть в количестве 60000 кг/ч, обладающая следующими свойствами: плотностью

Таблица 1. Химический состав топлива (мас. %)

C ^r	H ^r	O ^r	N ^r	S ^r	A ^p	W ^p	Сумма
87.4	11.2	0.5	0.4	0.5	0.2	3.0	100

31.9 API (864.24 кг/м³), вязкостью 0.007605 Па·с и теплопроводностью 0.0981 Вт/(м·К), что соответствует легкой нефти.

Температура нефти на входе была принята равной 50°C. В зависимости от технологии переработки нефть может подогреваться в диапазоне температур от 300 до 500°C. Для печи принятой конструкции количество змеевиков в камерах радиации и конвекции равно 2.

Согласно работе [11], штатное распределение тепловых нагрузок между камерами радиации и конвекции лежит в пределах: 60–80% от общей тепловой нагрузки приходится на камеру радиации, остальное – на камеру конвекции.

На основании данных технологического расчета в программной среде ChemCad была построена исходная диаграмма распределения эквивалентных температурных уровней системы с печью как единым тепловым агрегатом (рис. 3).

Масштабное представление диаграммы распределения эквивалентных температурных уровней в системе (подсистеме) в соответствии с формулой (5) связано с определенным масштабом энергии в распределении Больцмана [12], которое используется для оценки весовых коэффициентов преобразований.

Объединим первые три эквивалентных температурных уровня (сжатие в компрессоре, подогрев в рекуператоре и процесс сгорания топлива), на которых энергия запасается, в обобщенный источник, а последние два эквивалент-

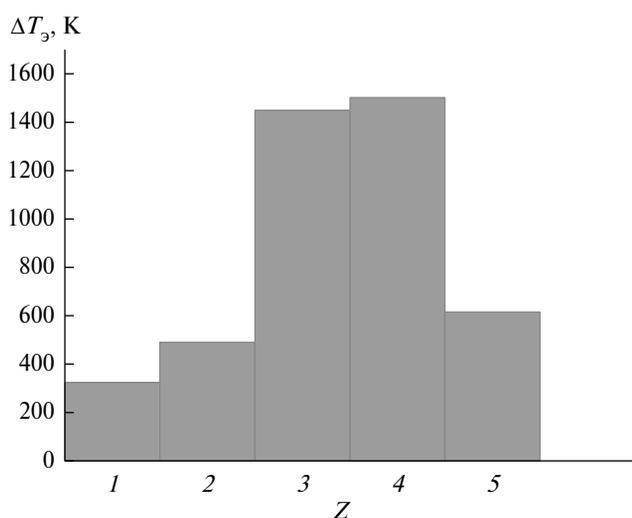


Рис. 3. Диаграмма распределения эквивалентных температурных уровней в системе с нагревательной печью как единым тепловым агрегатом (в масштабе 1 кмоль).

1 – сжатие воздуха; 2 – подогрев воздуха в рекуператоре; 3 – сгорание топлива с воздухом; 4 – подогрев нефти; 5 – охлаждение дымовых газов в рекуператоре; Z – количество преобразований потока.

ных температурных уровня (подогрев нефти и использование теплоты дымовых газов для подогрева воздуха), на которых энергия расходуется – в обобщенный сток.

Расчет эквивалентных температурных уровней обобщенных источника и стока, согласно (6), показал, что эквивалентный температурный уровень обобщенного источника равен 1776 К, а обобщенного стока – 2099 К, то есть исходная диаграмма несимметрична, что позволяет установить тенденции изменения положений эквивалентных температурных уровней процессов при стремлении ее к более симметричному виду.

Из анализа диаграммы распределения эквивалентных температурных уровней системы в целом можно заключить, что необходимо стремиться к повышению эквивалентного температурного уровня обобщенного источника и снижению эквивалентного температурного уровня обобщенного стока, что должно привести к перераспределению энергии в системе.

Опуская интерпретацию изменения положений всех эквивалентных температурных уровней в системе с печью, остановимся на реализации стратегии, объединяющей верхний и нижний макроскопические уровни.

Для этого рассмотрим тенденцию к повышению симметричности диаграммы (рис. 3) только за счет изменения эквивалентного температурного уровня печи как единого теплового агрегата, который должен определенным образом корреспондироваться с изменением положений эквивалентных температурных уровней по камерам печи как подсистемы с иерархической макроскопической структурой.

Принимая во внимание, что эквивалентный температурный уровень нагревательной печи (уровень 4) входит в обобщенный сток, то в соответствии с оптимальной тенденцией его изменения этот уровень должен снижаться.

На диаграмме (рис. 4) представлена диаграмма распределения эквивалентных температурных уровней по камерам печи, построенная на основе данных расчета математической модели.

В рамках анализа оптимальной организации печи как подсистемы с иерархической структурой следует иметь в виду, что нагревательная печь должна выполнять определенную регламентом технологическую функцию подогрева заданного количества нефти в пределах указанных температур, поэтому снижение ее эквивалентного температурного уровня как единого теплового агрегата возможно только путем перераспределения энергии между ее камерами, которое в технологическом аспекте может быть

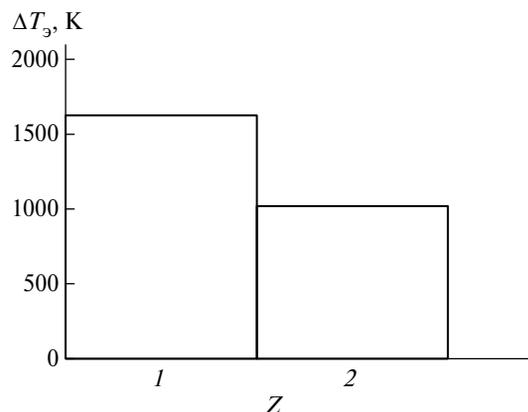


Рис. 4. Диаграмма распределения эквивалентных температурных уровней в двухкамерной печи (в масштабе 1 кмоль); I – радиационная камера; 2 – конвекционная камера, Z – количество преобразований потока.

обеспечено изменением топологических и (или) конструктивных параметров.

Следствием достижения максимума макроэнтропии для подсистемы, представленной двухкамерной нагревательной печью, будет условие равенства эквивалентных температурных уровней, согласно (7), по камерам печи, что соответствует достижению равновесия в данной подсистеме согласно нулевому началу термодинамики.

Можно показать, что равенство эквивалентных температурных уровней по камерам печи, согласно выражению (6), по свойству средней квадратичной величины, приводит к снижению эквивалентного температурного уровня печи как единого теплового агрегата. Таким образом, оптимальные условия, полученные для печи в целом, исходя из оптимальной ее организации в системе, строго корреспондируются с условиями оптимальной организации печи как подсистемы с иерархической структурой.

В качестве дополнительного обоснования полученных результатов по оптимальной организации двухкамерной нагревательной печи можно привести данные потерь эксергии по камерам и общих потерь эксергии, полученные в результате вычислительных экспериментов, на основании

методики эксергетического анализа, представленной в работе [10] (табл. 2).

В системах с нагревательными печами радиационно-конвекционного типа наблюдается отсутствие оптимального согласования элементов, которое приводит к снижению энергоэффективности печных агрегатов, ввиду завышенных суммарных потерь работоспособной энергии (эксергии).

Обеспечить оптимальное согласование элементов в системе возможно, в частности, путем снижения эквивалентного температурного уровня печи как единого теплового агрегата, которое, в свою очередь, может быть обеспечено сближением эквивалентных температурных уровней по камерам печи, что предполагает снижение нагрузки на камеру радиации и увеличение нагрузки на камеру конвекции.

Как показали расчеты эксергетического баланса, в случае сближения эквивалентных температурных уровней по камерам печи, вплоть до их равенства, суммарные потери эксергии снижаются, что обеспечивает повышение показателей ее энергоэффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы.

Предложен алгоритм оптимальной организации ХТС, иерархическая структура которых имеет несколько макроскопических уровней, предполагающих решение задачи согласно стратегии сверху-вниз: от верхних к нижним макроскопическим уровням и далее к микроуровню.

В основу алгоритма положено многоуровневое информационное описание иерархической структуры сложных систем, организация макроуровней которых основана на оптимальном распределении весовых коэффициентов процессов в соответствии с нулевым началом термодинамики как на уровне системы в целом, так и на уровне подсистем с иерархической структурой.

Таблица 2. Данные баланса эксергии по двухкамерной печи

Исходный вариант		Оптимальный вариант	
ΔE_k , МДж/ч	5186.07	ΔE_k , МДж/ч	5311.77
ΔE_p , МДж/ч	15939.92	ΔE_p , МДж/ч	14506.05
Суммарные потери эксергии, МДж/ч	21125.99	Суммарные потери эксергии, МДж/ч	19817.82

Примечание. При расчете термической эксергии принято, что сгорание мазута происходит мгновенно, в силу чего температура дымовых газов на входе в камеру радиации принята равной теоретической температуре горения; ΔE_k – потери эксергии в камере конвекции; ΔE_p – потери эксергии в камере радиации.

Достижение максимума критерия макроэнтропии приводит к симметричному виду диаграммы распределения эквивалентных температурных уровней или равенству обобщенных эквивалентных температурных уровней, условно объединенных в обобщенные источник и сток, которое в задачах оптимизации ХТС может рассматриваться как предел, к которому следует стремиться.

На примере системы с двухкамерной нагревательной печью радиационно-конвекционного типа показано, что тенденции оптимальной организации на верхнем и нижнем макроуровнях согласуются, что отражается, с одной стороны – в сближении эквивалентных температурных уровней обобщенных источника и стока на уровне оптимальной организации системы с печью в целом, а с другой – в равенстве эквивалентных температурных уровней по камерам печи.

На основании анализа потерь эксергии в двухкамерной нагревательной печи было установлено, что при достижении оптимального соотношения между эквивалентными температурными уровнями по камерам печи потери эксергии минимальны, что способствует повышению показателей ее энергоэффективности как единого теплового агрегата.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

α	коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К); безразмерный коэффициент
ε	молярная доля потока; степень черноты
η_s	коэффициент доли излучения
λ	теплопроводность, Вт/(м·К)
ω	скорость потока, м/с
$Cp(Cv)$	теплоемкость, кДж/(кмоль·К)
ΔE	потери эксергии, МДж/ч
d	диаметр, м
G	расход, кг/с
H	энтропия информации
L	число преобразований, объединенных в обобщенный источник (сток)
n	вероятность флуктуации среднего энергетического уровня
p	давление (парциальные давления), МПа (атм)
Q	количество тепла, Вт
R	универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К)
$S_{эф}$	эффективная длина лучей, м
T	температура, К
ΔT	уровень температурной флуктуации, К

U	внутренняя энергия, кДж/кмоль
x	координата по длине змеевика, м
Z	число преобразований потока

ИНДЕКСЫ

1	значение на входе
2	значение на выходе
CO ₂	диоксид углерода
H ₂ O	водяной пар
i	индекс (процесса, состояния, камеры)
вн	внутренний
г	горючая масса
дг	дымовые газы
к	конвективный; конечный
л	лучистый
м	макроскопический
н	внешний (наружный); начальный
нефть	подогреваемое сырье (нефть)
р	радиантный; рабочая масса
ст	стенка
т	температурный
э	эквивалентный
эф	эффективный

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Naletov V.A., Glebov M.B., Ravichev L.V. and Naletov A.Yu.* Optimal Organization of Complex Processes in Chemical Engineering Using General Systems Theory // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2023. V. 57. № 2. P. 456. [*Налетов В.А., Глебов М.Б., Равичев Л.В., Налетов А.Ю.* Оптимальная организация сложных химико-технологических объектов на основе общей теории систем // *Теорет. основы хим. технологии.* 2023. Т. 57. №2. С.141].
2. *Naletov V.A.* Exergy Analysis of Commercial Carbon Dioxide Production from Flue Gases in a Trigeneration Power Plant // *Coke and Chemistry.* 2019. V. 62. № 10. P. 481. [*Налетов В.А.* Эксергетический анализ получения товарного диоксида углерода из дымовых газов в энергоблоке тригенерации // *Кокс и химия.* 2019. № 10. С. 45].
3. *Широков В.А., Сурков В.В.* Совершенствование топливно-энергетического баланса нефтеперерабатывающих предприятий // *Деловой журнал Neftegaz.ru.* 2018. № 4. С. 40.
4. *Zhidkov A.B.* Energy efficiency of tube-furnace operation // *Chem. and Technol. Fuels and Oils.* 2013. V. 49. P. 125.
5. *Жидков А.Б., Герасимов Д.П., Денисов Д.Е.* Трубчатые печи нефтепереработки и нефтехимии. СПб.: Арт Проект, 2015.

6. *Masoumi M.E., Izakmehri Z.* Improving of Refinery Furnaces Efficiency Using Mathematical Modeling // International Journal of Modeling and Optimization. 2011. V. 1. №. 1. P. 74.
7. *Налетов В.А., Глебов М.Б., Налетов А.Ю.* Оптимальная организация химико-технологической системы на основе макроскопического ее описания с позиции теории информации // Химическая технология. 2014. Т. 15. № 5. С. 315.
8. *Белоконь Н. И.* Аналитические основы теплового расчета трубчатых печей. // Нефтяная промышленность. 1941. № 2.
9. Справочник коксохимика. Т. V. Автоматика, паротеплоснабжение, ремонтная служба. М.: Металлургия. 1966.
10. *Шаргут Я., Петела Р.* Эксергия. М.: Энергия. 1968.
11. *Ахметов С.А., Сериков Т.П., Кузеев И.Р., Баязитов М.И.* Технологии и оборудование процессов переработки нефти и газа. СПб.: Недра. 2006.
12. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. М.: Наука. 1964.