

И. И. Емельянов, А. С. Сильвестрова, Н. Н. Зиятдинов

О МЕТОДЕ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕНА СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА

Ключевые слова: химико-технологические системы, синтез систем, тепловая интеграция, нефтехимия, нефтепереработка, системы теплообмена, рекуперация тепла, пинч-анализ, моделирование, оптимизация.

Рассматривается метод оптимального, автоматизированного технологического проектирования систем теплообмена, позволяющий свести исходную задачу смешанного нелинейного программирования к матричному виду, удобному для организации декомпозиционного синтеза. Исходную задачу предлагается разбивать на последовательность задач нелинейного программирования поиска частных экономических оценок на организацию теплообмена двух потоков различного энергетического потенциала при фиксированном наборе группы управляющих переменных, линейного программирования поиска оптимальной топологии как комбинации оптимальных структурных элементов, и нелинейного программирования поиска нового приближения для вектора фиксируемых переменных. Решение задачи основано на построении строгой избыточной модели системы теплообмена, включающей все возможные варианты построения технологической схемы. Алгоритм решения задачи построен в виде программного сопряжения пакета технологического моделирования Aspen Plus/Aspen Hysys, универсального математического пакета Matlab посредством COM/ActiveX. Вывод промежуточных и конечных результатов организуется в виде матриц смежности и достижимости в MS Excel и в виде схем PFD через графический интерфейс Unity. Предлагаемый метод, алгоритм и программный комплекс апробированы на ряде модельных примеров, включая технологические установки химии, нефтехимии и нефтегазопереработки. Достигнутые результаты приближаются к предельным оценкам потенциала энергосбережения, полученных методом пинч-анализа. Полученные решения превосходят полумпирические методы пинч-проектирования и методы интегрального синтеза, но качество решения зависит от начального приближения в пространстве множества экстремумов критерия оптимальности – суммы приведенных капитальных и операционных затрат. Для дальнейшего снижения числа локальных минимумов предлагается определять начальное приближения посредством однократной реализации транспортной задачи с промежуточными пунктами, в которой в качестве целевой функции используются суммарные затраты на горячие и холодные утилиты.

I. I. Emel'yanov, A. S. Silvestrova, N. N. Ziyatdinov

ON THE METHOD OF STRUCTURAL-PARAMETRIC OPTIMIZATION OF HEAT EXCHANGE SYSTEMS OF COMPLEX STRUCTURE WITH HEAT RECOVERY

Keywords: chemical-technological systems, system synthesis, thermal integration, petrochemistry, oil refining, heat exchange systems, heat recovery, pinch analysis, modeling, optimization.

The method of optimal, automated technological design of heat exchange systems is considered, which allows to reduce the initial problem of mixed nonlinear programming to a matrix form convenient for organization of decomposition synthesis. The initial problem is proposed to be divided into a sequence of tasks of a non-linear programming of search of private economic evaluations on the organization of heat exchange of two flows of different energy potential at a fixed set of a group of control variables, linear programming of search of optimum topology as a combination of optimum structural elements, and non-linear programming of search of a new approximation for the vector of fixed variables. The solution of the problem is based on the construction of a rigorous redundant model of the heat exchange system including all possible variants of the technological scheme construction. The algorithm for solving the problem is built in the form of program conjugation of technological modeling package Aspen Plus/ Aspen Hysys, universal mathematical package Matlab using COM/ActiveX. Output of intermediate and final results is organized in the form of adjacency and reachability matrices in MS Excel and in the form of PFD diagrams through the graphical interface Unity. The proposed method, algorithm and program complex are tested on a number of model examples, including process plants of chemistry, petrochemistry, oil and gas refining. The reached results approach the ultimate estimates of the energy saving potential obtained by the pinch-analysis method. The received solutions are superior to semi-empirical pinch design methods and integral synthesis methods, but the quality of the solution depends on the initial estimate in the range of extremums of the optimality criterion - the amount of capital and operating costs normalized to the same value. To reduce the number of local minimums further, it is proposed to determine the initial estimates by means of a one-time realization of a transportation problem with intermediate points, in which the total costs of hot and cold utilities are used as the target function.

Введение

Задача структурно-параметрической оптимизации систем теплообмена не теряет свой актуальности из-за сложного комбинаторного характера, множества нелинейных ограничений математических моделей технологического оборудования, и, как следствие, множества

экстремумов целевой функции – суммарных приведенных капитальных и эксплуатационных затрат. Анализ современного состояния вопросов в области синтеза оптимальных систем теплообмена, проведенный Klemeš и Kravanja [1], показывает, что перспективными направлениями совершенствования методик автоматизированного технологического проектирования являются комбинированные

алгоритмы, сочетающие в себе термодинамический и алгоритмический подходы, а также использование методов стохастического программирования. Комбинированный подход позволяет получать неплохие решения, но из-за эвристической природы пинч-метода проектирования, эти результаты не могут рассматриваться в качестве глобального экстремума. Стохастические алгоритмы [2-4] также не гарантируют глобальной оптимальности, а большая размерность задачи синтеза затрудняет их использование для поиска оптимального решения крупномасштабных проблем. Не теряют своей актуальности и алгоритмы, основанные на целевой или структурной декомпозиции исходной задачи [5-6], однако, в них составляющие этапы или элементы структуры часто определяют начальное приближение для последующего расчета, что, в сущности, может нарушить свойство эмерджентности при оптимизации системы. Интегральный подход [7] сводит процесс решения к оптимизации избыточной технологической системы, суперструктуры, что позволяет создать непрерывное пространство определяющих типоразмеров и режимов работы аппаратов. К сожалению, наличие множества экстремумов требует использования методов глобальной оптимизации, а они, в свою очередь, становятся непригодными для решения реальных производственных проблем. Использование методов дизъюнктивного программирования для упрощения суперструктур не решает этой проблемы.

Нами предлагается новый метод структурно-параметрической оптимизации, сочетающий в себе преимущества интегрального и декомпозиционного подходов. В основе метода лежит вариант структурной и целевой декомпозиции, разработанной нами избыточной технологической схемы системы теплообмена. В работах [8-9] ранее нами были рассмотрены варианты организации одностадийных, многостадийных систем, в работах [10-12] предложен вариант организации суперструктуры, учитывающий разделение

технологических потоков, в работе [13] исследуются вопросы синтеза с учетом неопределенности. В настоящей статье предлагаются варианты организации суперструктуры и метод синтеза, обобщающие ранее опубликованные подходы.

Экспериментальная часть

Для формализации метода оптимального, автоматизированного технологического проектирования систем теплообмена рассмотрим температурно-энтальпийную диаграмму (Рис. 1), используемую в методе пинч-анализа [14, 15]. Зона перекрытия горячей (красной) и холодной (синей) композитных кривых определяют предельное количество рекуперлируемой энергии. Для каждого q -го энтальпийного интервала, формируемого изменением суммы водяных эквивалентов по соответствующему температурному интервалу, может быть построена структурная схема (Рис. 2), определяющая организацию теплообмена i -го горячего или j -го холодного технологических потоков, в которой каждый блок характеризует теплообменный аппарат.

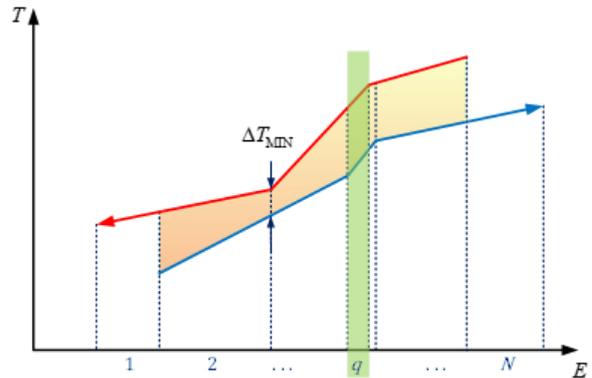


Рис. 1 – Температурно-энтальпийная диаграмма

Fig. 1 – Temperature-enthalpy diagram

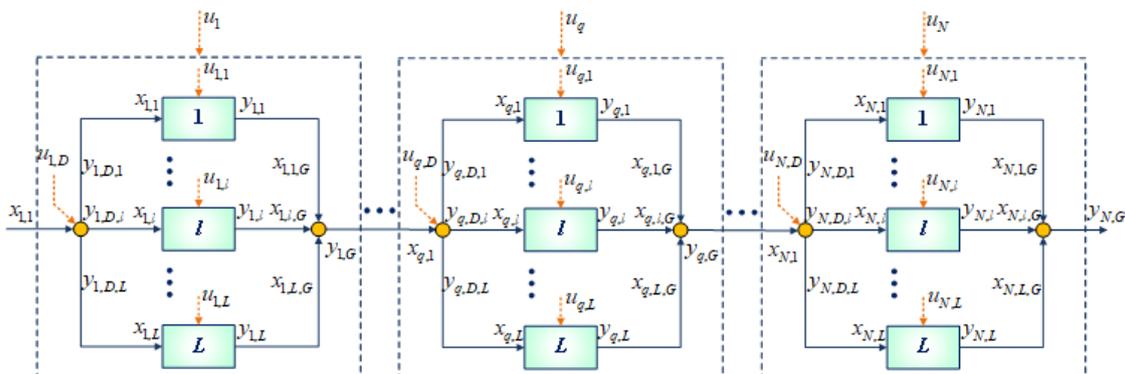


Рис. 2 – Организация связей для произвольного технологического потока в системе теплообмена (x-вектор входных, y-вектор выходных, u-вектор управляющих переменных)

Fig. 2 – Organization of links for an arbitrary process flow in the heat exchange system (x-vector of input, y-vector of output, u-vector of control variables)

На каждом q -ом интервале возможен теплообмен между l -ой частями i -го горячего или j -го холодного

потоков. В таком случае задача синтеза формулируется следующим образом: при известных

наборах параметров χ у технологических потоков необходимо найти такие значения набора управляющих переменных u , при которых функция суммарных приведенных капитальных и операционных затрат примет минимальное значение. Представим рассмотренную избыточную технологическую схему в матричном виде (Рис. 3). Для этого горизонтальными линиями обозначим горячие технологические потоки, вертикальными – холодные потоки системы. Приведенная суперструктура включает две области: матрицу рекуперативных теплообменников, изначально устанавливаемых на пересечении каждого горячего и холодного потоков, блок концевых нагревателей и холодильников, изначально устанавливаемых на выходе потоков из системы. На входе в систему на k -ом интервале на каждом i -м горячем и j -м холодном потоках устанавливаются делители потоков, а на выходе – смесители.

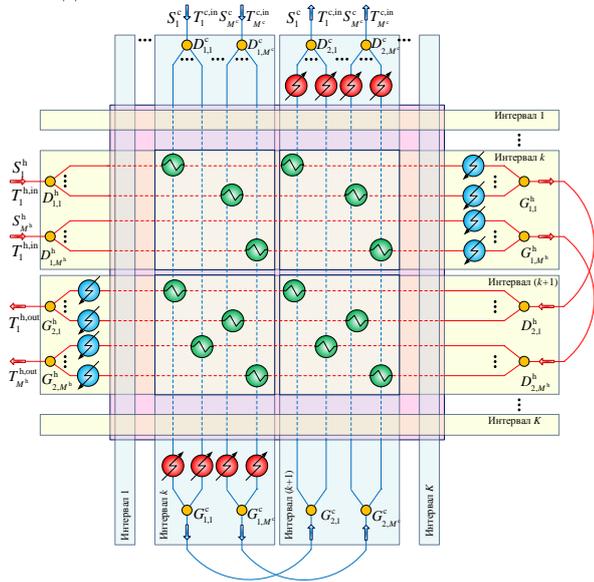


Рис. 3 – Матричное представление избыточной технологической схемы организации системы рекуперативного теплообмена

Fig. 3 – Matrix representation of the redundant technological scheme of organization of the regenerative heat exchange system

Из приведенной избыточной технологической схемы выделим элементарную структурную единицу – двухпоточную ячейку рекуперативного теплообмена i -го горячего или j -го холодного потоков (Рис. 4). Она включает рекуператор E_{ij} , концевые холодильник R_i и нагреватель B_j . При известных параметрах входных и выходных потоков задача оптимизации двухпоточной ячейки сводится к задаче нелинейного математического программирования. Однако для того, чтобы векторы параметров входных и выходных потоков были известны, необходимо зафиксировать некоторый набор переменных: коэффициенты деления потоков в делителях и коэффициенты распределения нагрузок по стадиям в многостадийной системе теплообмена. Тогда метод решения исходной задачи смешанного программирования можно представить в виде итерационной последовательности трех

локальных подзадач: 1) нелинейного программирования поиска частных экономических оценок на организацию теплообмена в каждой двухпоточной ячейке; 2) линейного программирования поиска оптимальной топологии в виде оптимальной комбинации двухпоточных ячеек; 3) нелинейного программирования поиска нового приближения для вектора фиксируемых переменных.

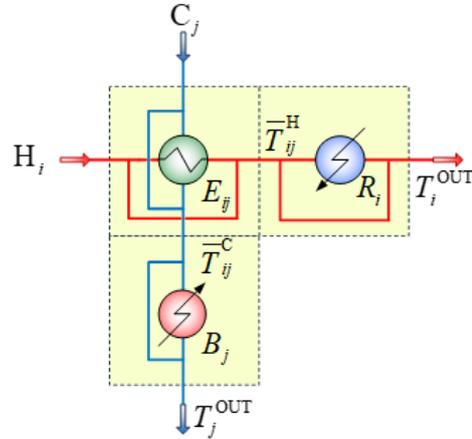


Рис. 4 – Избыточная схема двухпоточной ячейки системы рекуперативного теплообмена

Fig. 4 – Redundant circuit diagram of the two-flow cell of the regenerative heat exchange system

Задача нелинейного математического программирования поиска оптимальных локальных экономических оценок на организацию и режим работы двухпоточной ячейки формализуется в виде (1) - (9).

$$f_{ij}^{OPT} \min_{A_{ij}^{HE}, A_{ij}^{CLR}, A_{ij}^{HTR}, F_{ij,ncw}^{CU}, F_{ij,nhu}^{NU}} (f_{ij}^{HE}(A_{ij}^{HE}) + f_{ij}^{CLR}(A_{ij}^{CLR}, F_{ij,nhu}^{CU}) + f_{ij}^{HTR}(A_{ij}^{HTR}, F_{ij,nhu}^{HU})) \quad (1)$$

$$\forall i \in HS, \forall j \in CS$$

$$\varphi_{HE} \left(Q_{ij}^{HE}, T_i^{IN}, T_i^{OUT}, \bar{T}_{ij}^H, \bar{T}_{ij}^C, A_{ij}^{HE}, F_i \right) = 0 \quad (2)$$

$$\varphi_{CLR} \left(Q_{ij}^{CLR}, \bar{T}_{ij}^H, T_{ncu}^{CU,IN}, T_i^{OUT}, T_{ij,ncu}^{CU,OUT}, A_{ij}^{CLR}, F_i, F_{ij,ncu}^{CU}, cp_j, cp_{ij,ncu}^{CU}, U_{ij}^{HTR} \right) = 0, \quad (3)$$

$$\varphi_{HTR} \left(Q_{ij}^{HTR}, T_{ncu}^{HU,IN}, \bar{T}_{ij}^C, T_{ij,ncu}^{HU,OUT}, T_i^{OUT}, A_{ij}^{HTR}, F_{ij,ncu}^{HU}, F_i, F_{ij,ncu}^{CU}, cp_i, cp_{ij,ncu}^{HU}, U_{ij}^{HTR} \right) = 0, \quad (4)$$

$$Q_{ij}^{NHE} \geq 0, \forall NHE \in \Omega, \quad (5)$$

$$DT_1^{NHE} - \Delta T_{MIN} \geq 0, DT_2^{NHE} - \Delta T_{MIN} \geq 0, \forall NHE \in \Omega, \quad (6)$$

$$DT_1^{HE} = \Delta T_i^{IN} - \bar{T}_{ij}^C, DT_2^{HE} = \bar{T}_{ij}^H - \Delta T_i^{IN}, \quad (7)$$

$$DT_1^{CLR} = \bar{T}_{ij}^H - T_{ij,ncu}^{CU,OUT}, DT_2^{CLR} = T_i^{OUT} - T_{ncu}^{CU,IN}, \quad (8)$$

$$DT_1^{HTR} = T_{ncu}^{HU,IN} - T_i^{OUT}, DT_2^{HTR} = T_{ij,ncu}^{HU,OUT} - \bar{T}_{ij}^C, \quad (9)$$

$$\Omega = \{HE, CLR, HTR\}$$

где

HS = { i | i -ый горячий технологический поток, $i=1..HP$ };

CS = { j | j -ый горячий технологический поток, $j=1..CP$ };

$ST = \{q | q\text{-ая стадия суперструктуры, } q=1..N\}$;
 $BR = \{l | l\text{-ая часть потока в суперструктуре СТО, } l=1..L\}$;

T – температура, °C, F – массовый расход, кг/ч; cp – удельная изобарная теплоемкость, МВт ч/кг °C; Q – количество теплоты, тепловая нагрузка, МВт; HE – рекуперативный теплообменник; CLR – холодильник/конденсатор; A – площадь поверхности теплообмена, м²; U – коэффициент теплопередачи, МВт/ м² °C; HTR – нагреватель/кипятильник; HU – горячий энергоноситель (утилита); CU – холодный энергоноситель (утилита); IN – входное значение технологического параметра; OUT – выходное значение технологического параметра;

Задача линейного программирования поиска оптимальной топологии в виде оптимальной комбинации двухпоточных ячеек формализуется как задача о назначениях (10). Она имеет эффективные методы решения: симплекс-метод, Венгерский алгоритм.

$$\begin{aligned} \min \sum_{z_{l_i^q, l_j^q}} \sum_{i \in HS} \sum_{q_i \in ST} \sum_{l_i^q \in BR} \sum_{j \in CS} \sum_{q_j \in ST} \sum_{l_j^q \in BR} f_{l_i^q, l_j^q}^{OPT} z_{l_i^q, l_j^q}, \\ z_{l_i^q, l_j^q} \in \{0,1\}, \\ \sum_{i \in HS} \sum_{q_i \in ST} \sum_{l_i^q \in BR} z_{l_i^q, l_j^q} = 1, \\ \forall i \in CS, \forall q \in ST, \forall l \in BR \\ \sum_{j \in CS} \sum_{q_j \in ST} \sum_{l_j^q \in BR} z_{l_i^q, l_j^q} = 1, \\ \forall i \in CS, \forall q \in ST, \forall l \in BR \end{aligned} \quad (10)$$

где z – двоичные переменные, характеризующие наличие/отсутствие двухпоточных ячеек в оптимальной топологии системы;

Для оптимизации полученной системы теплообмена с целью нахождения новых приближений по фиксированным переменным решим задачу нелинейного программирования общего вида (11)-(25) методом Последовательного квадратичного программирования (SQP).

$$\Phi^{OPT} = \min_{\beta_{q_i}, \beta_{q_j}, \alpha_{l_i^q}, \alpha_{l_j^q}, Q_{l_i^q, l_j^q}^{HE}, \forall (l_i^q, l_j^q) \in Z} \Phi \quad (11)$$

$$\Phi^{HE} \left(Q_{ij}^{HE}, T_i^{IN}, T_j^{IN}, \bar{T}_{ij}^H, \bar{T}_{ij}^C, A_{ij}^{HE}, F_i, F_j, cp_i, cp_j, U_{ij}^{HE} \right) = 0, \quad (12)$$

$$\Phi^{CLR} \left(Q_{ij}^{CLR}, \bar{T}_{ij}^H, T_{ncu}^{CU,IN}, T_i^{OUT}, T_{ij,ncu}^{CU,OUT}, A_{ij}^{CLR}, F_i, F_{ij,ncu}^{CU}, cp_i, cp_{ij,ncu}^{CU}, U_{ij,ncu}^{CLR} \right) = 0, \quad (13)$$

$$\Phi^{HTR} \left(Q_{ij}^{HTR}, T_{n \square u}^{HU,IN}, \bar{T}_{ij}^C, T_{ij,n \square u}^{HU,OUT}, T_j^{OUT}, A_{ij}^{HTR}, F_{ij,n \square u}^{HU}, F_j, cp_{ij,n \square u}^{HU}, cp_j, U_{ij,n \square u}^{HTR} \right) = 0, \quad (14)$$

$$T_{q_j}^{IN} = T_j^{IN}, T_{q_i}^{IN} = T_i^{IN}, \forall i \in HS, \forall j \in CS, q = 1, \quad (15)$$

$$T_{q_j}^{OUT} = T_j^{OUT}, T_{q_i}^{OUT} = T_i^{OUT}, \quad (16)$$

$$\forall i \in HS, \forall j \in CS, q = N, T_{q_{j+1}}^{IN} = T_{q_j}^{OUT}, T_{q_{i+1}}^{IN} = T_{q_i}^{OUT}, \quad (17)$$

$$\forall i \in HS, \forall j \in CS, q = 1..(N-1), T_{l_j^q}^{IN} = T_{q_j}^{IN}, T_{l_i^q}^{IN} = T_{q_i}^{IN}, \quad (18)$$

$$\forall i \in HS, \forall j \in CS, \forall q \in ST, \forall l \in BR, \quad (18)$$

$$DT_1^{HE} = T_{l_i^q}^{IN} - \bar{T}_{l_i^q, l_j^q}, DT_2^{HE} = \bar{T}_{l_i^q, l_j^q} - T_{l_j^q}^{CU,IN}, \quad (19)$$

$$DT_1^{CLR} = \bar{T}_{l_i^q, l_j^q} - T_{l_j^q}^{CU,OUT}, \quad (20)$$

$$DT_2^{CLR} = T_{l_i^q}^{OUT} - T_{l_i^q}^{CU,IN}, \quad (20)$$

$$DT_1^{HTR} = T_{l_j^q}^{HU,IN} - T_{l_j^q}^{OUT}, \quad (20)$$

$$DT_2^{HTR} = T_{l_j^q}^{HU,OUT} - \bar{T}_{l_i^q, l_j^q}, \quad (20)$$

$$\forall (l_i^q, l_j^q) \in Z, \forall j \in HS, \forall j \in CS, \forall q \in ST, \forall l \in BR, \quad (21)$$

$$DT_1^{NHE} - \Delta T_{MIN} \geq 0, DT_2^{NHE} - \Delta T_{MIN} \geq 0, \quad (22)$$

$$\forall NHE \in \square, Q_{l_i^q, l_j^q}^{NHE} \geq 0, \forall NHE \in \square, \quad (22)$$

$$\forall (l_i^q, l_j^q) \in Z, \forall j \in HS, \forall j \in CS, \forall q \in ST, \quad (23)$$

$$\forall l \in BR, \Omega = \{HE, CLR, HTR\} 1 - \sum_{l_i^q} \alpha_{l_i^q} = 0, 1 - \sum_{q_i} \beta_{q_i} = 0, \quad (23)$$

$$\forall i \in HS, \forall q \in ST, \forall l \in BR, 1 - \sum_{l_j^q} \alpha_{l_j^q} = 0, 1 - \sum_{q_j} \beta_{q_j} = 0, \quad (24)$$

$$\forall j \in CS, \forall q \in ST, \forall l \in BR, \quad (25)$$

где Z – множество активных двухпоточных ячеек; α – коэффициент распределения тепловых нагрузок по стадиям теплообмена; β –коэффициент разделения технологических потоков по в делителе.

Алгоритм и программный комплекс

Алгоритм решения задачи реализуется в 5 шагов:

Шаг 1. Задаться нулевым приближением по фиксированным управляющим переменным:

$$\begin{aligned} \beta_{q_i}^{(0)}, q_i = 1..(N_i - 1), \forall i \in HS, \\ \beta_{q_j}^{(0)}, q_j = 1..(N_j - 1), \forall j \in CS, \\ \alpha_{l_i^q}^{(0)}, l_i^q = 1..(L_i^q - 1), \forall i \in HS, \forall q \in ST, \\ \alpha_{l_j^q}^{(0)}, l_j^q = 1..(L_j^q - 1), \forall j \in CS, \forall q \in ST, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \beta_{N_i}^{(0)} = 1.. \sum_{q_i=1}^{N_i-1} \beta_{q_i}^{(0)}, \forall i \in HS, \\ \beta_{N_j}^{(0)} = 1.. \sum_{q_j=1}^{N_j-1} \beta_{q_j}^{(0)}, \forall j \in CS, \\ \alpha_{L_i^q}^{(0)} = 1 - \sum_{l_i^q=1}^{L_i^q-1} \alpha_{l_i^q}^{(0)}, \forall i \in HS, \forall q \in ST, \\ \alpha_{L_j^q}^{(0)} = 1 - \sum_{l_j^q=1}^{L_j^q-1} \alpha_{l_j^q}^{(0)}, \forall j \in CS, \forall q \in ST, \end{aligned} \quad (27)$$

Шаг 2. Решить задачи оптимизации двухпоточных ячеек системы рекуперативного теплообмена для каждой совокупности i -го горячего или j -го холодного потоков.

Шаг 3. Решить задачу линейного программирования поиска оптимальной структуры системы теплообмена.

Шаг 4. Решением задачи оптимизации полученной структуры системы теплообмена найти новые приближения по фиксированным управляющим переменным.

Шаг 5. Если $|\Phi^{OPT, (k)} - \Phi^{OPT, (k-1)}| < \xi$, то конец работы алгоритма, иначе положить $k=k+1$ и перейти к Шагу 2.

Предлагаемый алгоритм реализован в виде программного сопряжения пакета технологического моделирования Aspen Plus/ Aspen Hysys, универсального математического пакета Matlab посредством технологии COM/ActiveX (Рис. 5). Вывод промежуточных и конечных результатов организован в виде матриц смежности и достижимости в MS Excel и в виде схем PFD через графический интерфейс Unity.

Предлагаемый алгоритм хоть и позволяет в общем случае получать лучшие результаты из-за снижения числа локальных экстремумов, однако, нуждается в реализации процедур, повышающих качество решения. Одну из таких процедур можно представить, как задачу локализации начальных приближений путем минимизации суммарных операционных затрат. Эта задача формализуется в

виде (27)-(33) как транспортная задача с промежуточными пунктами.

$$\min Z' = \sum_{\forall n \square u \in HUS} \hat{m}_{n \square u} \Delta E_{n \square u}^{HU} + \sum_{\forall ncu \in CUS} \hat{m}_{ncu} \Delta E_{ncu}^{CU} \quad (28)$$

$$\text{где } R_{i,k} - R_{i,k-1} + \sum_{\forall j \in CS_k} \Delta Q_{i,j,k}^{HE} + \sum_{\forall ncu \in CUS_k} \Delta Q_{i,ncu,k}^{COL} = \Delta E_{i,k}^H \quad \forall i \in HS, \forall k \in \mathfrak{R} \quad (29)$$

$$R_{nhu,k} - R_{nhu,(k-1)} + \sum_{\forall j \in CS_k} \Delta Q_{nhu,j,k}^{HE} - \Delta E_{nhu,k}^{HU} = 0 \quad \forall nhu \in HUS_i, \forall k \in \mathfrak{R} \quad (30)$$

$$\sum_{\forall j \in HS_k} \Delta Q_{i,j,k}^{HE} + \sum_{\forall nhu \in HUS_k} \Delta Q_{nhu,j,k}^{HTR} = \Delta E_{j,k}^C, \quad \forall j \in CS_k, \forall k \in \mathfrak{R}, \quad (31)$$

$$\sum_{\forall j \in HS_k} \Delta Q_{i,ncu,k}^{COL} - \Delta E_{ncu}^{CU} = 0, \quad \forall ncu \in CUS_k, \forall k \in \mathfrak{R} \quad (32)$$

$$R_{i,k}, R_{nhu,k}, Q_{i,j,k}^{HE}, Q_{nhu,j,k}^{HTR}, Q_{i,nhu,k}^{CLR}, \Delta E_{nhu,k}^{HU}, \Delta E_{ncu}^{CU} \geq 0, \quad (33)$$

$$R_{i,0} = R_{i,K} = 0 \quad (34)$$

Рассмотрим пример размерности 4Н-4С

(таблица 1)

Таблица 1 – Пример размерности 4Н-4С

Table 1 – Example of dimensionality 4Н-4С

Гор. поток	T_i^{in} , К	T_i^{out} , К	ΔE_i , кВт	α , кВт/м ² К	Хол. поток	T_j^{in} , К	T_j^{out} , К	ΔE_j , кВт	α , кВт/м ² К
H ₁	420	360	3,000	1.0	C ₁	340	380	2,400	1.0
H ₂	470	375	19,000	2.5	C ₂	365	430	7,800	1.0
H ₃	485	390	14,250	2.0	C ₃	395	450	5,500	1.0
H ₄	500	435	6,500	2.0	C ₄	410	465	22,000	1.0
HU	620	620		5.0	CU	300	315		1.0

В результате решения задачи синтеза с использованием предлагаемого алгоритма и метода интегрального синтеза SYNHEAT

получены альтернативные варианты организации системы теплообмена (рис. 5-6).

Сравнительный анализ полученных результатов (табл.2) показал, что предлагаемый алгоритм по своей эффективности значительно превосходит метод интегрального синтеза SYNHEAT.

Заключение

Прилагаемый вариант организации суперструктуры и метод синтеза характеризуются рядом преимуществ:

1. Целевая декомпозиция задачи позволяет в несколько раз сократить время нахождения оптимального решения задачи синтеза по сравнению с интегральным подходом к синтезу;

2. Вариант структурной декомпозиции задачи позволяет на шаге определения локальных экономических оценок рассматривать возможность использования различных типов теплообменников, а также горячих и холодных теплоносителей;

3. Задача автоматизированного технологического проектирования может быть легко адаптирована на случай реконструкции систем теплообмена технологических установок путем оценки в процессе оптимизации двухпоточной ячейки вариантов с существующем набором технологического оборудования;

Таблица 2 – Результаты синтеза оптимальной системы рекуперативного теплообмена

Table 2 – Results of synthesis of the optimal recuperative heat exchange system

Показатель	Предлагаемый алгоритм	SYNHEAT
Количество рекуперированной энергии, кВт	33376	28650
Количество подводимой энергии, кВт	4324	9050
Количество отводимой энергии, кВт	9374	14100
Число рекуператоров	6	5
Число нагревателей	2	2
Число холодильников	4	3
Эксплуатационные затраты, USD/г	508150	980750
Капитальные затраты, USD/г	128798	118164
Суммарные приведенные затраты, USD/г	636948	1098914

4. Предлагаемый метод дает лучшее решение, чем термодинамические алгоритмы, иные декомпозиционные алгоритмы, в которых не предусматривается необходимость

последовательного уточнения итерируемых переменных.

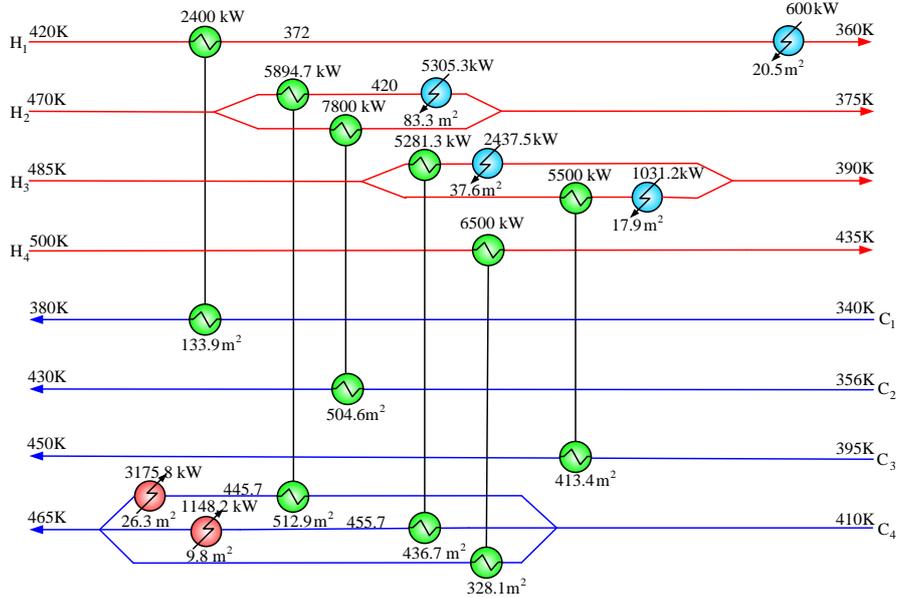


Рис. 5 – Система, синтезированная с использованием предлагаемого алгоритма

Fig. 5 – System synthesized using the proposed algorithm

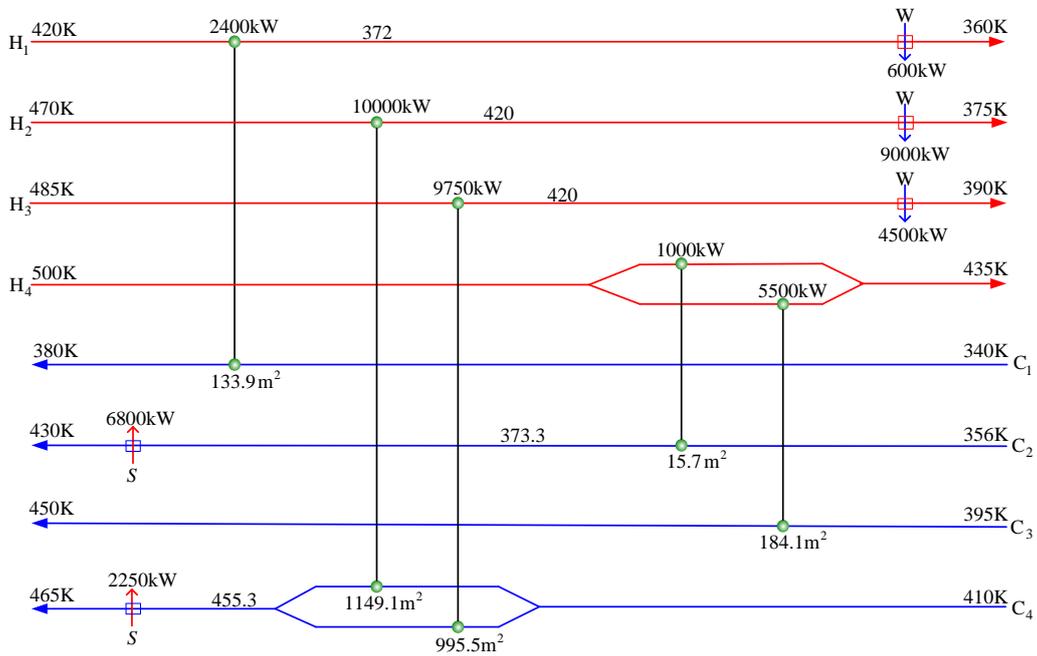


Рис. 6 – Система, синтезированная с использованием алгоритма DICOPT

Fig. 6 – System synthesized using the DICOPT algorithm

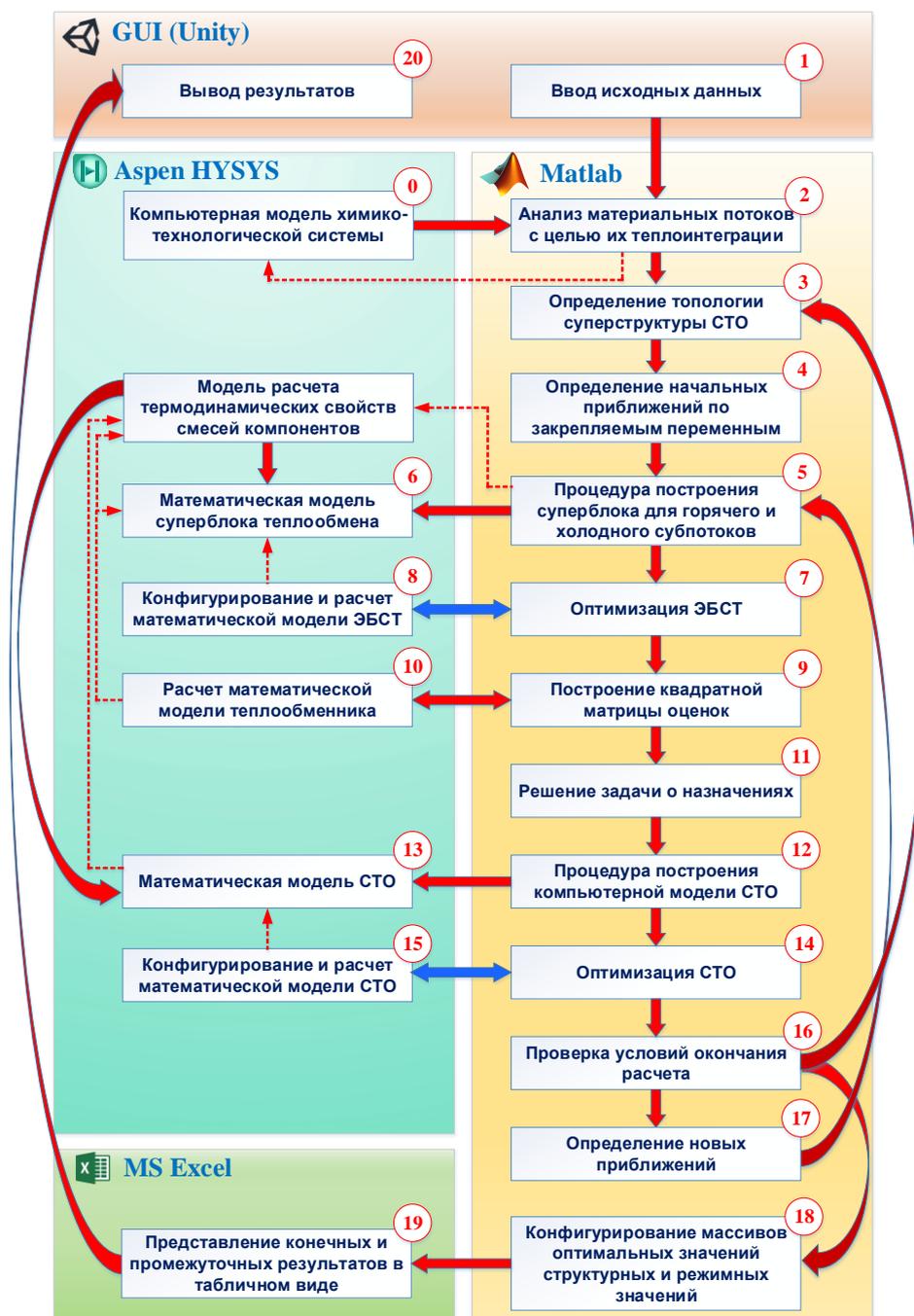


Рис. 7 – Укрупненный алгоритм решения задачи синтеза

Fig. 7 – Enlarged algorithm for solving the synthesis problem

Литература

1. Klemeš, J.J., Kravanja, Z., 2013. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 2 (4), 461.
2. Ravagnani, M.A.S.S., Silva, A.P., Arroyo, P.A., Constantino, A.A., *Appl. Therm. Eng.* 25 (7), 1003.
3. Ghiasvand, A., Fazlali, A.R., Ghiasi, T.S., Shoorehdeli, M.A., Mohammadi, A.H., 2014. *Advances in Energy Research*. Nova Science Publishers, Inc., USA 18.
4. Athier, G., Floquet, P., Pibouleau, L., Domenech, S., 1997. *AIChE J.* 43 (11), 3007.
5. Cerda, J., Westerberg, A.W. *Chem. Eng. Sci.* 38 (10), 1723–1740.
6. Papoulias, S.A., Grossmann, I.E., *Comput. Chem. Eng.* 7 (6), 707. Corpus ID: 32848777.
7. Yee, T.F., Grossmann, I.E., *Comput. Chem. Eng.* 14 (10), 1165. DOI:10.1016/0098-1354(90)85010-8.
8. Емельянов И.И., Зиятдинов Н.Н., Островский Г.М. / *Вестник технологического университета*. 2016, т.19, №17, с.132-137.
9. N.N. Ziyatdinov, I.I. Emel'yanov, T.V. Lapteva, A.A. Ryzhova, A.N. Ignat'ev, / *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020, т.54, в.2, с.144-162.
10. N.N. Ziyatdinov; I.I. Emel'yanov; Qi Chen; I.E. Grossmann / *Computers and Chemical Engineering*. 2020, т.142, в.107042.
11. I. I. Emel'yanov, N.N. Ziyatdinov, T. V. Lapteva, A. A. Ryzhova and R.V. Semin / *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021, т.55, в.6, с.1131-1149.
12. Ryzhova A., Emelyanov I., Ziyatdinov N., Khalirakhmanov Z. / *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021, в.342, с.335-345.

13. Lapteva T.V., Ziyatdinov N., Emelyanov I., Mitsai D.A. / *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021, в.342, с.323-334.
14. Linnhoff, B., Hindmarsh, E., *Chem. Eng. Sci.* 38, 745–763.
15. Trivedi, K.K., O'Neill, B.K., Roach, J.R., *Comput. Chem. Eng.* 1989, 13, 667–685.

References

1. Klemeš, J.J., Kravanja, Z., 2013. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 2 (4), 461.
2. Ravagnani, M.A.S.S., Silva, A.P., Arroyo, P.A., Constantino, A.A., *Appl. Therm. Eng.* 25 (7), 1003.
3. Ghiasvand, A., Fazlali, A.R., Ghiasi, T.S., Shoorehdeli, M.A., Mohammadi, A.H., 2014. *Advances in Energy Research*. Nova Science Publishers, Inc., USA 18.
4. Athier, G., Floquet, P., Pibouleau, L., Domenech, S., 1997. *AIChE J.* 43 (11), 3007
5. Cerda, J., Westerberg, A.W. *Chem. Eng. Sci.* 38 (10), 1723–1740.
6. Papoulias, S.A., Grossmann, I.E., *Comput. Chem. Eng.* 7 (6), 707. Corpus ID: 32848777
7. Yee, T.F., Grossmann, I.E., *Comput. Chem. Eng.* 14 (10), 1165. DOI:10.1016/0098-1354(90)85010
8. Emelyanov I.I., Ziyatdinov N.N., Ostrovsky G.M. / *Herald of Technological University*. 2016, V.19, №17, p.132-137.
9. N.N. Ziyatdinov, I.I. Emel'yanov, T.V. Lapteva, A.A. Ryzhova, A.N. Ignat'ev, / *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020, т.54, в.2, с.144-162.
10. N.N. Ziyatdinov; I.I. Emel'yanov; Qi Chen; I.E. Grossmann / *Computers and Chemical Engineering*. 2020, т.142, в.107042.
11. I. I. Emel'yanov, N.N. Ziyatdinov, T. V. Lapteva, A. A. Ryzhova and R.V. Semin / *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021, т.55, в.6, с.1131-1149.
12. Ryzhova A., Emelyanov I., Ziyatdinov N., Khalirakhmanov Z. / *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021, в.342, с.335-345.
13. Lapteva T.V., Ziyatdinov N., Emelyanov I., Mitsai D.A. / *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021, в.342, с.323-334.
14. Linnhoff, B., Hindmarsh, E., *Chem. Eng. Sci.* 38, 745–763.
15. Trivedi, K.K., O'Neill, B.K., Roach, J.R., *Comput. Chem. Eng.* 1989, 13, 667–685.

© **И. И. Емельянов** – к.т.н., доцент кафедры «Системотехника», Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, ilyaemelyan@gmail.com; **А. С. Сильвестрова** – старший преподаватель кафедры «Системотехника» КНИТУ, sensoriumsa@mail.ru; **Н. Н. Зиятдинов** – д.т.н., профессор кафедры «Системотехника» КНИТУ, nnziat@yandex.ru.

© **I. I. Emel'yanov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of System Engineering (SE), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, ilyaemelyan@gmail.com; **A. S. Silvestrova** – Senior Lecturer of the SE department, KNRTU, sensoriumsa@mail.ru; **N. N. Ziyatdinov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the SE department, KNRTU, nnziat@yandex.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 01.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 10.04.25.