#### МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» (СПбГТИ(ТУ))

\_\_\_\_\_\_

Кафедра системного анализа

В.К. Викторов И.В. Ананченко

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Методические указания

Викторов В.К., Ананченко И.В. - СПб.: изд. СПбГТИ (ТУ), 2015. - 25 с.

В методических указаниях лабораторной работе рассматриваются методы синтеза оптимальных систем теплообменников. Методические указания соответствует содержанию дисциплины «Современные проблемы системного анализа. Методы многокритериальной оптимизации» государственных образовательных стандартов. Позволяют формировать общепрофессиональные компетенции (СПК-2, ОПК-5) по направлению подготовки 09.04.01 Информатика и вычислительная техника и 27.04.03 Системный анализ и управление: владение методами и средствами получения, хранения, переработки и трансляции информации посредством современных компьютерных технологий, в том числе в глобальных компьютерных сетях; способность применять методы и средства анализа данных, математического моделирования и оптимизации, перспективные теоретические и экспериментальные методы исследования при разработке инновационных ИТ-проектов в промышленности..

Методические указания предназначены для магистров, аспирантов высших учебных заведений и могут быть использованы в системах непрерывного профессионального образования по технологиям, связанным с моделированием и оптимизацией химикотехнологических систем.

Рис. 9, табл. 5, библиогр. \_ назв. СПК-2, ОПК-5.

Рецензент: И.А. Смирнов заместитель декана факультета Информационных технологий и управления СПбГТИ(ТУ), к.т.н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и управления (САПРиУ)

Утверждено на заседании учебно-методической комиссии факультета информационных технологий и управления . .2015

Рекомендовано к изданию РИСо СПбГТИ (ТУ)

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Постановка задачи оптимального синтеза тепловой системы (ТС)	5
Алгоритм синтеза рекуперативной тепловой системы эвристическим мет	тодом
	8
Порядок выполнения работы	13
Синтез ТС комбинаторным методом	14
Порядок выполнения завершающей части работы:	17
Литература	18
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	18
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	21

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основной вид энергии, используемый в химико-технологических системах (XTC) – тепловая энергия. Высокая степень рекуперации тепловой энергии технологических потоков способствует значительному снижению капитальных и эксплуатационных затрат теплообменно-регенеративных систем.

Проектирование оптимальных тепловых систем (TC) — сложная комбинаторная задача, для которой количество альтернативных вариантов резко возрастает с увеличением числа технологических потоков. Решение задач определения оптимальных структур ТС простым перебором даже с применением современных компьютеров представляет существенные трудности. В связи с этим становится особенно актуальной разработка эффективных методов синтеза оптимальных тепловых систем.

В настоящее время наибольшее распространение получили комбинаторные и эвристические методы синтеза. Комбинаторные методы позволяют получить точное решение, но требуют больших затрат машинного времени. С помощью эвристических методов находят близкие к оптимальным структуры ТС. При этом из рассмотрения исключается большая часть альтернативных вариантов, что позволяет сократить затраты машинного времени, но не гарантирует нахождение точного решения.

Целью данной лабораторной работы — освоение методики синтеза оптимальных TC с использованием комбинаторных и эвристических методов.

# Постановка задачи оптимального синтеза тепловой системы (ТС)

В наиболее традиционной постановке задача синтеза формулируется следующим образом. Имеется т "горячих" (отдающих теплоту) и п "холодных" (воспринимающих теплоту) технологических потоков, которые назовём основными технологическими потоками. Для каждого из этих потоков заданы начальные температуры,  $t_{\mathrm{H},i}^{r}$ ,  $t_{\mathrm{H},i}^{x}$ , конечные температуры  $t_{\mathrm{K},i}^{r}$ ,  $t_{\kappa,i}^{x}$ , и значения водяных эквивалентов (произведение массового расхода на удельную теплоёмкость)  $W_i^r$ ,  $W_i^x$ . Здесь  $i=1,2,...,m,\ j=1,2,...,n$ . Индексы "I" и "Х" относят соответствующую величину к горячему и холодному потокам. Необходимо определить структуру технологических теплообменными аппаратами заданного типа, а также площади поверхностей которые обеспечивали бы заданные теплообмена каждого аппарата, начальные и конечные температуры основных технологических потоков при минимально возможном значении приведенных технологических затрат  $3_{\Pi P}$ , связанных с эксплуатацией синтезируемой ТС.

Для решения задачи оптимального синтеза тепловой системы синтезируемую TC разделяем на две подсистемы (рисунок 1):

- внутренняя (рекуперативная) подсистема в теплообмене участвуют только основные технологические потоки;
- внешняя подсистема в процессе теплообмена используются вспомогательные теплоносители (пар, вода и т.п.) и вспомогательные теплообменные аппараты (нагреватели и холодильники), осуществляющие теплообмен между основными и вспомогательными технологическими потоками.

При этом внешняя подсистема используется только тогда, когда во внутренней подсистеме не удается получить заданные конечные температуры.

## 

Рисунок 1 – К постановке задачи синтеза ТС

Приведенные технологические затраты, связанные с эксплуатацией синтезируемой ТС, могут быть выражены следующим образом:

$$3_{\text{np.}} = E_k(3_1 + 3_2) + 3_3, \tag{1}$$

Где  $3_1$  – затраты на рекуперативные теплообменные аппараты (TA), руб.;

32 – затраты на вспомогательные ТА, руб.;

 $3_9$  — затраты на вспомогательные теплоносители, руб/год;

 $E_k$  — нормативный коэффициент эффективности (величина обратно пропорциональная сроку окупаемости оборудования),  $E_k = 0.12 - 0.15 \text{ год}^{-1}$ . Если во внутренней подсистеме используется  $k_1$  теплообменных аппаратов, а во внешней, то:

$$3_1 + 3_2 = \sum_{k=1}^{k_1} \coprod_k + \sum_{k=1}^{k_2} \coprod_1$$
 (2)

При расчёте стоимости і-го теплообменника любой подсистемы в данной работе используется зависимость:

$$\coprod_{i} = a \cdot F_{i}^{b} \tag{3}$$

где  $F_i$  – площадь поверхности теплообмена соответствующего i-го теплообменника,  $\mathbf{m}^2$ ;

а — стоимостный коэффициент, зависящий от типа ТА;  $0.6 \le b \le 0.8$ .

Затраты на вспомогательные теплоносители определяются по формуле:

$$3_{\mathfrak{g}} = \tau \cdot \sum_{p=1}^{p_i} \sum_{i=1}^{i_i} \coprod_{p} \cdot G_{p,i} \tag{4}$$

где  $\tau$  – продолжительность годовой эксплуатации системы, ч/год;

 $G_{{
m p},i}-$  расход p-го вспомогательного теплоносителя в i-ом вспомогательном ТΑ, кг/ч.

При синтезе используются известные формулы [1]:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{cp}} \tag{5}$$

где О – тепловая нагрузка теплообменника;

k – коэффициент теплопередачи.

Средняя разность температур:

$$\Delta t_{\rm cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_{\rm M}}{L n_{\Delta t_{\rm M}}^{\Delta t_6}} \tag{6}$$

где  $\Delta t_6$  и  $\Delta t_{\rm M}$  – разности температур на концах ТА.

Количество теплоты, переданное в одном аппарате, определяется на основе концепции передачи максимально возможного количества теплоты при минимально допустимой разности температур на концах TA,  $\Delta t_{\text{мин}}$ . При этом,

Если  $(t_H^{\Gamma} - t_H^{X} - \Delta t_{\text{мин}}) < 0$ , то теплообмен невозможен.

Если 
$$(\mathsf{t}^{\Gamma}_{\kappa}-\,\mathsf{t}^{\mathrm{x}}_{\scriptscriptstyle{\mathrm{H}}}-\,\Delta\mathsf{t}_{\scriptscriptstyle{\mathrm{M}}{\scriptscriptstyle{\mathrm{H}}}{\scriptscriptstyle{\mathrm{H}}}})< 0$$
, то  $\mathsf{t}^{\Gamma}_{\kappa}=\,\mathsf{t}^{\mathrm{x}}_{\scriptscriptstyle{\mathrm{H}}}+\,\Delta\mathsf{t}_{\scriptscriptstyle{\mathrm{M}}{\scriptscriptstyle{\mathrm{H}}}{\scriptscriptstyle{\mathrm{H}}}}$ , иначе  $\mathsf{t}^{\Gamma}_{\kappa}=\mathsf{t}^{\Gamma}_{\kappa}$ 

Если 
$$(t_{\kappa}^{\Gamma} - t_{H}^{X} - \Delta t_{\text{мин}}) < 0$$
, то  $t_{\kappa}^{\Gamma} = t_{H}^{X} + \Delta t_{\text{мин}}$ , иначе  $t_{\kappa}^{\Gamma} = t_{\kappa}^{\Gamma}$  Если  $(t_{H}^{\Gamma} - t_{\kappa}^{X} - \Delta t_{\text{мин}}) < 0$ , то  $t_{\kappa}^{X} = t_{H}^{\Gamma} - \Delta t_{\text{мин}}$ , иначе  $t_{\kappa}^{X} = t_{\kappa}^{X}$ 

$$Q_{X} = W_{X} \cdot (t_{K}^{X} - t_{H}^{X}) \tag{7}$$

$$Q_{\Gamma} = W_{\Gamma} \cdot (t_{H}^{\Gamma} - t_{K}^{\Gamma}) \tag{8}$$

$$Q = \min\{Q_x, Q_r\} \tag{9}$$

$$t_{\kappa}^{x} = t_{H}^{x} + \frac{Q}{W_{\kappa}} \tag{10}$$

$$t_{\kappa}^{\Gamma} = t_{H}^{\Gamma} - \frac{Q}{W_{r}} \tag{11}$$

Здесь  $min\{Q_x,Q_r\}$  означает минимальное из двух значений  $Q_x$  и  $Q_r$ .

## Алгоритм синтеза рекуперативной тепловой системы эвристическим методом

#### Алгоритм синтеза состоит из следующих этапов:

Производят расчёт физически возможных вариантов теплообмена (их начальное количество равно  $m \times n$ ) и строят таблицу пар взаимодействующих потоков, исходя из условия  $Q \to max$ .

Из таблицы пар выбирается пара потоков, вступающих во взаимный теплообмен. Если в результате теплообмена данные потоки достигли заданных конечных температур, то они исключаются из рассмотрения. Иначе, начальная температура этих потоков изменяется и принимается равной конечной температуре потоков, которая получилась при расчёте, после чего таблица пар перестраивается и выбирается новая пара потоков.

Данная операция производится до тех пор, пока не останется потоков, способных вступать во взаимный теплообмен, или все потоки достигнут требуемых конечных температур.

При необходимости для достижения заданных конечных температур в теплообменных системах используют вспомогательные тепло- и хладагенты. Таким образом, задача синтеза является многоэтапной, в которой на каждом этапе осуществляется выбор пары потоков, вступающих во взаимный теплообмен.

#### Правило выбора потоков:

Пары потоков можно выбирать с помощью эвристических правил (эвристик). Под эвристиками понимают правила, полученные на основе анализа проектирования тепловых систем и опыта высококвалифицированных технологов.

Эвристические правила носят характер вероятных и не всегда безошибочных утверждений.

Примерами эвристик могут служить следующие правила:

- 1. Выбрать вариант теплообмена между потоками і и ј, для которых начальные температуры максимальны.
- 2. Выбрать вариант теплообмена между потоками, который обеспечивает максимальное количество передаваемой теплоты.
- 3. Выбрать для теплообмена горячий поток с наиболее высокой температурой на входе и холодный поток с наиболее высокой температурой на выходе из теплообменника.
- 4. Выбрать для теплообменника холодный поток с наиболее низкой температурой на входе и горячий поток с наиболее низкой температурой на выходе из теплообменника.
- 5. Выбрать пару потоков произвольным образом.

## Способы выбора эвристики на каждом этапе синтеза:

В настоящее время используются самые различные способы выбора эвристик [2]. Одним из самых простых способов является способ выбора с

помощью равномерно распределенных в интервале [0,1] псевдослучайных чисел. Если, например, используются вышеперечисленные эвристики, то интервал от 0 до 1 разбивается на 5 частей:

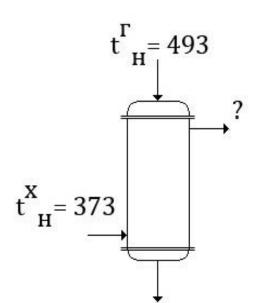
[0;0.2], [0.2;0.4], [0.4;0.6], [0.6;0.8], [0.8;1]. Выбранное наугад псевдослучайное число А указывает подинтервал, а, следовательно, и соответствующее эвристическое правило, с помощью которого осуществляется данный этап синтеза. Поскольку комбинации правил при таком синтезе носят случайный характер, производится несколько попыток синтеза, из которых выбирается лучшая ТС.

### Пример синтеза тепловой системы с помощью эвристического метода:

Рассмотрим теплообмен между двумя холодными и двумя горючими потоками. Исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для синтеза тепловой системы

Таблица I — Исходные данные для синтеза тепловой системы								
I. Основные технологические потоки								
	Холодны	е потоки			Горячи	е потоки		
Номер потока	Нач. тем-ра, К	Кон. тем-ра, К	W <sub>x</sub> , kBt/K	Номер потока	Нач. тем-ра, К	Кон. тем-ра, К	W <sub>x</sub> , кВт/К	
1	373	433	11,630	1	493	333	12,793	
2	343	463	20,934	2	443	363	22,097	
		II. Bo	спомога	гельные	потоки			
	Вода (х.	падогент):	Началь	ная темп	ература, К		293	
	Макс	имальная	конечна	я темпера	атура, К		353	
Стоимость охлаждающей воды, усл.ден.ед./кг							0,00007	
Пар (теплоноситель): Температура греющего насыщенного пара, К							484	
		Теплота к	онденсаг	ции, кДж	/кг		1900	
		Стоимость	пара, ус	сл.ден.ед	./кг		0,001	
	III	. Дополни	гельные	данные д	для синтеза	a TC		
	Продолжи	ительность	ь годової	й эксплуа	атации, ч/го	ЭД	7800	
	Норматив	ный коэфс	рициент	эффекти	вности, год	<b>д</b> -1	0,12	
Коэффициент теплопередачи по внутренней подсистеме, $\mathrm{Br/}(\mathrm{M}^2\mathrm{K})$							17,45	
Коэффициент теплопередачи в холодильниках, Bт/(м <sup>2</sup> K)							17,45	
Коэффициент теплопередачи в нагревателях, Bт/(м <sup>2</sup> K)								
Миним	ально доп	устимая р	азность	температ	тур на конц	ax TA, K	20	
	Стоимос	тные коэф	фициент	ъ в форм	муле (3): a=	=483, b=0,6		



Рассчитаем физически возможные варианты теплообмена между исходными потоками.

Взаимодействие 1-го горячего и 1-го холодного потоков:

Какие конечные температуры будут получены при условии, что потоки, вопервых, должны обмениваться максимально возможным количеством теплоты, и вовторых, разность температур на концах теплообменника не должна превышать  $\Delta t_{\text{мин}} = 20 \text{гр.}?$ 

Принципиальную схему теплообмена можно изобразить следующим образом:

$$t^{\Gamma}_{h,1}$$
  $t^{\Gamma}_{k,1}$   $t^{T}_{k,1}$   $t^{T}_{k,1}$  — требуемая температура  $t^{\Gamma}_{k,1}$  — принципиально возможная температура  $t^{\Gamma}_{k,1}$  — принципиально возможная температура

Количество теплоты, соответствующее холодному потоку:

 $Q_x = 11.63(433-373) = 697.8 \text{ kBt}.$ 

Количество теплоты, соответствующее горячему потоку:

 $Q_{\Gamma} = 12.793(433-373) = 1279.3 \text{ kBt.}$ 

Таким образом, при взаимодействии этих потоков максимально возможное количество теплоты, передаваемое в теплообменнике,

 $Q = min{Q_x, Q_r} = min \{697.8, 1279.3\} = 697.8 \text{ kBt.}$ 

Холодный поток достигнет температуры 433 К, а конечную температуру горячего потока рассчитываем, используя формулу (11):

$$t_{K,1}^{\Gamma} = 493 - \frac{697.8}{12.793} = 438.5 \text{ K}$$

Площадь поверхности 1-го теплообменника:

оверхности 1-го теплоооменника: 
$$F_1 = \frac{697.8}{0.01745 \cdot \frac{(438.5 - 373) - (493 - 433)}{Ln\frac{(438.5 - 373)}{(493 - 433)}}} = 637.9 \text{ m}^2$$

Стоимость этого теплообменника

$$\mathbf{L}_{1} = 483 \cdot 637.9^{0.6} = 23270.1$$
 усл. ден. ед.

Аналогично рассчитываем конечные температуры остальных потоков и записываем их в таблицу пар.

Таблица 2 – Таблица пар исходных потоков (І этап синтеза)

Номер холодного потока	t <sub>H</sub> , K	t <sub>K</sub> , K	Номер горячего потока	t <sub>н</sub> , К	t <sub>κ</sub> , Κ	Стоимость ТА, усл.ед.
1	373,0	433,0	1	493,0	438,5	23270,1
1	373,0	423,0	2	443,0	416,7	32212,7
2	343,0	422,4	1	493,0	363,0	51273,3
2	343,0	423,0	2	443,0	367,2	73646,7

Далее, с помощью генератора псевдослучайных чисел вырабатывается число А в интервале [0,1], пусть, например, 0.5. Это соответствует 3 эвристике, тогда фрагмент синтезируемой системы на первом этапе будет включать теплообмен между 1-ым холодным и 1-ым горячим потоками (рис. 2a).

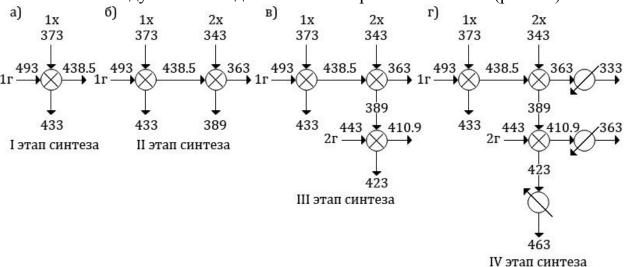


Рисунок 2 – Этапы синтеза тепловой системы

Так как 1-ый холодный поток достиг заданной температуры, то его исключаем из рассмотрения и строим таблицу пар для оставшихся одного холодного и двух горячих потоков, приняв за начальную температуру 1-го горячего потока 438.5 К.

Возможные комбинации теплообмена на втором этапе синтеза приведены в табл.3.

Таблица 3 — Таблица пар исходных и результирующих потоков (II этап синтеза)

Номер холодного потока	t <sub>H</sub> , K	t <sub>K</sub> , K	Номер горячего потока	t <sub>н</sub> , К	t <sub>κ</sub> , K	Стоимость ТА, усл.ед.
2	343,0	389,1	1	438,5	363,0	41974,0
2	343,0	423,0	2	443,0	367,2	73606,7

Пусть на втором этапе синтеза генератор случайных чисел выработал число A = 0.7 (правило 4). В соответствии с четвёртой эвристикой во взаимный теплообмен вступят 2-й холодный и 1-й горячий потоки (см рис. 26).

Вновь перестраиваем таблицы пар (табл. 4) и выбираем для теплообмена 2-й горячий и 2-1 холодный потоки (см. рис. 2в) (теплообмен между 1-м горячим и 2-м холодным потоками невозможен).

Таблица 4 — Таблица пар исходных и результирующих потоков (III этап синтеза)

Номер холодного потока	t <sub>H</sub> , K	t <sub>K</sub> , K	Номер горячего потока	t <sub>H</sub> , Κ	$t^{\mathrm{r}}_{\mathrm{K}},\mathrm{K}$	Стоимость ТА, усл.ед.
2	389,1		1	363,0		Теплообмен невозможен
2	389,1	423,0	2	443,0	410,9	73606,7

Так как оставшиеся потоки не могут вступить во взаимный теплообмен, второй холодный поток догреваем паром до заданной конечной температуры 463 К, а горячие потоки охлаждаем водой (IV этап синтеза, см. рис. 2г).

Расход пара для нагрева до заданной температуры второго холодного потока:

$$G_{\Pi} = \frac{Q_{H}}{r} = \frac{20.934 \cdot (463 - 423)}{1900} = 0.44 \, {^{K}\Gamma/_{C}} = 1590 \, {^{K}\Gamma/_{Y}}$$

где Q<sub>н</sub> – тепловая нагрузка нагревателя

r – теплота конденсации насыщенного пара.

Поверхность нагревателя:

$$F_{H} = \frac{20.934 \cdot (463 - 423)}{0.02326 \cdot \frac{(484 - 423) - (484 - 463)}{\ln \frac{(484 - 423)}{(484 - 463)}} \cong 960 \text{ m}^{2}$$

Стоимость нагревателя:

$$\mathbf{L}_{\mathbf{H}} = 483 \cdot 960^{0.6} = 29737.9 \, \text{усл. ден. ед.}$$

Расход воды для охлаждения до заданной температуры первого горячего потока:

$$G_{\text{\tiny B},1} = \frac{Q_{\text{\tiny XOJ.},1}}{c_{\text{\tiny R}} \cdot (t_{\text{\tiny R}}^{\text{\tiny K}} - t_{\text{\tiny R}}^{\text{\tiny H}})} = \frac{12.793 \cdot (363 - 333)}{4.19 \cdot (343 - 293)} = 1.83 \text{ }^{\text{\tiny K}\Gamma}/_{\text{\tiny C}} \cong 6600 \text{ }^{\text{\tiny K}\Gamma}/_{\text{\tiny H}}$$

Где  $Q_{\text{хол.,1}}$  – количество теплоты, переданное в холодильнике

 $C_{\rm B}$  – удельная теплоёмкость воды (4.19кДж/(кгК))

 $t_{\mathrm{B}}^{\mathrm{K}}$  и  $t_{\mathrm{B}}^{\mathrm{H}}$  – конечная и начальная температура воды.

Так как разность температур на горячем конце холодильника меньше  $\Delta t_{\text{мин}}$  за конечную температуру воды принимаем 343К (а не 353, как это следует из табл.1)

Поверхность холодильника:

$$F_{\text{хол.,1}} = rac{Q_{\text{хол.,1}}}{0.01745 \cdot rac{(333-293)-(363-343)}{\lnrac{(333-293)}{(363-343)}}} = 762.5 \text{ м}^2$$

$$\mathbf{L}_{\mathrm{H}} = 483 \cdot 762.5^{0.6} = 25899.5$$
 усл. ден. ед.

Аналогично для второго горячего потока находим:

$$G_{\rm B,2}=15168.3~{
m K\Gamma/_{
m H}};$$
 Ц $_{
m xoл,2}=29514$  усл. ден. ед.

Приведенные затраты синтезированной системы:

$$3_{\text{пр}} = 0.12 \cdot \left( \coprod_{1} + \coprod_{2} + \coprod_{3} + \coprod_{\text{хол.,1}} + \coprod_{\text{хол.,2}} + \coprod_{\text{H}} \right) + 7800 \left[ \left( G_{\text{B},1} + G_{\text{B},2} \right) \cdot 7 \cdot 10^{-5} + G_{\text{II}} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \right] = 0.12 \cdot \left( 23265.7 + 41974 + 39015 + 25899.5 + 29514 + 29737.9 \right) + 7800 \cdot \left[ \left( 6600 + 15168.3 \right) \cdot 7 \cdot 10^{-5} + 1590 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \right] = 22728.7 + 24287.5 = 47016.2 \text{ усл. ден. ед.}$$

Затем весь расчёт повторяется с другим набором эвристик. После проведения заданного количества попыток выбирается схема с минимальными приведенными затратами.

## Порядок выполнения работы

Работа выполняется в соответствии с индивидуальным заданием, полученным у преподавателя. Варианты заданий приведены в приложении 1. Основные этапы работы.

- 1. Составить программу для расчёта конечных температур взаимодействующих потоков (см. формулы(5)-(11)).
- 2. Выбрать набор эвристик, используемых для синтеза ТС. Определить интервалы псевдослучайных чисел А в соответствии с количеством используемых эвристик.
- 3. Выполнить и попыток синтеза ТС (число попыток синтеза определяет преподаватель).
- 4. Выбрать для проектирования ТС с минимальными приведенными затратами.
- 5. Оформить отчёт по лабораторной работе.

## Синтез ТС комбинаторным методом

Перенумеруем пары холодных и горячих потоков. Номер р пары потоков і-го холодного и ј-го горячего потоков определяется следующим образом:

$$p = (i, j) \cdot m + j i = 1, ..., n j = 1, ..., m$$
 (12)

Число пар N=mn. Любая схема теплообмена может быть представлена как последовательность P пар потоков. Если оптимальная схема ищется путём перебора всех возможных последовательностей пар потоков (т.е. всех возможных схем теплообмена), то придётся перебрать  $N^N$  схем. При m=n=3 составляет  $9^9$ , что практически исключает возможность такого слепого перебора. Необходимо сократить число перебираемых схем. Для сокращения числа перебираемых вариантов, прежде всего, используют эвристические ограничения. В данной задаче, как показал опыт решения задач синтеза, без ухудшения решения можно требовать, чтобы при теплообмене между потоками передавалось максимально возможное, при выполнении условия, количество тепла. Тогда каждая пара потоков в любой схеме может встретиться только один раз. Для ответа на вопрос, насколько сократится при этом количество вариантов схем, построим дерево вариантов. На рис.3 показана часть этого дерева для m=n=2.

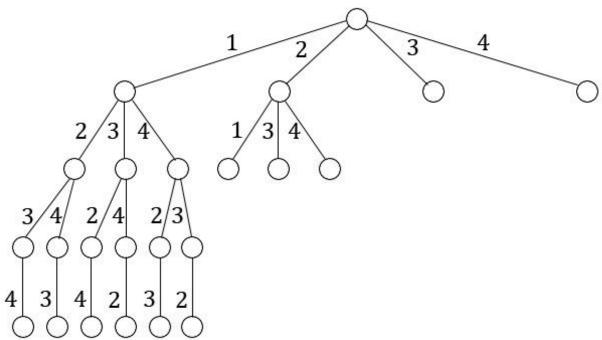


Рисунок 3 - Дерево вариантов схем теплообмена

Вершины дерева представляют собой системы потоков в виде векторов температур всех потоков. Рёбра, соединяющие вершины - это теплообменники, в которых обмениваются теплом пары потоков, номера пар указаны рядом с рёбрами. Таким образом, каждая ветвь этого дерева представляет собой какую-то схему теплообмена. Например, ветвь 1,2,3,4 соответствует схеме на рис.4.

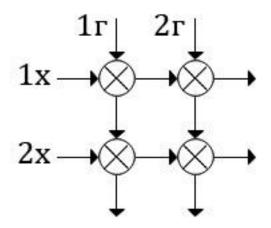


Рисунок 4 – Схема, соответствующая ветви 1,2,3,4 дерева вариантов

На рис.4 видно, что количество разветвлений уменьшается по мере перехода к нижним уровням дерева, так как каждая пара в каждой ветви может встретиться только один раз. На первом уровне возможны все N пар. На следующем уровне из каждой вершины может исходить N-1 ребро, а число возможных схем равно N(N-1). На следующем уровне число схем равно N(N-1)(N-2) и т.д. Всего схем N!  $<< N^N$ . Для m=n=2 равно 24, полное дерево вариантов содержало бы 24 ветви.

Дальнейшее сокращение числа вариантов может быть достигнуто за счёт отбрасывания эквивалентных ветвей. Дело в том, что формально разные ветви могут представлять одну и ту же реальную схему. Например, формально разные последовательности  $P_1$ =1,2,3 и  $P_2$ =1,3,2 соответствуют одной и той же схеме на рис.5.

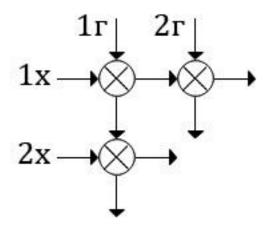


Рисунок 5 – Эквивалентные ветви дерева вариантов

Существуют различные правила для отбрасывания эквивалентных ветвей. Для m=n=2 существует 10 эквивалентных ветвей, поэтому число ветвей дерева вариантов сокращается с 24 до 14. Это сокращенное дерево приведено на рис.6.

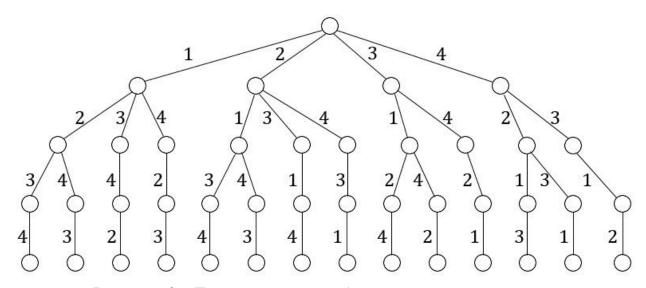


Рисунок 6 – Дерево вариантов без эквивалентных ветвей

Наконец, для сокращения числа вариантов могут быть использованы естественные ограничения задачи. Для нашей задачи- это термодинамическое ограничение  $\Delta t > \Delta t_{min}$  и ограниченные теплосодержания потоков. Эти ограничения приводят к тому, что часть ветвей дерева на рис.6 оборвётся, не доходя до последнего уровня дерева, что и приводит к сокращению числа вариантов. Насколько сократится дерево зависит, конечно, от данных конкретной задачи. Практика показывает, что такое сокращение может быть весьма значительным. Для задачи, которая решалась выше эвристически, число вариантов сокращается до 8. Сокращенное дерево приведено на рис.7, на рисунке в конце каждой ветви приведена стоимость соответствующей схемы. Оптимальная схема теплообмена приведена на рис.8.

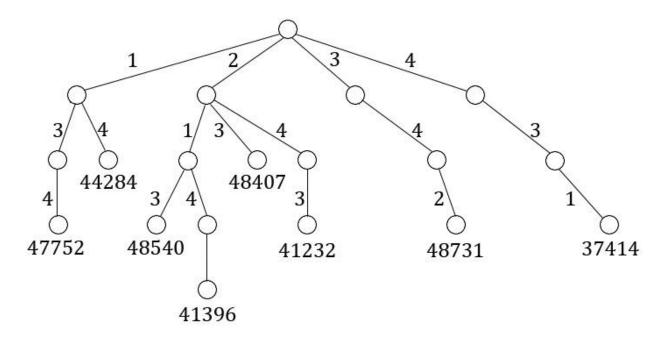


Рисунок 7 — Дерево вариантов после сокращений, вызванных термодинамическими ограничениями

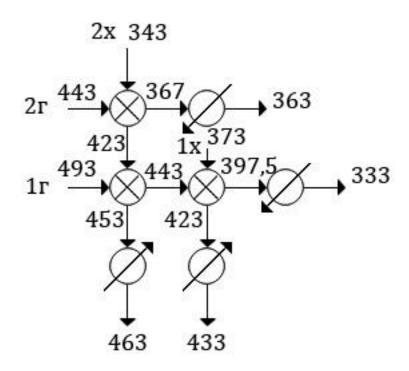


Рисунок 8 - Оптимальная схема теплообмена, полученная комбинаторным методом

Все перечисленные сокращения позволяют практически получить точное решение задачи синтеза. Но для больших задач такого сокращения всё равно может оказаться недостаточно, чтобы получить решение за приемлемое время на среднем компьютере. Для больших задач следует применять методы прогноза, чтобы еще более существенно сократить число вариантов. Другая возможность- применение эвристических методов, рассмотренных выше. Но следует помнить, что эвристические методы дают лишь приближённое решение задачи синтеза, которое может быть существенно хуже точного решения.

### Порядок выполнения завершающей части работы:

- 1. Вводим данные задачи синтеза, решённой ранее эвристическим методом, в программу синтеза систем теплообмена комбинаторным методом (см. приложение 2). Данные вводятся с помощью оператора DATA.
- 2. Запустить программу и получить точное решение своей задачи синтеза.
- 3. Сравнить точное и эвристическое решения задачи синтеза.

#### Литература

#### а) основная литература:

1. Лисицын, Н. В. Химико-технологические системы: Оптимизация и ресурсосбережение: учебное пособие для втузов / Н. В. Лисицын, В. К. Викторов, Н. В. Кузичкин, В.И. Федоров. - СПб. : Менделеев, 2013. - 392 с.

#### б) дополнительная литература:

- 1. Пантелеев, А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах : учеб. пособие для втузов / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. 3-е изд., стер. М. : Высш. шк., 2008. 544 с.
- 2. Системный анализ и принятие решений. Компьютерные технологии моделирования химико-технологических систем. Учебное пособие. / В.А. Холоднов. СПб: СПб ГТИ(ТУ), ИК «Синтез», 2007 г., 9 п.л.
- 3. Системный анализ и принятие решений. Математическое моделирование и оптимизация объектов химической технологии. Учебное пособие. / В.А. Холоднов. СПб: СПб ГТИ(ТУ), ИК «Синтез», 2007 г., 14 п.л.

#### в) вспомогательная литература:

- 1. Волкова, В.Н. Основы теории систем и системного анализа./В.Н.Волкова, А.А.Денисов. СПб, изд.СПбГПУ, 2003 г.,518с.
- 2. Моисеев, Н.Н. Математические задачи системного анализа./Н.Н.Моисеев. М: Наука, 1982 г.
- 3. Губанов, В.А. Введение в системный анализ. Учебное пособие./В.А.Губанов, В.В.Захаров, А.Н.Коваленко. Л: Изд. Ленинградского университета, 1988 г., 227 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 5 – ТС Индивидуальные задания для синтеза

Номе		Холодн	ные пото	ОКИ	Горячие потоки			
вар-та	I Номер I Гемпература I		Водяной	Номер	Температур		Водяной	
задан	потока	ŀ	ζ	эквивалент,	потока	a,	K	эквивале
ИЯ		нач.	кон.	кВт/К		нач.	кон.	нт, кВт/К
1	1	293	463	6,9	1	473	383	7,0
	2	353	403	10,0	2	453	323	8,0
2	1	323	453	10,0	1	593	423	8,2
	2	353	463	8,0	2	423	343	11,0
3	1	333	433	35,0	1	433	368	32,0
	2	383	463	30,0	2	473	413	40,0
4	1	283	445	33,0	1	673	473	25,0
	2	360	460	33,0	2	500	350	13,0
5	1	293	393	12,8	1	473	343	11,6

	2	373	433	11,6	2	433	383	9,3
					3	453	423	4,6
6	1	300	400	45,0	1	573	573	20,0
	2	400	450	22,0	2	450	350	10,0
					3	453	423	50,0
7	1	400	460	50,0	1	500	400	32,0
	2	400	450	50,0	2	500	350	10,0
					3	400	350	16,0
8	1	320	380	30,0	1	420	380	15,0
	2	320	420	30,0	2	450	350	15,0
					3	400	320	33,7
9	1	300	400	45,0	1	573	443	30,0
	2	400	450	22,0	2	450	350	37,0
	3	293	393	20,0				
10	1	300	400	45,0	1	573	443	30,0
	2	400	450	22,0	2	450	350	20,0
	3	293	393	20,0	3	440	350	17,0

Продолжение приложения 1

		Хололь	ные пото	Горячие потоки				
Номе	Номер		ратура,	Водяной	Номер	_	ератур	Водяной
вар-та	потока	_		эквивалент,	потока		K	эквивале
задан	потока	1	<u> </u>	кВт/К	потока	a,		НТ,
ия		нач.	кон.	KD1/K		нач.	кон.	кВт/K
11	1	300	460	7,1	1	480	380	7,0
11	2	350	400	12,0	2	450	318	8,2
12	1	323	463	10,0	1	600	420	8,4
12	2	350	460	9,0	2	420	330	11,6
13	1	330	430	35,0	1	420	365	32,0
13	2	385	460	30,0	2	470	4130	39,5
14	1	300	440	50,0	1	600	450	50,0
14	2	310	450	22,0	2	450	350	43,0
	3	290	340	40,0	2	430	330	75,0
15	1	300	420	45,0	1	473	423	30,0
13	2	373	450	22,0	2	450	350	42,0
	3	293	343	20,0	2	430		72,0
16	1	293	393	50,0	1	450	350	40,0
	2	273	373	20,0	2	393	293	40,0
	3	293	393	10,0	_			,.
17	1	300	350	20,0	1	420	320	10,0
1	2	310	360	20,0	2	450	350	10,0
	3	293	343	20,0	3	650	550	10,0
18	1	300	400	15,0	1	543	443	13,0
	2	300	400	15,0	2	350	300	40,0
	3	310	410	20,0	3	443	333	17,0
19	1	315	415	45,0	1	563	433	30,0
	2	395	495	22,0	2	445	345	37,0
	3	283	383	18,0				
20	1	300	400	40,0	1	673	473	20,0
	2 3	400	450	22,0	2	500	350	25,0
	3	293	393	10,0				
		283	400	15,0				

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

## Программа синтеза оптимальных систем теплообмена комбинаторным методом

Nx=	wx	txn	txk	wg	tgn	tgk	
1 <b>VX</b> -							\\CERBERUS\Staff\
Ng=							
							Ввод данных из
							файла
nmin=							
							вычислить
nmax=							
dt=	tp=	pl=	co=	C	<b>K</b> =	ch=	
a= [	_	1 4				_	
a= l	)=	tvn=	tvk=	, t	r=	cv=	
cp=							
· P		,	<b></b>				
			Поле вывод	а результ	гатов		

Рисунок 9 – Интерфейс программы синтеза оптимальных систем теплообмена

### Код программы на языке Visual Basic:

Public Class Form1

Dim nx, ng, n, i As Integer

Dim wx(), txn(), txk() As Single

Dim wg(), tgn(), tgk() As Single

Dim dt, tp, pl, co, cx, ch, a, b, tvn, tvk, tr, cv, cp As Single

Dim ip As Single

Dim p%, PV%

Dim tx(,), tg(,), jxm(), jgm(), txm(), tgm(), qs()

Dim jx(), jg(), cs() As Single

Dim cm As Double

Dim ik, nmin, nmax, nv, kn, k, km As Integer

Dim txi, tgi, txo, q, qg, qx, tgo As Single

Dim s, ee As Single

Dim dt1, dts, dt2, cd, ct, cdm, qmax As Single

Dim dv0, dvk As Integer

Private Sub Button1\_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button1.Click

Dim s As String

s = TextBox22.Text

```
FileOpen(1, s, OpenMode.Input)
Input(1, nx)
TextBox1.Text = CStr(nx)
Input(1, ng)
TextBox2.Text = CStr(ng)
ReDim wx(0 \text{ To } nx + 1)
ReDim txn(0 \text{ To } nx + 1)
ReDim txk(0 \text{ To } nx + 1)
ReDim wg(0 \text{ To } ng + 1)
ReDim tgn(0 \text{ To } ng + 1)
ReDim tgk(0 \text{ To } ng + 1)
TextBox3.Text = ""
TextBox4.Text = ""
TextBox5.Text = ""
For i = 1 To nx
  Input(1, wx(i))
  TextBox3.Text = TextBox3.Text + CStr(wx(i)) + vbCrLf
  Input(1, txn(i))
  TextBox4.Text = TextBox4.Text + CStr(txn(i)) + vbCrLf
  Input(1, txk(i))
  TextBox5.Text = TextBox5.Text + CStr(txk(i)) + vbCrLf
Next
TextBox6.Text = ""
TextBox7.Text = ""
TextBox8.Text = ""
For i = 1 To ng
  Input(1, wg(i))
  TextBox6.Text = TextBox6.Text + CStr(wg(i)) + vbCrLf
  Input(1, tgn(i))
  TextBox7.Text = TextBox7.Text + CStr(tgn(i)) + vbCrLf
  Input(1, tgk(i))
  TextBox8.Text = TextBox8.Text + CStr(tgk(i)) + vbCrLf
Next
Input(1, dt)
TextBox9.Text = CStr(dt)
Input(1, tp)
TextBox10.Text = CStr(tp)
Input(1, pl)
TextBox11.Text = CStr(pl)
Input(1, co)
TextBox12.Text = CStr(co)
Input(1, cx)
TextBox13.Text = CStr(cx)
Input(1, ch)
TextBox14.Text = CStr(ch)
Input(1, a)
TextBox15.Text = CStr(a)
Input(1, b)
TextBox16.Text = CStr(b)
Input(1, tvn)
TextBox17.Text = CStr(tvn)
```

```
Input(1, tvk)
     TextBox18.Text = CStr(tvk)
     Input(1, tr)
     TextBox19.Text = CStr(tr)
     Input(1, cv)
     TextBox20.Text = CStr(cv)
     Input(1, cp)
     TextBox21.Text = CStr(cp)
     FileClose(1)
  End Sub
  Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles Button2.Click
     n = nx * ng
     ReDim qs(0 \text{ To } n + 1)
     ReDim cs(0 \text{ To } n + 1)
     ReDim tx(0 \text{ To } nx, 0 \text{ To } n + 1)
     ReDim tg(0 \text{ To ng}, 0 \text{ To n} + 1)
     ReDim jx(0 \text{ To n})
     ReDim ig(0 \text{ To n})
     ReDim jxm(0 \text{ To n})
     ReDim jgm(0 \text{ To n})
     ReDim txm(0 \text{ To n})
     ReDim tgm(0 \text{ To } n)
     nmin = CInt(TextBox24.Text)
     nmax = CInt(TextBox23.Text)
     cs(1) = 0 : cm = 100000000000000 : ee = 0.1 : qs(1) = 0
     For i = 1 To nx : tx(i, 1) = txn(i) : Next i
     For i = 1 To ng : tg(i, 1) = tgn(i) : Next i
     nv = 0 : i = 1
     ix(i) = 1 : s = 0
1:
     ig(i) = 1
2:
3:
     If i = 1 Then GoTo 4
     kn = 1
     For k = 1 To i - 1
        If jx(i) = jx(k) Then
          If jg(i) = jg(k) Then GoTo 5
          kn = k + 1
       Else
          If jg(i) = jg(k) Then kn = k + 1
       End If
     Next k
     If kn = i Then GoTo 4
     For k = kn \text{ To } i - 1
       If jx(i) * ng + jg(i) < jx(k) * ng + jg(k) Then GoTo 5
     Next k
     txi = tx(jx(i), i) : tgi = tg(jg(i), i)
     If txi >= tgi Then GoTo 5
     If txi = txk(jx(i)) Or tgi = tgk(jg(i)) Then GoTo 5
     If tgk(jg(i)) - txi >= dt Then
```

```
tgo = tgk(jg(i))
        If tgi - txk(jx(i)) >= dt Then
          txo = txk(jx(i))
        Else
          txo = tgi - dt
       End If
     Else
       tgo = txi + dt
        If tgi - txk(jx(i)) >= dt Then
          txo = txk(jx(i))
       Else
          txo = tgi - dt
          If tgi < tgo Or txi > txo Then GoTo 5
       End If
     End If
     qx = wx(jx(i)) * (txo - txi) : qg = wg(jg(i)) * (tgi - tgo)
     If qg \ll qx Then
       q = qg
        txo = txi + q / wx(jx(i))
     Else
        q = qx
        tgo = tgi - q / wg(jg(i))
     End If
     dt1 = tgi - txo : dt2 = tgo - txi
     dts = (dt1 + dt2) / 2
     If (Math.Abs((dt1/dt2-1))) > ee Then dts = (dt1 - dt2) / Math.Log(dt1/dt2)
     For k = 1 To nx
        If k = jx(i) Then tx(k, i + 1) = txo Else tx(k, i + 1) = tx(k, i)
     Next k
     For k = 1 To ng
  If k = jg(i) Then tg(k, i + 1) = tgo Else tg(k, i + 1) = tg(k, i)
     Next k
     qs(i + 1) = qs(i) + q
     cs(i + 1) = cs(i) + a * (q / co / dts) ^ b
     ik = i
     If i < n Then
       i = i + 1
       GoTo 1
     Else
        GoTo 8
     End If
5:
     If jg(i) < ng Then
       jg(i) = jg(i) + 1
        GoTo 3
     End If
     If jx(i) = nx Then
        If ik < nmin Or ik > nmax Then GoTo 7
       If s = 1 Then GoTo 7 Else GoTo 8
     End If
     jx(i) = jx(i) + 1
```

```
GoTo 2
             k = i: If ik = n Then k = k + 1
8:
            cd = 0
            For j = 1 To nx
                   If tx(j, k) < txk(j) Then
                         q = wx(j) * (txk(j) - tx(j, k))
                         dt1 = tp - tx(j, k) : dt2 = tp - txk(j)
                         dts = (dt1 + dt2) / 2
                         If Math.Abs(dt1/dt2 - 1) > ee Then dts = (dt1 - dt2)/Math.Log(dt1/dt2)
                         cd = cd + a * (q / ch / dts) ^ b + q / pl * tr * cp * 3600
                  End If
            Next j
            For j = 1 To ng
                   If tg(i, k) > tgk(i) Then
                         q = wg(j) * (tg(j, k) - tgk(j))
                         If tg(j, k) - tvk >= dt Then
                               dt1 = tg(j, k) - tvk
                         Else
                               dt1 = dt
                         End If
                        dt2 = tgk(j) - tvn
                         dts = (dt1 + dt2) / 2
                         If Math.Abs(dt1/dt2 - 1) > ee Then dts = (dt1 - dt2)/Math.Log(dt1/dt2)
                         cd = cd + a * (q / cx / dts) ^ b + q / 4.19 / (tg(j, k) - dt1 - tvn) * tr * cv * 3600
                  End If
            Next i
            ct = cs(k) + cd
            nv = nv + 1
            If PV% <> 1 Then GoTo 12
            If ik < dv0 Or ik > dvk Then GoTo 12
12:
              If ct < cm Then
                   cm = ct : cdm = cd : km = k - 1 : qmax = qs(k)
                  For j = 1 To km
                        jxm(j) = jx(j) : jgm(j) = jg(j)
                         txm(j) = tx(jx(j), j + 1) : tgm(j) = tg(jg(j), j + 1)
                  Next i
            End If
            i = i - 1: If i > 0 Then
7:
                  s = 1
                  GoTo 5
            End If
            For j = 1 To km
                   panel.Text = panel.Text + CStr(j) + " " + CStr(jxm(j)) + " " + CStr(jgm(j)) + " + CStr(
CStr(txm(j)) + " " + CStr(tgm(j)) + vbCrLf
            Next i
            panel.Text = panel.Text + "ctotal=" + CStr(Format(cm, "#.##")) + " свнеш=" +
CStr(Format(cdm, "#.##")) + " qrecupmax=" + CStr(qmax) + " nvariants=" + CStr(nv) +
vbCrLf
      End Sub
End Class
```