



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

Енергомашиностроителен факултет

Катедра „Топлинна и хладилна техника“

маг. инж. Момчил Петров Василев

**ПАРАМЕТРИЧЕН АНАЛИЗ НА ТОПЛООБМЕННИ
СИСТЕМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
„ДОКТОР“

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.4. Енергетика

Научна специалност: „Промислена топлотехника“

НАУЧНИ РЪКОВОДИТЕЛИ:

проф. д-р инж. Никола Георгиев Калоянов

проф. д-р инж. Валери Августов Милчев

СОФИЯ 2019

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Топлинна и хладилна техника“ към Енергомашиностроителния факултет на ТУ–София на редовно заседание, проведено на 10.01.2019 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 18.04.2019 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.4-01 / 21.01.2019 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Никола Георгиев Калоянов – председател
2. доц. д-р инж. Любомир Петков Цоков – научен секретар
3. проф. д-р инж. Иван Христов Касабов
4. проф. д-р инж. Илия Кръстев Илиев
5. доц. д-р инж. Васил Янев Йорданов

Рецензенти:

1. доц. д-р инж. Любомир Петков Цоков
2. доц. д-р инж. Васил Янев Йорданов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Енергомашиностроителния факултет на ТУ-София, блок № 2, кабинет № 2344.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Топлинна и хладилна техника“ на Енергомашиностроителния факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора. Общият обем на дисертацията е 223 страници, като в тях са включени 43 фигури и 13 таблици. Цитирани са 157 литературни източника, от които 50 на кирилица и 107 на латиница.

Автор: маг. инж. Момчил Василев

Заглавие: „Параметричен анализ на топлообменни системи”

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Системите от топлообменни апарати са широко използвани както в промишлеността, така и в сградния сектор. Задачата за структурно-параметричен анализ на топлообменни системи има непреходна актуалност. Въпреки усилията на множество изследователски екипи, до настоящия момент в световен мащаб не е постигнато удовлетворяващо решение за единен подход и метод.

Известно е, че решаването на проверочната задача за един топлообменник (ТОА) е трудоемка задача, но в сравнение с него анализът на система от топлообменни апарати (СТА) изисква значително повече ресурси. Затруднения възникват при: моделиране на структурата на система; дефиниране на взаимната свързаност на елементи; повишеното потребление на изчислителни ресурси при големи системи от топлообменни апарати; коректното определяне на термодинамичните свойства на флуидите, тъй като има множество неизвестни входни температури на топлообменниците, които са изходни от други апарати или от възли на разглежданата система.

Параметрите на една система от топлообменни апарати могат да бъдат класифицирани в три групи: (1) Проектни параметри, като: схема на системата, тип топлообменници, площ на топлообменна повърхност и други конструктивни параметри; (2) Параметри за контрол, като: дебита през байпаси и дебита разделяни в различна степен. Те могат да бъдат ръчно или автоматично регулирани чрез съответните изпълнителни механизми; (3) Работни параметри, като: температури и дебита на флуидните потоци, чиито стойности могат да бъдат променяни индиректно, но не се регулират.

Определянето на параметрите на СТА е свързано с решаване на две основни задачи:

- Задача за синтез: при дадени работни параметри да се определят проектните параметри и параметрите за контрол на системата;
- Задача за анализ: при дадени проектни параметри и параметри за контрол да се определят работните параметри на системата.

При известни параметри на флуидните потоци на входа на системата, задачата за анализ има за цел определянето на работните параметри на изхода.

При матричните методи системата се описва изцяло чрез стойностите на коефициентите, заложи в съответните матрици и се решава чрез матрични операции. В зависимост от сложността си, те могат да бъдат реализирани в софтуери, като MATLAB, Mathematica и Maple, но също така и в „spreadsheet” програми като MS Excel.

При итерационните методи решението се намира чрез последователно изчисляване на топлинния баланс на всеки топлообменен апарат в системата в итерационен цикъл, до задоволяване на определените критерии за сходимост. Итерационни методи са заложи в компонентно-ориентираните софтуери за

моделиране и симулиране на статични и динамични системи, като Simscape, Modelica и TRNSYS. В тези симулационни среди всеки топлообменен апарат се дефинира като отделен компонент, т.е. самостоятелен модел, чиито входни и изходни променливи са свързани с тези на другите компоненти в системата.

Основният недостатък на матричните методи е необходимостта специфичният топлинен капацитет на всеки от флуидните потоци да се приеме за константа. Това води до намаляване на точността на решението. Итерационните методи нямат този недостатък, но при тях е необходимо да се определи подходящ подход за итериране. Един от съществуващите методи за анализ на СТА е методът на каноничната форма. Негово предимство е привеждането на произволна неразклонена СТА в каноничен вид, на който съответства структурирана матрица водеща към оптимизирана последователност на итерации. Методът е удобен за използване при създаване на универсални алгоритми и представяне на системи от топлообменни апарати в табличен вид (съответно и геометрично), но неговите автори са го развили до степен, при която са налице следните недостатъци:

- Разклонени топлообменни системи (т.е. СТА с разделяне и събиране на потоци) не могат да бъдат обект на анализ.
- За намиране на решение на задачата са предложени уравнения, които водят до значителни усложнения при системи с повече от два студени потока.
- Не се взема предвид зависимостта на топлофизичните характеристики на работните среди от температурата.
- В процеса на привеждане на топлообменни системи в каноничен вид възникват редица затруднения.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Настоящата работа има за цел разработването на усъвършенстван метод за моделиране на системи от топлообменни апарати, основан на метода на каноничната форма и нов алгоритъм за прецизно определяне на работните параметри на системата.

Във връзка с поставената цел възникват следните основни задачи:

- Проучване на методите за анализ на системи от топлообменни апарати.
- Анализ на предимствата и недостатъците на метода на каноничната форма спрямо други съществуващи методи и оценка на възможностите за подобряването му.
- Разработване на подобрен алгоритъм за привеждане на СТА в каноничен вид.
- Разширяване на възможностите на метода на каноничната форма: за разклонени СТА; за решаване на задачата при системи с повече от два студени потока; за системи, при които специфичният топлинен капацитет на флуидите не може да бъде приет за постоянен.
- Алгоритмизиране на разширения метод.

В първа глава е направен анализ на съществуващите методи, като вниманието е фокусирано върху метода на каноничната форма. Във втора глава е предложен нов алгоритъм за описание на топлообменна система с произволна структура, чрез който системата се структурира във вид на ориентиран граф. Предложеният алгоритъм разширява възможностите на метода на каноничната форма, като позволява да се анализират СТА с разклонена структура. В трета глава е предложен алгоритъм за идентификация на движението на потоците, чрез който се съставят матрици с разпределението на входящите потоци по клоните на системата. В четвърта глава подробно са описани недостатъците на метода на каноничната форма и е представен подобрен алгоритъм за привеждане на СТА в каноничен вид. В пета глава е предложен нов прецизен метод за определяне на температурата на смесване на флуидни потоци, направен е обзор на моделите на топлообменни апарати и е представен итерационен алгоритъм за намиране на решение на задачата за анализ на СТА основан на метода на преносните топлинни единици.

Представените алгоритми в отделните глави формират цялостен алгоритъм за моделиране на система от топлообменници при улеснено въвеждане на информация, идентифициране на разпределението на входящите флуидни потоци по клоновете на СТА, привеждане на системата в каноничен вид, намиране на решение на задачата и визуализация на получените резултати в структуриран вид, съответстващ на канонична система.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩИТЕ МЕТОДИ

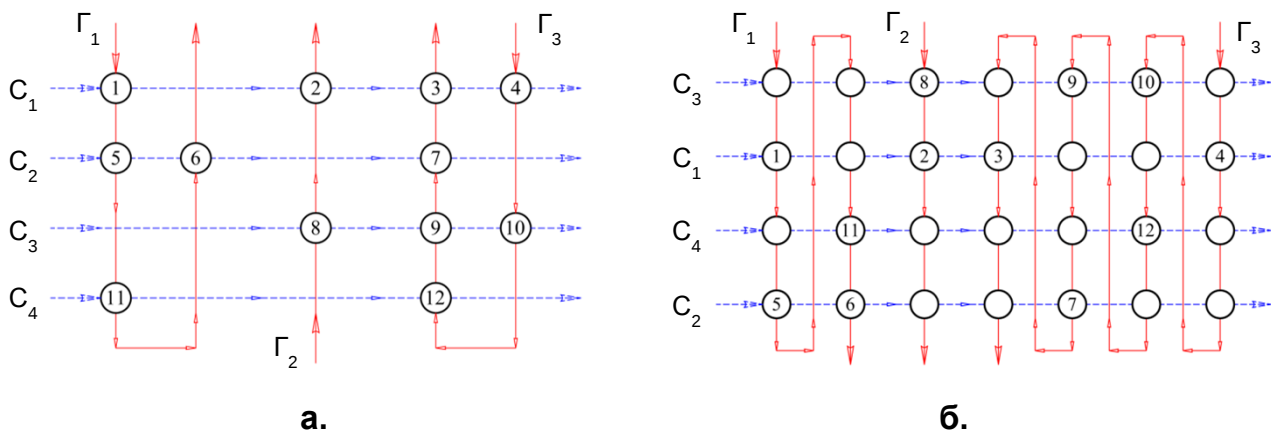
МЕТОД НА КАНОНИЧНАТА ФОРМА

Една от целите на авторите при разработване на метода, е на негова основа да се създаде достатъчно общ универсален алгоритъм решаващ задачата за анализ на системи от топлообменни апарати, който има висока ефективност при използване на електронно изчислителната техника. Алгоритъмът се състои от два основни етапа: (1) привеждане на произволна система от топлообменни апарати в еквивалентна система от стандартен вид; (2) определяне на температурите на потоците на изхода от топлообменна система в каноничен вид.

В резултат на първия основен етап се получава матрица $\ddot{T}$, която съответства на СТА от каноничен вид. Каноничните топлообменни системи спадат към системите от стандартен вид, в които всички потоци приемащи топлина (студени потоци) преминават през топлообменниците от ляво надясно, отдаващите топлина (горещи потоци) – от горе надолу, а всички лупинги (правотокови и противотокови) могат да се образуват само от потоците отдаващи топлина. По дефиниция: под топлообменна система от каноничен вид се разбира такава система, в която всички горещи потоци, един или няколко пъти последователно отдават топлината си на подредено множество студени потоци. На всеки студен поток се съпоставя ред в матрица $\ddot{T}$ и посока на потока от ляво надясно. Горещите потоци съответстват на стълбове на матрицата с посока от

горе надолу. Матрицата $\vec{T}$ е с размери $n_c \times N_r$. Броят на редовете на матрицата n_c представлява броя на студените потоци $C_1, C_2, \dots, C_{n_c}$, а броят на стълбове N_r е равен на n_r (броя на горещите потоци $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{n_r}$) плюс общия брой на възникнали лупинги.

При различни комбинации на подреждане на студени потоци се получават $n_c!$ различни еквивалентни системи от каноничен вид. От еквивалентните топлообменни системи се избира *минималната канонична система*, тя е тази която има най-малък брой стълбове N_r . Преобразуването на системата показана на **Фиг. 1.1.а**, при последователност на студени потоци C_3, C_1, C_4, C_2 , води до минималната канонична система на **Фиг. 1.1.б**.



Фиг. 1.1 Привеждане на неразклонена СТА в каноничен вид

На последователност на студените потоци C_3, C_1, C_4, C_2 съответства вектора $\hat{i} = (3, 1, 4, 2)$. Матрицата $\vec{T}$ и векторите $\hat{d}_j^r$ указващи пътя на движение на горещи потоци през стълбовете на $\vec{T}$, за системата показана на **Фиг. 1.1.б**, са:

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 8 & 0 & 10 & 9 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 4 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 11 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 \\ 5 & 6 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 \end{bmatrix}; \quad \hat{d}_1^r = (1, 2); \quad \hat{d}_2^r = (3); \quad \hat{d}_3^r = (4, 5, 6, 7).$$

При втория основен етап се определят температурите на потоците на изхода от топлообменна система в каноничен вид, като за основа се използва базов случай на система с кръстосана схема на потоците, за която са в сила предварително изведени уравнения съответстващи на броя на студените потоци.

Изходящите температури от система с един студен поток и $j = 1, 2, \dots, N_r$ са:

$$\theta_{1j}''^r = (1 - \eta_{1j}^r) \theta_{1j}'^r + \eta_{1j}^r \sum_{k=1}^{j-1} \left[\left(\eta_{1k}^r R_{1k}^r \prod_{l=k+1}^{j-1} (1 - \eta_{1l}^r R_{1l}^r) \right) \theta_{1k}'^r \right] + \left(\eta_{1j}^r \prod_{k=1}^{j-1} (1 - \eta_{1k}^r R_{1k}^r) \right) \theta_{11}'^c \quad (1.1)$$

и

$$\theta_{1N_r}''^c = \sum_{k=1}^{N_r} \left[\left(\eta_{1k}^r R_{1k}^r \prod_{l=k+1}^{N_r} (1 - \eta_{1l}^r R_{1l}^r) \right) \theta_{1k}'^r \right] + \left(\prod_{k=1}^{N_r} (1 - \eta_{1k}^r R_{1k}^r) \right) \theta_{11}'^c. \quad (1.2)$$

При СТА с произволна неразклонена структура задачата се решава при използване на уравнения от вида (1.1) ÷ (1.2), с които се съставя система линейни алгебрични уравнения (СЛАУ) за неизвестните температури на горещите потоци, входящи в топлообменници от първия ред на матрица $\tilde{T}$. С полученото решение лесно се намират всички температури на системата.

ОБЩ МАТРИЧЕН МЕТОД НА РОЕТЦЕЛ И ЛУО

Чрез въвеждане на *матрици на съчетаване* Руетцел и Луо предлагат обща форма за аналитично решение на едномерен многопоточен топлообменник и на топлообменни системи, в които апаратът участва. В същността на матриците са заложили: (1) връзките между част от елементите на системата; (2) последователността на движение на флуидните потоци и (3) дяловото разпределение на топлинните капацитети на потоците. Матриците са следните: G – за съчетаване между каналите; G^I – за съчетаване на входовете в системата, с каналите (на ТОА в системата); G^{II} – за съчетаване на изходите от канали (на ТОА в системата), с изходите на системата; G^{III} – за съчетаване на байпасите.

Уравненията за изчисляване на векторите с температури на флуидните потоци на входа и изхода на каналите в топлообменници са:

$$\theta(x') = (I - G \dot{V})^{-1} G^I \theta^I \quad (1.3)$$

и

$$\theta(x'') = \dot{V} \theta(x') = \dot{V} (I - G \dot{V})^{-1} G^I \theta^I. \quad (1.4)$$

Както се вижда от (1.4) матрицата $\dot{V}$ установява връзката между входни и изходни температури на каналите в дадена система. Уравнението за определяне на температурите θ^{II} на изходящи от СТА потоци, при θ^I на входовете, е:

$$\theta^{II} = (G^{III} + G^{II} \dot{V} (I - G \dot{V})^{-1} G^I) \theta^I. \quad (1.5)$$

ОБОБЩЕН МАТРИЧЕН МЕТОД НА СТРЕЛОВ

Предложеният от Стрелов обобщен матричен метод е за системи от двупоточни топлообменни апарати работещи в стационарен режим. В математическия модел се използват три матрици за описание на структурата на топлообменна система и разпределението на потоците. *Входната* матрица $\tilde{S}^I$ съдържа нули и единици. Стълбовете на матрицата съответстват на входящите потоци в системата, а редовете съответстват на флуидните потоци преминаващи през каналите на топлообменниците. Стойността на елементите на *изходната* матрица $\tilde{S}^{II}$ показва какъв дял от изходящия поток i се дължи на флуида постъпил от канала j . Елементите на *структурната* матрица $\tilde{S}$ показват какъв дял от потока в канала i се дължи на флуида постъпил от канала j . Броят на редовете и стълбовете на $\tilde{S}$ е равен на общия брой на каналите в СТА.

Разработеният обобщен метод е на основа на принципа на свързани матрични уравнения. В резултат от такива уравнения се получава матрицата на *насочен температурен профил* $\vec{\Omega}_1$, даваща връзката между входни и изходни

температури на каналите в дадена система, а именно $\theta'' = \bar{\Omega}_1 \theta'$. В уравненията участват: матрицата на *сдвояване* $\tilde{K}$; матрицата на *пренос на топлина чрез топлопреминаване* H ; векторът на топлинните капацитети на флуидните потоци входящи в система W .

Така векторите с температурите на потоците на изхода от топлообменниците и от СТА се определят със следните матрични уравнения:

$$\theta'' = \Phi'' \theta' \quad (1.6)$$

и

$$\theta'' = \Phi'' \theta', \quad (1.7)$$

където Φ'' и Φ'' са функционалните матрици на каналите и на системата:

$$\Phi'' = (I - \bar{\Omega}_1 \tilde{S})^{-1} \bar{\Omega}_1 \tilde{S}' \quad (1.8)$$

и

$$\Phi'' = \tilde{S}'' \Phi'' = \tilde{S}'' (I - \bar{\Omega}_1 \tilde{S})^{-1} \bar{\Omega}_1 \tilde{S}'. \quad (1.9)$$

ИЗВОДИ

Относно предимствата на метода на каноничната форма:

- Методът позволява съставянето на общ универсален алгоритъм за улеснено въвеждане на информация, чрез която се описва структурата на неразклонени системи от топлообменни апарати.
- Системите от топлообменни апарати се привеждат в каноничен вид, на който съответства структурирана матрица. Структурираната матрица оптимизира последователността на изчисления, при използване на итерации като подход за намиране на крайното решение.
- Привеждането към каноничен вид дава удобна форма за представяне на редица системи от топлообменни апарати в универсален табличен вид, който може да се развие и геометрично.

Предимства на общия матричен метод на Роетцел и Луо и на обобщения матричен метод на Стрелов:

- Методите могат да се използват за анализ на системи с многопоточни топлообменници.
- След съставяне на математическия модел за дадена СТА лесно може да се намери решението, чрез използване на готов софтуерен продукт за решаване на СЛАУ или чрез прилагане на някой от методите за решаване.
- Използваните за математическия модел на Роетцел и Луо матрици на съчетаване са унифицирани, което ги прави лесни за ръчно построяване при малки системи от топлообменници.

Основни недостатъци на метода на каноничната форма:

- Разклонените топлообменни системи (т.е. СТА с разделяне и събиране на потоци) не могат да бъдат обект на анализ.

- При брой на студените потоци $n_c \geq 2$, уравненията от вида (1.1) ÷ (1.2) придобиват много по-сложен вид, а това е ограничение спрямо системите, които могат да бъдат анализирани без усложнения.
- Не се взема предвид зависимостта на топлофизичните характеристики на работните среди от температурата.

Слабости и недостатъци на общия метод на Роетцел и Луо и на обобщения метод на Стрелов:

- За дефиниране на взаимовръзките в система се предлагат матрици, които изискват сложен алгоритъм за автоматизирано построяване. От друга страна тяхното ръчно построяване за големи СТА е трудно и създава предпоставки за допускане на грешки.
- Не се взема предвид зависимостта на топлофизичните характеристики на работните среди от температурата.
- Температурата на смесване на флуидни потоци в анализирана топлообменна система се изчисляват по зависимост използваща топлинния капацитет на потоците. Това води до неточни резултати. Използването на итерации и актуализирането на стойността на топлинния капацитет не повишава точността на получените резултати за температура на смесване.
- Не се определят температурите на смесване на всички възли в система.
- Липсва анализ на дебита на флуидни потоци, като един от работните параметри на система.

ГЛАВА 2. АЛГОРИТЪМ ЗА ОПИСАНИЕ НА ТОПЛООБМЕННИ СИСТЕМИ С ПРОИЗВОЛНА СТРУКТУРА

Класическият метод на каноничната форма не включва варианта за разделяне и събиране на потоци в топлообменна система (разклонена топлообменна система), а това е най-често срещания случай в промишлеността и бита. При матричните методи представени в глава 1, за описание на взаимната свързаност между елементи в модела на разклонени системи се използват матрици на съчетаване. В настоящата работа е потърсена възможност за еднозначно описание на такива топлообменни системи чрез теория на графите.

Графът е съвкупност от точки наричани върхове (*възли*) и съвкупност от съединяващи ги линии наричани ребра. Така *крайният* граф G се дефинира като съвкупност от n на брой *възли* (*vertices*) $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ и m на брой *ребра* (*edges*) $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, т.е. $G(V, E)$. В дадена топлообменна система възли могат да бъдат: разпределителни колектори, събирателни колектори, смесители, сепаратори, тройници, трипътни вентили, четирипътни вентили и т.н. Флуидните потоци протичащи в линии между възлите се явяват ребра (клони) на системата.

Дадено ребро може да се означае още и с двойка числа (v_i, v_j) , които са номерата на възлите свързани от реброто. Реброто (v_i, v_j) е *ориентирано*, когато описва път съществуващ от възела v_i до възела v_j , но не и обратното.

Такова ребро се нарича *дъга* (arc), но тъй като по отношение на системите от топлообменни апарати е по-подходящо да се използва наименованието *клон*. Възелът v_i е *начален*, а v_j е *краен* за клоната (v_i, v_j) . Клон (ребро), който свързва даден възел със същия този възел се нарича *примка*. *Съседството* е отношение между два еднородни елемента (само между възли или само между ребра), а *инцидентността* е отношение между разнородни елементи. Два възела, които са свързани от общо ребро са *инцидентни* на реброто, както и реброто е *инцидентно* на тези два възела. Две или повече ребра са *инцидентни* на общия възел, с който са свързани. Два възела са *съседни*, ако са свързани от едно общо ребро. Два клона са *съседни*, ако имат един общ възел, т.е. ако са *инцидентни* с един и същ възел.

Даден клон е *входящ* за възела, ако по него може да се пристигне от съседен възел. Този съседен възел се явява *предшественик* на възела, към който се отива. *Клонът* е *изходящ* за възела, ако по него може да се достигне до съседен възел и този съседен възел се явява *наследник* на възела, от който се идва. *Полустепен на входа* $d'(v_i)$ на възела v_i в ориентиран граф се нарича броят на клоните входящи в този възел и съответно *полустепенята на изхода* на възела $d''(v_i)$ е броят на клоните изходящи от възела. *Път в граф* се нарича наредена последователност от свързани съседни възли. Когато началният и крайният възел на пътя съвпадат, той се отъждествява с *цикъл*.

За създаване на модел на система от топлообменни апарати е необходимо да се дефинират връзките между елементите на системата. В теория на графите това се извършва чрез *представяне* на граф. Има четири основни начина за дефиниране на връзките между елементите на граф (*представяне* на граф), а именно чрез: (1) матрицата на съседство; (2) матрица на инцидентност; (3) списък на съседство; (4) списък на клоните (ребрата).

Анализът показва, че най-подходящия начин за представяне на СТА е чрез списъци на клоните, тъй като: (1) е ефикасен, когато графът е силно разреден, с което са характерни СТА; (2) топлообменниците са съставна част на клоните на дадена система; (3) лесно се представят примки и паралелни клони; (4) използват се вектори, в чиито елементи няма нулеви стойности, за разлика от матриците, които са разреждени или силно разреждени. Представянето чрез списък на клоните се извършва с техните двойки инцидентни възли (v_i, v_j) , т.е. с две числа $\in \mathbb{N}$, съответно в двата края на всеки клон e_k ($k = 1, 2, \dots, m$). Първото число е началният възел за клоната, а второто число е крайният възел за клоната.

За целите на настоящата работа е възприето номерата на възлите да съвпадат с индексите на дадено множество от възли, а именно $v_k \equiv k$. Същото е в сила и за клоните: $e_i \equiv i$.

За моделиране на мрежите (гореща и студена) на СТА са възможни различни варианти на въвеждане на данни и построяване на граф. В резултат на анализа на редица възможности се предлага оптимален подход за описание на системи от топлообменни апарати. Той се характеризира с максимално улеснено въвеждане на информация и е съобразен със спецификата на СТА.

Топлообменниците са основни елементи на една топлообменна система, затова е най-подходящо те да заемат водеща роля при въвеждане на информация за моделиране на СТА. При предложения подход за описание на структурата на система, в резултат от насоките, които дава алгоритъмът относно последователността на действия, е достатъчно единствено въвеждането на: (1) номерата на топлообменни апарати и (2) номерата на клони без топлообменници. В резултат от тяхното въвеждане автоматично се получава инициализиране (номериране) на клони, а след това с допълнителен алгоритъм се инициализират и възлите.

АЛГОРИТЪМ ЗА ОПИСАНИЕ НА СТРУКТУРАТА НА СТА

Обобщеният вид на предложения алгоритъм е следния:

1. Въвеждане на броя на входящите в системата горещи/студени потоци. С тях се инициализират стартовите възли при обхождане на графа за въвеждане на необходимите данни. Входящите горещи и входящите студени потоци като такива са предварително избрани от общото множество на входящи флуидни потоци в описваната система.

2. Въвеждане на номерата на топлообменни апарати и на клони без ТОА. Клонът се описва с последователност от номера на топлообменници. Възелът се описва чрез изходящите от него клони. За целта се използват номерата на първите ТОА на клоните и/или номерата на клони без топлообменници.

3. Проверка за коректност при въвеждане. Тази проверка е разделена на три нива: (1) при въвеждане на елементи на мрежа; (2) след въвеждане на мрежата на горещи/студени потоци; (3) след въвеждане на цялата система. Те имат следните цели:

- а. проверка за неправомерно дублиране на номерата на топлообменни апарати и на номерата клони без топлообменници;
- б. проверка за наличие на възел, за които липсва път до изходите от СТА;
- в. проверка за съответствие на номерата на топлообменни апарати в мрежите на студени и горещи потоци, т.е. на всеки един топлообменник от мрежата на студени потоци е необходимо да съответства само един апарат от мрежата на горещи потоци.

4. Отстраняване на възли с един входящ и един изходящ клон, т.е. възли, за които са изпълнени едновременно условията $d'(v_i) = 1$ и $d''(v_i) = 1$. Съществуването на такива възли е ненужно и допълнително натоварва изчислителния процес. Това налага откриването на тези възли и отстраняването им чрез сливане на клоните, които те свързват. Непосредствено след това се извършва преномериране на множеството от клони.

5. Автоматично номериране на възлите. Първоначално се инициализират възлите на входа на системата, а след това възлите в края на клоните, при следните условия:

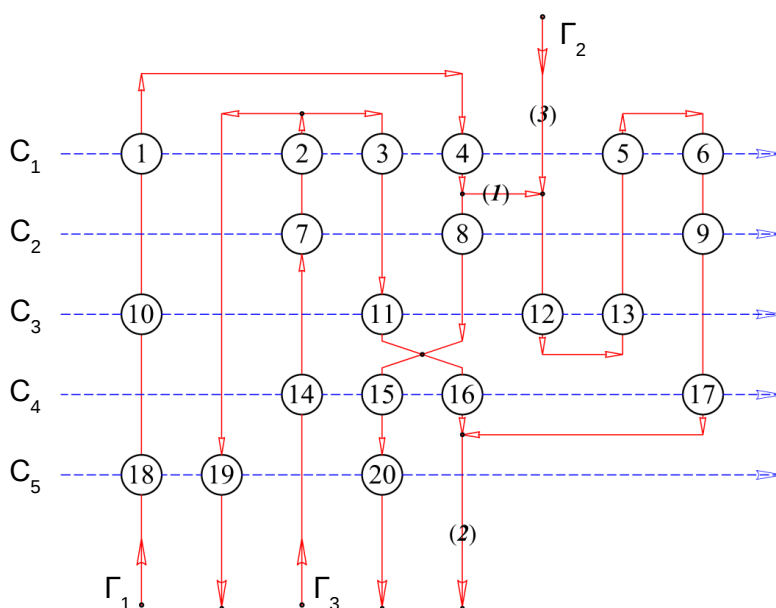
- нарастваща последователност на номерата на клони;
- всички клони входящи във възела имат в началото си номериран възел;
- последни се номерират възлите на изхода от системата.

6. Въвеждане на разпределителната характеристика на възлите, притежаващи повече от един изходящ клон. Задава се в проценти, последователно за всички $k - 1$ на брой изходящи клони, където k е общият брой на изходящи клони от възела. На последния клон автоматично се присвоява разликата до 100%.

Някои от детайлите свързани с алгоритъма са представени по-долу.

Въвеждане на информация за описание на структурата на СТА

Като пример за въвеждане на информация по описание на мрежите на горещи и студени потоци е използвана произволна средно сложна СТА, представена на **Фиг. 2.1**. Системата има 20 топлообменници номерирани в последователен ред с числа $\in \mathbb{N}$. Клоните без топлообменници са три на брой и са номерирани в последователен ред от 1 до 3. Този вид клони (без апарати) са от мрежата на горещи потоци и номерата им са заградени с кръгли скоби. При въвеждане на информация се използва диалогов режим за комуникация, като стойностите се записват основно във вектори и матрици. Ако те са за горещата мрежа, означенията са с индекс „Г“, а за студената с индекс „С“.



Фиг. 2.1 Схема на средно сложна система от топлообменни апарати

Номерата на топлообменни апарати на гореща мрежа се съхраняват в матрица $T^Г$. Индексите на редовете на $T^Г$ съответстват на номера на клони. За информация относно броя на апаратите във всеки клон се използва вектора $b^Г$, като стойността на елемента $b_i^Г$ показва броя топлообменници в ред i на матрица $T^Г$. Клоните без ТОА имат нулеви елементи във вектора $b^Г$. Този вид клони ще се наричат още *свързващи клони*. Въведените номера се явяват като „име“ на клоните без апарати и се записват във вектора $\tilde{l}^Г$. Посоченият брой на входящи горещи потоци в система се присвоява на скалара n_r' . Клоните с номера от 1 до n_r' съвпадат с номерата на входящите потоци в гореща мрежа. За временно представяне на мрежата се използва *списък на наследници*. Елементите на *списъка на наследници* се записват в матрица E'' , а броя на записани елементи

по редове се посочва във вектора b'' . Така в списъка E'' на ред i , се съхраняват наследниците на клона e_i , т.е. клоните които излизат от крайния възел на клона.

Описанието на клон се състои от последователно въвеждане на номерата на ТОА или като се посочи номера на свързващ клон. При изброяването на апарати има две възможности за завършване на описанието на клон – чрез въвеждане на символа „Е“ или на символа „N“. Символът „Е“ има смисъла на „Изход“ („Exit“) и тогава клонът се явява изходящ за системата, т.е. след последния топлообменник на клона следва изходен възел на мрежата. Символът „N“ означава „Няма“ („No“) топлообменник и тогава след последния въведен ТОА има възел, който за описвания клон се явява краен, но е начален за следващ/и клон/и. Въвеждането на символа „N“ води към описание на този възел.

При *описание на възел* се посочат наследниците на даден клон e_i . Това става чрез въвеждане на първия ТОА на тези клони наследници или чрез номера (име) на свързващ клон, когато се въвежда клон без апарати. Индикация за това, че предстои въвеждане на свързващ клон се дава със символа „N“ – „Няма“ („No“) апарати в клона. След като се посочи информацията за всички наследници, описанието на възел завършва със символа „Е“ – „Край“ („End“).

В резултат на въвеждане на информацията за системата показана на **Фиг. 2.1**, се получават скаларите $n'_r = 3$ и $n'_c = 5$. Съответните матрици и вектори са:

$$\begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 : \\ e_7 \\ e_8 \\ e_9 \\ e_{10} \\ e_{11} \end{matrix} : T^r = \begin{bmatrix} 18 & 10 & 1 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 7 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12 & 13 & 5 & 6 & 9 & 17 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 19 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \check{t}^r = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad E'' = \begin{bmatrix} 4 & 5 \\ 8 & 0 \\ 10 & 11 \\ 6 & 7 \\ 8 & 0 \\ 0 & 0 \\ 9 & 0 \\ 9 & 0 \\ 0 & 0 \\ 6 & 7 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad b'' = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad b^r = \begin{bmatrix} 4 \\ 0 \\ 3 \\ 1 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \\ 6 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 : \\ e_4 \\ e_5 \end{matrix} : T^c = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 11 & 12 & 13 & 0 & 0 \\ 14 & 15 & 16 & 17 & 0 & 0 \\ 18 & 19 & 20 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \check{t}^c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad E'' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad b'' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad b^c = \begin{bmatrix} 6 \\ 3 \\ 4 \\ 4 \\ 3 \end{bmatrix}.$$

Инициализиране на възли

След завършване на процеса по въвеждане на информация за описание на структурата на мрежа, номерата на възлите се явяват неизвестни, затова е необходимо възлите да се инициализират. Номерирането в съответствие с движението на потоци през възлите води до разширяване на възможностите при извършване на последващи анализи. Така за да се присвои номер на даден възел v_k , е необходимо да бъде изпълнено условието: всички предшественици на този възел да са инициализирани (номерирани). Ако това условие не е изпълнено, но се установи, че някой от клоните входящи във възела v_k са съставна част на цикъл в графа (т.е. рециркулация), тогава възелът v_k може да бъде номериран, въпреки че на някой от неговите предшественици все още не е

присвоен номер. Това изключение се налага, тъй като този предшественик участва в цикъла, от което следва, че на следващ етап той също няма да бъде инициализиран, ако не се приложи изключение за такъв случай.

Инициализирането съчетава две основни действия: номериране на възли и представяне на граф чрез списък на клоните. Векторите, които се използват за гореща мрежа са v'^Γ и v''^Γ , като за $i^{-\text{тия}}$ клон (или e_i^Γ) възелът $v_i'^\Gamma$ е начален, а $v_i''^\Gamma$ е краен. Във вектори v'^c и v''^c се записват начални и крайни възли на клоните в студена мрежа. Първи се инициализират началните възли на входящите потоци: за гореща мрежа от 1 до n'_r , а за студена мрежа от 1 до n'_c . Изходните възли на двете мрежи са и крайни за изходящите потоци на система. Те се определят чрез анализ на съответната мрежа, а броя им се присвоява на n''_r и n''_c . Процесът на инициализиране завършва с тези възли, като номерата им са последни.

Разделяне на клоните на множества

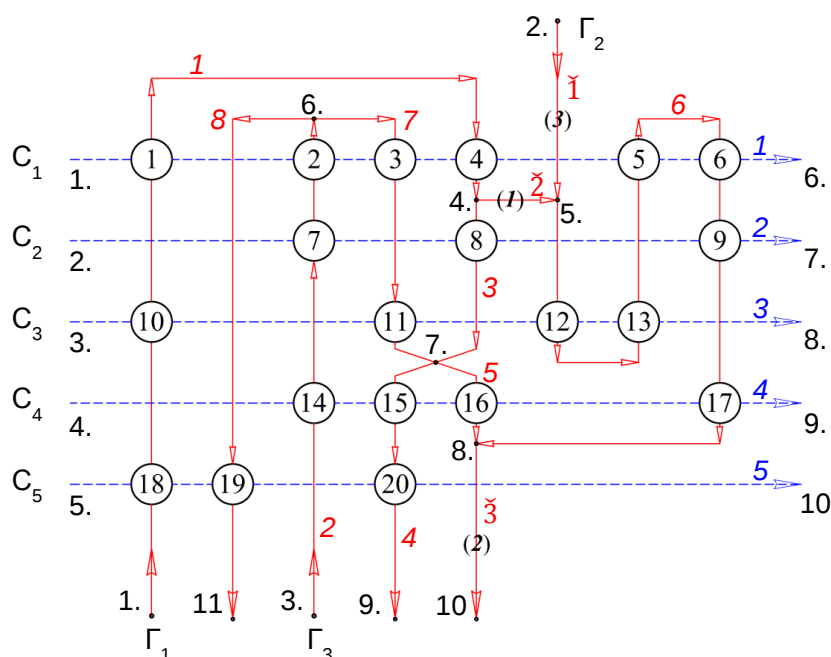
Мрежите на горещи и студени потоци са съставени основно от клони с топлообменни апарати, но в тях могат да присъстват и „свързващи“ клони. Целесъобразно е клоните на съответните мрежи да се разделят на две подмножества, в зависимост от това дали съдържат ТОА или не съдържат. Номерата на клони от множеството на свързващи клони (ако има такива) са в интервала от 1 до $\tilde{m}_r$ за мрежа от горещи потоци, където $\tilde{m}_r$ е броят на свързващи клони в горещата мрежа. Аналогично номерата на свързващи клони в студената мрежа са в интервала от 1 до $\tilde{m}_c$. При разделянето на клоните на множества, информацията записана за $i^{-\text{тия}}$ клон (идентифициран като свързващ) от вектори v'^Γ и v''^Γ се пренася във вектори $\check{v}'^\Gamma$ и $\check{v}''^\Gamma$, съдържащи начални и крайни възли за новите номера на свързващи клони. След изпълнение на всички операции е необходимо да се актуализира информацията в T^Γ , b^Γ , $\check{l}^{\text{вр}}$, v'^Γ и v''^Γ , като се вземе предвид преместването на $i^{-\text{тия}}$ клон към друго множество.

Резултатът от инициализирането на възли и разделянето на множества може да се проследи за системата показана на **Фиг. 2.1**. Само горещата мрежа е разклонена и затова се представят структурите от данни за нея:

$$\begin{array}{l}
 e_1 \\
 e_2 \\
 e_3 \\
 e_4 : \\
 e_5 : \\
 e_6 \\
 e_7 \\
 e_8
 \end{array}
 T^\Gamma = \begin{bmatrix} 18 & 10 & 1 & 4 & 0 & 0 \\ 14 & 7 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12 & 13 & 5 & 6 & 9 & 17 \\ 3 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 19 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};
 \quad
 b^\Gamma = \begin{bmatrix} 4 \\ 3 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 6 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix};
 \quad
 v'^\Gamma = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 4 \\ 7 \\ 7 \\ 5 \\ 6 \\ 6 \end{bmatrix};
 \quad
 v''^\Gamma = \begin{bmatrix} 4 \\ 6 \\ 7 \\ 9 \\ 8 \\ 8 \\ 7 \\ 11 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{array}{l}
 \check{e}_1 \\
 \check{e}_2 : \\
 \check{e}_3
 \end{array}
 \check{l}^\Gamma = \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix};
 \quad
 \check{v}'^\Gamma = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 8 \end{bmatrix};
 \quad
 \check{v}''^\Gamma = \begin{bmatrix} 5 \\ 5 \\ 10 \end{bmatrix}.$$

Визуализацията на резултата за цялата система може да се види на **Фиг. 2.2**. Номерата на свързващи клони са обозначени на схемата по характерния начин за този вид клони: 1, 2 и 3.



Фиг. 2.2 СТА с инициализирани възли и клони разделени на множества

Въвеждане на разпределителната характеристика на възли

За изчисленията, свързани с процесите протичащи в топлообменници и процесите на смесване във възли, е необходимо да е известен масовият дебит на флуидния поток във всеки клон на двете мрежи. При разклонени системи е възможно в даден клон да протичат едновременно различни дялове от масовите дебители на входящите потоци в гореща/студена мрежа. Така потокът в даден клон е съвкупност от дялове на входящите потоци в системата. Входящите флуидни потоци в дадена мрежа могат да бъдат както от един вид вещество, така те могат да бъдат и различни вещества.

Чрез задаване на *разпределителната характеристика на възлите* и построяване на матрици R'' и $\tilde{R}''$ лесно се дефинира разпределението на флуидни потоци в система от топлообменни апарати. Матриците R'' и $\tilde{R}''$ се използват в предложените в следващата глава методи за определяне на разпределението на входящите флуидни потоци в система по клоните на системата. Разпределителната характеристика се отнася до входящите флуидни потоци в мрежа и тя показва от общия масов дебит на даден възел v_k какъв дял постъпва в негов изходящ клон. Общият масов дебит на възела е сума от дебитите на потоци (клони) входящи във възела. В даден възел v_k е възможно да има различна степен на смесване или на сепариране при преминаване на различни вещества през възела, по тази причина за задаване на разпределителната характеристика се използват матрици, а не вектори.

Матриците R'' и $\tilde{R}''$ могат да бъдат сформирани за системата представена на **Фиг. 2.2**, при задаване на примерни стойности за разпределяне на потоци.

През възел v_4^r (№ 4) преминава единствено входящият поток Γ_1 , през v_6^r (№ 6) преминава входящият поток Γ_3 , а през възел v_7^r (№ 7) преминават входящите потоци Γ_1 и Γ_3 . Ако масовият дебит в тези възли се разпределя както следва:

- във възел v_4^r , в съотношение 25% към клон № 3 и 75% към свързващ клон № 2;
- във възел v_6^r , в съотношение 70% към клон № 7 и 30% към клон № 8;
- във възел v_7^r :
 - за входящ поток Γ_1 , в съотношение 40% към клон № 4 и 60% към клон № 5;
 - за входящ поток Γ_3 , в съотношение 20% към клон № 4 и 80% към клон № 5,

тогава елементите на матрици R'' и $\check{R}''$ ще получат стойности:

$$R'' = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & \Gamma_2 & \Gamma_3 \\ 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \\ 25 & 0 & 0 \\ 40 & 0 & 20 \\ 60 & 0 & 80 \\ 100 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 70 \\ 0 & 0 & 30 \end{bmatrix} \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ e_8 \end{matrix}; \quad \check{R}'' = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & \Gamma_2 & \Gamma_3 \\ 0 & 100 & 0 \\ 75 & 0 & 0 \\ 100 & 100 & 100 \end{bmatrix} \begin{matrix} \check{e}_1 \\ \check{e}_2 \\ \check{e}_3 \end{matrix} \quad (2.1)$$

ИЗВОДИ

Предложеният в настоящата глава метод дава възможност за еднозначно описание на структурата на разклонена топлообменна система, във вид на ориентиран граф. Представянето на графа (системата) се извършва чрез списъци на клонове, като съответната информация се записва във вектори. Тези вектори намират приложение във всеки следващ етап от решаването на задачата за анализ на СТА.

Матриците R'' и $\check{R}''$ се използват в предложените в следващата глава методи за определяне на разпределението на входящите флуидни потоци в система по клоните на системата.

ГЛАВА 3. АЛГОРИТЪМ ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ДВИЖЕНИЕТО НА ПОТОЦИТЕ

Алгоритъмът за идентификация на движението на потоците има две задачи: (1) да се извърши анализ на движението на флуидните потоци в гореща/студена мрежа и да се определи разпределението на масовия дебит на входящите потоци по клонове; (2) за клоните с топлообменни апарати, да се извърши съвместен анализ на флуидните потоци и топлинните потоци от топлопреминаване. В резултат на втория анализ системата се разделя на групи от подсистеми, които могат да се преобразуват в каноничен вид, независимо една от друга.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ДВИЖЕНИЕТО НА ФЛУИДНИТЕ ПОТОЦИ

За изчисленията, които се извършват при анализа на системи от топлообменни апарати, е необходимо да бъдат определени топлинния капацитет и/или енталпията на потоците. Те се използват при пресмятания свързани с топлообменните процеси в апарати и процесите на смесване във възли на система. За тяхното определяне е необходимо да е известен масовият дебит на флуидния поток. Този дебит е един и същ както за даден клон e_i , така и за топлообменниците отнасящи се към клон e_i , затова не се налага той да бъде изчислен за всеки апарат поотделно, а е достатъчно да се определи само за клоните на система.

Когато с входящите потоци в дадена система не постъпва само едно вещество и системата е разклонена, има вероятност в някои от нейните възли да се получи смесване на тези входящи потоци, в следствие на което по определени клони ще протича смес от различни материални среди. По тази причина и поради различието в топлофизичните характеристики на веществата се налага да се определи дяловото разпределение на масовия дебит на входящите потоци по всички клони на системата. Дяловете на разпределение формират матрица $\ddot{R}$, чиито редове съответстват на клоните на мрежа, а стълбовете съответстват на входящите потоци в мрежа (за свързващите клони матрицата е $\check{R}$). Така стойността на елемента $\ddot{r}_{is}$ е делът от масовия дебит на s -тия входящ поток в мрежа, протичащ с флуидния поток в i -тия клон на мрежата.

В настоящата работа се предлагат два метода за определяне на дяловото разпределение на входящите потоци по клоните на СТА, която е моделирана чрез разпределителната характеристика на възлите. Първият метод е матричен и намира търсеното решение независимо от начина на номериране на възлите в система. Вторият метод се основава на извършването на последователен масов баланс във възлите на анализирана система.

Матричен метод, чрез системи линейни уравнения

В предложения матричен метод се съставят системи уравнения $Ax = b$ за всички n'_r входящи потоци в гореща мрежа (ако тя се приеме за представителна). След намиране на решенията на всички съставени СЛАУ се получават n'_r на брой вектори. Елементите на тези вектори се използват като стълбове за построяване на матрици $\ddot{R}^r$ и $\check{R}^r$. При съставяне на s -та по ред СЛАУ ($s = 1, 2, \dots, n'_r$) за s -тия входящ поток в мрежа, ако в последната няма свързващи клони коефициентите $a_{i,j}$ и b_i ($i, j = 1, 2, \dots, \ddot{m}_r$) се определят по:

$$a_{i,j} = a_{i,j}^{(1)} - a_{i,j}^{(2)} / 100,$$

където:

$$a_{i,j}^{(1)} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}; \quad a_{i,j}^{(2)} = \begin{cases} r''_{is}, & v_i'^r = v_j''^r \\ 0, & v_i'^r \neq v_j''^r \end{cases} \quad (3.1)$$

и

$$b_i = \begin{cases} r''_{is}, & v_i'^r = s \\ 0, & v_i'^r \neq s \end{cases}. \quad (3.2)$$

За да се сформират и двете матрици $\ddot{R}^r$ и $\check{R}^r$ е необходимо към клоните с топлообменници да се отнесат и свързващите клони ($i, j = 1, 2, \dots, \ddot{m}_r, \ddot{m}_r + 1, \dots, \ddot{m}_r + \check{m}_r$), и елементите $\check{r}_{is}'$, след което да се съставят n'_r на брой системи линейни алгебрични уравнения и да се намерят техните n'_r на брой решения.

За да се спести съставянето на n'_r на брой СЛАУ (характерни със силно разредените си матрици A), както и намирането след това на техните решения n'_r на брой пъти, се предлага алтернативен подход за получаване на матрици $\ddot{R}$ и $\check{R}$.

Метод на последователен масов баланс във възлите на система

Разработен е метод на последователен масов баланс във възлите на анализирана система, на основата на който е извършено алгоритмизиране.

Предложеният алгоритъм изисква малки ресурси за съхраняване на информация, има висока изчислителна скорост и ако в мрежата няма цикъл (рециркуляция) стойностите на елементите в $\ddot{R}$ и $\check{R}$ се получават чрез директно изчисление, като по този начин не се губи точност, за разлика от някои методи за решаване на СЛАУ. Когато в мрежата има цикъл (рециркуляция) се преминава към итерации, чрез които бързо се достига до резултатите удовлетворяващи предварително зададена точност. Изброените предимства на предложения подход се основават на последователността на провеждане на изчисления по възли, която следва посоката на движение на потоците. Това е възможно в резултат от използваните критерии в алгоритъма за инициализиране на възли, представен във втора глава.

С данните получени в (2.1) се построяват и по двата предложени методи следните матрици $\ddot{R}^r$ и $\check{R}^r$:

$$\ddot{R}^r = \begin{matrix} & \begin{matrix} \Gamma_1 & \Gamma_2 & \Gamma_3 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \\ 25 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 14 \\ 15 & 0 & 56 \\ 75 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 70 \\ 0 & 0 & 30 \end{bmatrix} & \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ e_8 \end{matrix} \end{matrix} \quad \check{R}^r = \begin{matrix} & \begin{matrix} \Gamma_1 & \Gamma_2 & \Gamma_3 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 100 & 0 \\ 75 & 0 & 0 \\ 90 & 100 & 56 \end{bmatrix} & \begin{matrix} \check{e}_1 \\ \check{e}_2 \\ \check{e}_3 \end{matrix} \end{matrix} \quad (3.3)$$

Въз основа на получените матрици може да се изчисли делът (в kg/s) от масовия дебит $\dot{m}_s'^{r(c)}$ на всеки входящ поток протичащ по даден клон e_i или $\check{e}_i$ на разклонена топлообменна система. Лесно се пресмята и масовият дебит на клона като цяло.

Нека за разглеждания пример се допусне, че масовите дебители на горещи потоци входящи в системата са: $\dot{m}_1'^r = 10 \text{ kg/s}$; $\dot{m}_2'^r = 20 \text{ kg/s}$ и $\dot{m}_3'^r = 30 \text{ kg/s}$. Ако е необходимо да се определи какви количества от тях преминават по клон №5, се извършват следните изчисления:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{5,1}^r &= \ddot{r}_{5,1}^r \dot{m}_1'^r = 0,15 \times 10 = 1,5 \text{ kg/s}; \\ \dot{m}_{5,2}^r &= \ddot{r}_{5,2}^r \dot{m}_2'^r = 0 \times 20 = 0 \text{ kg/s}; \\ \dot{m}_{5,3}^r &= \ddot{r}_{5,3}^r \dot{m}_3'^r = 0,56 \times 30 = 16,8 \text{ kg/s}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Масовият дебит на флуидния поток протичащ по клон №5 е:

$$\dot{m}_5^r = \sum_{j=1}^3 \ddot{r}_{5,j}^r \dot{m}_j'^r = 1,5 + 0 + 16,8 = 18,3 \text{ kg/s}. \quad (3.5)$$

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ДВИЖЕНИЕТО НА ФЛУИДНИ И ТОПЛИННИ ПОТОЦИ

За привеждането на една топлообменна система в минимален каноничен вид е необходимо да се генерират $\dot{m}_c!$ пермутации и да се извършат съответните изчисления. Всяко нарастване на броя на тези студени клоно води до драстично увеличаване на времето за генериране на всички комбинации и за извършване на съответните изчисленията. Във връзка с това възниква въпросът за ограничаване на нарастването на времето за изчисления.

Системата като съвкупност от подсистеми

Една възможност за такова ограничаване е редуцирането на броя на пермутациите чрез формиране на групи от горещи и студени потоци, когато структурата на топлообменна система го позволява. Тези групи се явяват подсистеми от топлообменни апарати сформирани от множеството на клоновете с ТОА, в които флуидните и топлинните потоци преминават вътре в подсистемата, но не и между отделните подсистеми. Така генерирането на пермутации се извършва поотделно за студените клоновете на всяка подсистема, а броят на тези клоновете е по-малък от общия за системата. За идентификация на отделните подсистеми се извършва анализ на множеството на клоновете с топлообменници, докато множеството от свързващи клоновете не е обект на анализа.

Алгоритъм за идентификация

За определяне на съответните групи е предложен алгоритъм за идентификация на движението на флуидни и топлинни потоци. В резултат от приложението му се получават вектори $\ddot{g}^r$ и $\ddot{g}^c$, както и скалара $\ddot{g}$, който показва какъв е броят на групите (подсистеми) в анализирана топлообменна система. Елементите на вектори $\ddot{g}^r$ и $\ddot{g}^c$ показват всеки i -ти клон към коя група се отнася.

ИЗВОДИ

Предложени са два метода за определяне на дяловото разпределение на входящите потоци по клоновете на СТА. Полученото в матрици $\ddot{R}^{r(c)}$ и $\ddot{R}^{r(c)}$ дялово разпределение се използва в методите към пета глава, както за определяне на температурата на смесване на флуидни потоци, така и за намиране на температурите на потоците изходящи от топлообменни апарати.

Идентифицирането на подсистеми в СТА е от значение за системите с голям брой клоновете на студени потоци. Предложеният алгоритъм идентифицира успешно всички подсистеми и разпределя техните елементи в групи.

ГЛАВА 4. ПРИВЕЖДАНЕ НА ПРОИЗВОЛНА СТРУКТУРА В КАНОНИЧЕН ВИД

Използваният от авторите на каноничната форма подход за описание на структурата на система от топлообменници и привеждането ѝ в каноничен вид има редица недостатъци, затова в настоящата глава се представя алтернативен подход и произтичащия от него цялостен алгоритъм. Необходимостта от такова предложение е продиктувана от следните фактори:

- Критериите за намиране на последователност от студени потоци $C_1, C_2, \dots, C_{n'_c \equiv \dot{m}_c}$, при която се получава еквивалентна топлообменна система от каноничен вид с минимален брой стълбове на матрица $\ddot{T}$, не са коректни. Те не винаги водят до минимална канонична система, дори напротив – има случаи, когато критериите предложени в класическия метод са изпълнени, но матрицата $\ddot{T}$ се получава с повече стълбове от търсения минимум.
- Не всяка еквивалентна топлообменна система с минимален брой стълбове на $\ddot{T}$ води до крайно решение. Има схеми на топлообменни системи, за

които при дадена последователност от студени потоци (вектора $\hat{i}$) се получава минимална канонична система, но е невъзможно стълбовете на матрица $\ddot{T}$ да бъдат пренаредени в съответствие с пътя на движение на студените потоци през топлообменните апарати.

- При системи с голям брой студени потоци или клони (от множеството с топлообменници), процесът на генериране на всички възможни пермутации и съпътстващите изчисления изискват изключително много време.
- Векторите $\hat{a}_1^r, \hat{a}_2^r, \dots, \hat{a}_{n_r}^r$, определящи пътя за движение на флуидните потоци в матрица $\ddot{T}$ не са ефективни при разклонени топлообменни системи приведени в каноничен вид. По тази причина е необходимо да се потърси друг подход за представяне на пътя на движение на потоците и на взаимната свързаност на редове и стълбове в $\ddot{T}$.
- Предложеният метод за пренареждане на стълбове в матрица $\ddot{T}$ не е оптимален, тъй като използването му при някои схеми води до по-голям брой неизвестни начални температури на горещи потоци, входящи в топлообменници от първия ред на $\ddot{T}$. Чрез усъвършенстване на метода е възможно тези пропуски да бъдат отстранени.

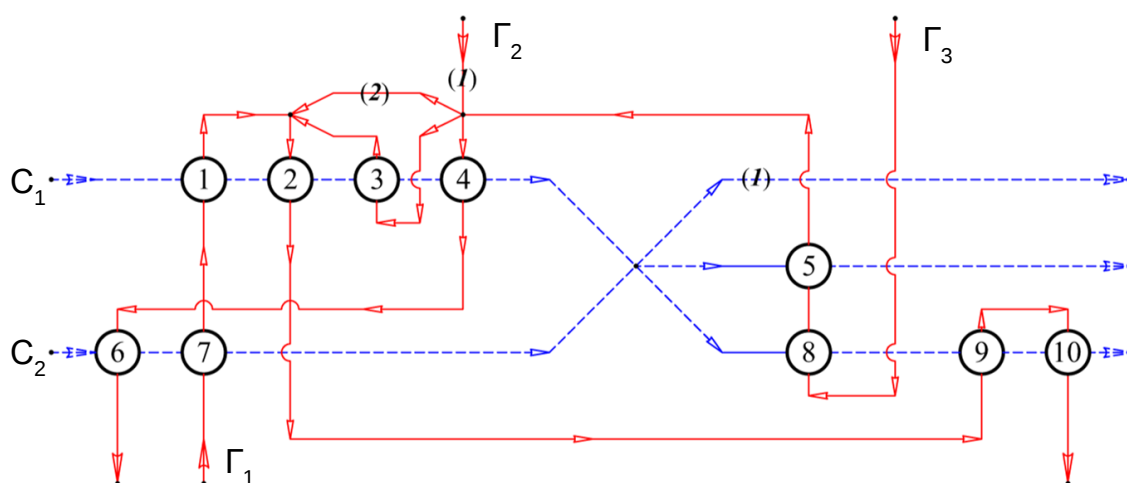
АЛГОРИТЪМ ЗА ПРИВЕЖДАНЕ КЪМ СТА В КАНОНИЧЕН ВИД

Предлага се цялостен алгоритъм за привеждане на система от топлообменни апарати към оптимална канонична система. Алгоритъмът се прилага след като структурата на системата е описана според глава втора. Той има следната последователност от действия:

1. Построяване на матрицата $\ddot{O}^r$ по процедурата от т.1.1.1 (в дисертацията).
2. Идентифициране на подсистемите по метода представен в т.3.2.2 (на дисертацията).
3. Стартиране на цикъл за последователно обхождане на подсистемите, а именно $k = 1, 2, \dots, \ddot{g}$. Зоната на действие на цикъла е в интервала на стъпки $4 \div 14$.
4. Построяване на структури от данни за поредната $k^{-та}$ подсистема, така че тя да бъде представена като топлообменна система без свързващи клони. С информацията на $k^{-та}$ подсистема се оперира в стъпки $5 \div 14$ по отношение на множествата на клоните с топлообменни апарати.
5. Построяване на матрицата $\ddot{O}^r$ за $k^{-та}$ подсистема.
6. Сформиране на матрицата на предхождания $\ddot{W}$ (т.1.1.1. в дисертацията) за $k^{-та}$ подсистема.
7. Генериране на всички възможни варианти на последователности (пермутации) от номерата на студените клони на $k^{-та}$ подсистема. За всяка генерирана пермутация се изпълняват стъпки 8 и 9.
8. Определяне на броя на стълбове $\ddot{M}_r$ за текущия вариант на последователност.
9. Построяване на матрицата Π по метода представен в т.4.1.4 (на дисертацията).

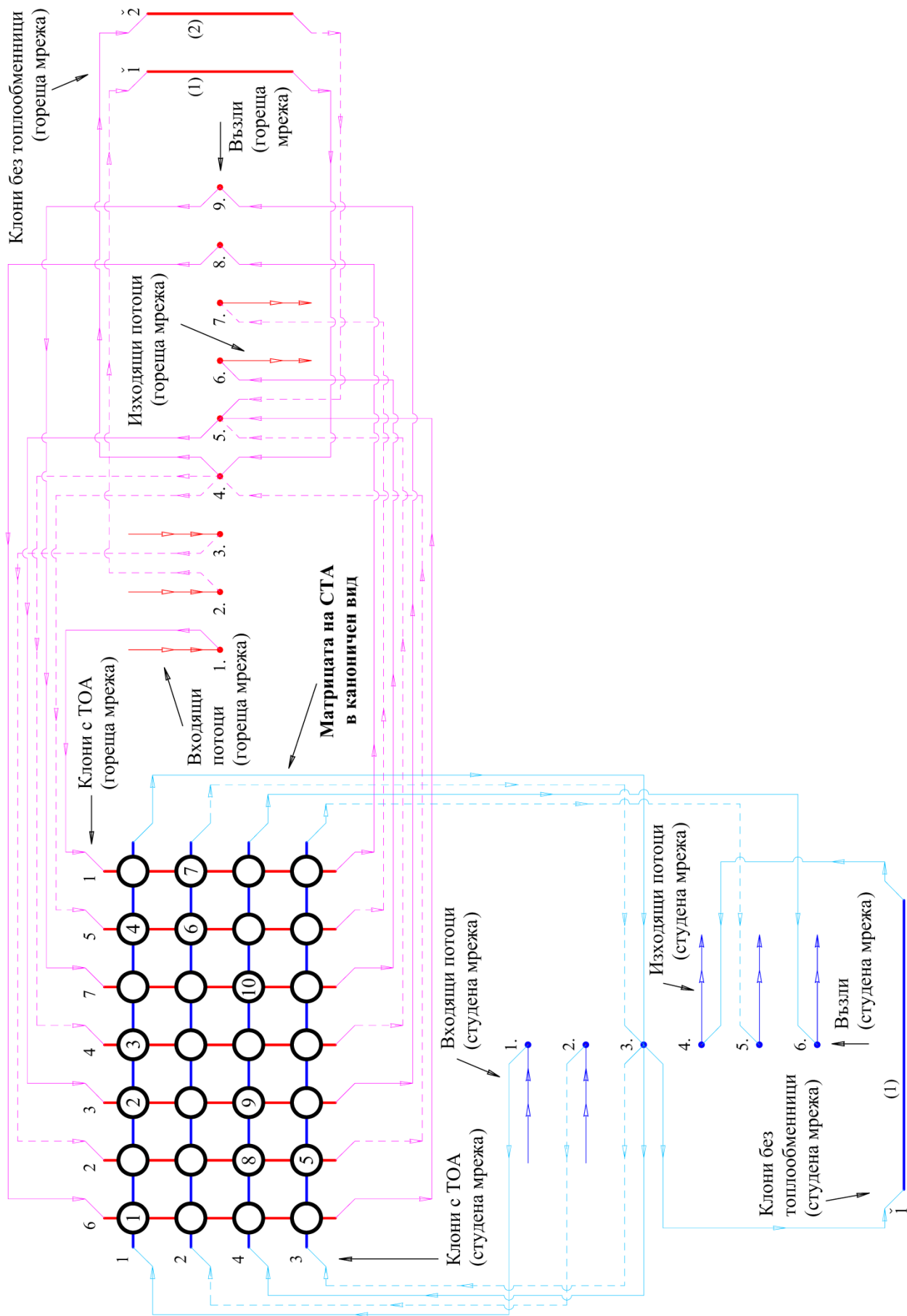
10. Обхождане на всички комбинации записани в матрицата Π . Обхождането обхваща стъпки 11 ÷ 13.
11. Формиране на матрица $\ddot{T}$ при текущия за обхождането вариант на последователност на студените клони.
12. Изпълнение на подалгоритъма от т.4.1.3 (в дисертацията) относно сходимостта на системата.
13. Определяне по т.4.1.4 (в дисертацията) на крайния вариант за подреденост на студените клони на $k^{-та}$ подсистема.
14. Построяване на вектора $\hat{i}$ за пермутацията на цялата система. Той се получава чрез допълване с варианта на подреждане определен за поредната $k^{-та}$ подсистема.
15. За получения краен вариант на пермутация се изпълняват стъпки: 1, 11 и 12.
16. По метода представен в т.4.1.5 (на дисертацията) се инициализират допълващите клони и възли, като своевременно се построяват вектори: v'^Γ , $\ddot{v}''^\Gamma$, $\hat{j}$ и $\ddot{j}$.
17. Пренареждане на стълбовете на матрица $\ddot{T}$, за постигане на съответствие с пътя на движение на студените потоци през топлообменните апарати от ляво надясно, при съблюдаване на допълненията в т.4.1.6 (на дисертацията).

Резултатът от прилагане на предложения алгоритъм, за разклонена топлообменна система в която има и свързващи клони, може да се представи в графичен вид с всички връзки между отделните елементи на системата. За целта е подбрана схема на система, която обхваща голям спектър от спецификите на СТА, без структурата ѝ да е сложна (**Фиг. 4.1**).



Фиг. 4.1 Разклонена СТА, със свързващи клони в двете мрежи

Приведената в каноничен вид система от топлообменници е представена графично на **Фиг. 4.2**. На нея елементите са означени и показани в обособени области. Виждат се: входящите и изходящите потоци на системата, топлообменниците формиращи матрицата $\ddot{T}$, нейните редове и стълбове явяващи се клони с апарати, свързващите клони, както и възлите. Свързващите линии указват посоката и пътя на движение на потоците през елементите.



Фиг. 4.2 Графично представяне на системата от топлообменни апарати в каноничен вид

Анализът на редица СТА и на техните еквивалентни системи показва недостатъците на класическия метод на каноничната форма относно подхода за привеждане на топлообменна система в каноничен вид. Идентифицираните недостатъци са изброени в началото на настоящата глава. Най-съществените от тях имат отношение към невъзможността за пренареждане на стълбове и към несъстоятелността на критерия за намиране на „минимум на броя стълбове“.

Предложеният алгоритъм преодолява всички недостатъци на класически метод. Използването му води до намиране на оптималната канонична система и до ефективно еднозначно описание на пътя за движение на флуидните потоци. Получената структурирана матрица $\tilde{T}$ се използва в следващата глава, като определяща последователността на изчисления в предложен итерационен метод за намиране на крайно решение на задачата за анализ на СТА.

ГЛАВА 5. РЕШАВАНЕ НА ПРОВЕРОЧНАТА ЗАДАЧА ЗА СИСТЕМА ОТ КАНОНИЧЕН ВИД

Методът на каноничната форма е удобен за представяне на системи от топлообменни апарати в табличен вид (съответно и геометрично), но неговите автори са го развили до степен, при която в математическия модел са налице недостатъците изброени в изводите към първа глава.

В настоящата работа се предлага решаване на проверочната задача на система от каноничен вид чрез математически модел, при който липсват изброените недостатъци. Намирането на решение се основава на изчисляване на елементите на системата, в последователност определена от матрицата $\tilde{T}$. Аналогичен подход има описан във *VDI Heat Atlas* (2nd edition), но за система при която са известни всички температури на потоците, входящи в топлообменниците от първия ред и първия стълб на системата. В системата от каноничен вид тези температури не винаги са изцяло известни. По тази причина предложеният метод намира решение чрез итерационен алгоритъм. Определянето на температурата на смесване на флуидни потоци в системата е прецизирано, в сравнение с широко разпространените подходи.

За съставяне на математическия модел се правят следните *допускания*:

1. Анализиранията система от топлообменни апарати работи при стационарен режим.
2. Системата е топлинно изолирана и няма загуби към околната среда.
3. Налягането на флуидните потоци не се изменя при движението им в системата.
4. Теплообменът в апаратите се извършва между работни среди, които се загряват или охлаждат без да има фазови преходи.
5. В топлообменната система няма смесване между флуидни потоци на горещата мрежа с флуидни потоци на студената мрежа. Така, смесването на потоци е само в границите на мрежите, а не между тях.
6. Флуидните потоци, които се смесват имат еднакво налягане.

7. Смесването в даден възел не води до: (1) фазов преход. (2) реакции с отделяне/поглъщане на топлина; (3) химически процеси променящи топлофизическите характеристики на веществата във флуидните потоци.
8. При смесване на флуидни потоци в даден възел, температурата на сместа се изравнява в целия си обем. Допуска се изходящите от възела потоци да постъпват в отделните клоно с масови дялове на веществата (флуидите), различни от дяловете получаващи се при идеално смесване. Същевременно, температурата на изходящите потоци е равна на температурата на сместа във възела.
9. В системата няма многопоточни топлообменни апарати. Във всички рекуперативни апарати се осъществява топлообмен между две работни среди.

Елементите системата, за които се извършват последователни изчисления са топлообменниците и възлите със смесване на флуидни потоци, затова е необходимо познаване на моделите на топлообменни апарати и на смесване.

В математическите модели, разгледани в глава първа, температурата на смесване на два или повече потока в анализирана топлообменна система се изчисляват по следната зависимост:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n (\dot{m}_i c_{p_i} \theta_i)}{\sum_{i=1}^n (\dot{m}_i c_{p_i})}. \quad (5.1)$$

С уравнение (5.1) се получават точни резултати, само ако c_p на флуидните потоци не се изменя или е относително постоянен. В действителност специфичният топлинен капацитет на флуидите се изменя при промяна на температурата, а това означава, че използването на уравнение (5.1) води до неточни резултати. Това е особено актуално за топлообменни системи, тъй като в тях топлообменът се извършва в множество топлообменници и вероятността да има смесване на потоци с висока и ниска температура не е за пренебрегване.

В подкрепа на изложеното са разгледани два примера. Най-често използваният флуид в топлообменници и топлообменни системи е водата, затова първият пример е за смесване на вода с различни температури. Във втория пример участва трансформаторно масло. Грешката, която се получава от (5.1) може да се оцени като се сравнят резултати от него, с такива получени при използване на уравненията валидни за входящи и изходящи флуидни потоци на контролен обем в стационарен режим. Това са уравненията на масовия и енергийния баланс.

Пример 1. В разглеждания пример два потока с различна температура се смесват в един общ поток, чиято температура в момента на смесване се изравнява в целия обем. Първият поток е вода с температура 1 °C, налягане 6,5 MPa и масов дебит 1,33 kg/s. Вторият поток е вода с температура 280 °C, налягане 6,5 MPa и масов дебит 0,67 kg/s. По уравнение (5.1) температурата се получава 109,45 °C, а чрез уравненията на масовия и енергийния баланс се намира температура на смесване 99,4 °C. Относителната грешка се оценява на $\varepsilon_{\%} = 100 \cdot (109,45 - 99,4) / 99,4 = 10,11\%$.

Пример 2. Близка по стойност относителна грешка се получава, ако двата флуидни потока са трансформаторно масло при атмосферно налягане, със

същите масови дебити като на първия пример ($\dot{m}_1 = 1,33 \text{ kg/s}$; $\dot{m}_2 = 0,67 \text{ kg/s}$) и значително по-малка разлика в температурите на потоците преди смесване: $\theta_1 = 1^\circ\text{C}$ и $\theta_2 = 100^\circ\text{C}$. Температурата на смесване изчислена по (5.1) е $41,28^\circ\text{C}$. Сравнението на този резултат с намерената точна стойност за температура на смесване ($37,69^\circ\text{C}$) определя относителна грешка $\varepsilon\% = 9,53\%$.

Получените относителни грешки в двата примера не са максимални. Режимните параметри за представените изчислителния са подбрани, така че грешката да бъде в границите на 10%. При други изходни данни на дебити, температури и налягания, грешката значително нараства или намалява.

МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА НА СМЕСВАНЕ НА ФЛУИДНИ ПОТОЦИ В СИСТЕМИ ОТ ТОПЛООБМЕННИ АПАРАТИ

В настоящата работа се предлага прецизен метод за определяне на температура на смесване в топлообменни системи, моделирани съгласно глави 2 ÷ 4. Той е разработен на основата на уравнения на масовия и енергийния баланс и един от методите за приближено решаване на нелинейни уравнения – метода на секущите.

Ако се разглежда горещата мрежа, уравнението на енергийния баланс за даден възел v_r може да се изрази като равенство на зависимостта $f_{\dot{H}}(\theta_{v_r}^r)$ на енталпията на потока от температурата на v_r и енталпията $\dot{H}_{v_r}$ на потока, която се изчислява като сума на енталпиите на потоците постъпващи във възела v_r :

$$f_{\dot{H}}(\theta_{v_r}^r) = \dot{H}_{v_r}. \quad (5.2)$$

Изборът на метод за решаване на (5.2) е направен по следните три критерия: (1) бърза сходимост на итерационния процес (оценява се чрез индекса на ефективност на итерационния процес); (2) гарантиране на сходимост, която съответства на рационални резултати; (3) ниска степен на сложност.

Методът на секущите удовлетворява тези критерии. Функциите на специфичната енталпия на флуиди имат характер, който прави този метод подходящ за намиране на решение. Той е итерационен и се явява модификация на *метода на хордите*, при това с по-висок ред на итерацията. Предпочетен е пред *метода на Нютон*, тъй като за настоящата задача последният има по-нисък индекс на ефективност на итерационния процес и характерът на функцията е такъв, че когато температурата на смесване е близко под критичната температура на някой флуид има опасност от разходимост.

За намиране на решението на уравнения от вида (5.2) в настоящата работа се предлага модифициран вариант на метода на секущите. При него итерационният процес за възлите на гореща и студена мрежа се извършва по:

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + \left(\dot{H}_{v_{r(c)}} - f_{\dot{H}}(\theta^{(k)}) \right) \frac{\theta^{(k)} - \theta^{(k-1)}}{f_{\dot{H}}(\theta^{(k)}) - f_{\dot{H}}(\theta^{(k-1)})},$$

$$\text{където: } \theta^{(k-1)} = \theta^{(k-2)} \text{ и } \Rightarrow f_{\dot{H}}(\theta^{(k-1)}) = f_{\dot{H}}(\theta^{(k-2)}), \quad (5.3)$$

$$\text{ако: } \left| \dot{H}_{v_{r(c)}} - f_{\dot{H}}(\theta^{(k-1)}) \right| > \left| \dot{H}_{v_{r(c)}} - f_{\dot{H}}(\theta^{(k-2)}) \right|.$$

Така, при всяко изчисление по (5.3) се използват по-близките $\theta^{(k-1)}$ и $f_{\dot{H}}(\theta^{(k-1)})$ до решението $\theta_{v_{r(c)}}^r$ и $\dot{H}_{v_{r(c)}}$. Като следствие: (1) по-бързо се достига до

сходимост; (2) предотвратява се появата на разходимост, ако едната температура от началните $\theta^{(0)}$ и $\theta^{(1)}$ не е достатъчно близо до решението.

За да се гарантира сходимост при температури близки до критичната, за начална $\theta^{(0)}$ се задава максималната от температурите на всички потоци входящи във възела. За начална $\theta^{(1)}$ се приема температура, която е близо до решението. Ако предварително такава не е определена, тогава се използва минималната температура на входящите потоци във възела.

За решаването на задачата за анализ, при последователно извършване на индивидуални изчисления за всеки апарат от системата, е необходимо познаване на *моделите на топлообменни апарати*, като основа за избора на подходящ метод.

МОДЕЛИ НА ТОПЛООБМЕННИ АПАРАТИ

Моделите на топлообменни апарати се използват за решаване на проектната и проверочната задача. Различните модели могат да бъдат групирани в три основни категории: (1) модели със съсредоточени параметри; (2) модели с разпределени параметри; (3) модели с развитие на потока. От изброените модели на топлообменни апарати най-широко приложение намират моделите със съсредоточени параметри, а те са следните: $\varepsilon - \Theta$, $\eta - \Theta$, СТР, $\Psi - \eta$ и $\eta_1 - \eta_2$.

В настоящата работа за анализа на системи от топлообменни апарати е избран методът $\varepsilon - \Theta$, тъй като има следните предимства:

- Температурите на потоците на изходите от топлообменник се изчисляват директно без да се използват итерации. Това не е така при метода на средната температурна разлика (СТР), а методите $\Psi - \eta$ и $\eta_1 - \eta_2$ се използват основно графично.

- За анализа на системи от топлообменни апарати се използва електронно изчислителна техника, тъй като задачата е трудоемка. При прилагане на такава техника е лесно следенето за флуида с W^{min} и избирането на правилната формула за ε при топлообменници с несиметричност на потоците. Така отпада основния недостатък на $\varepsilon - \Theta$ спрямо $\eta - \Theta$ метода.

- При използване на универсални (обобщени) зависимости за определяне на ефективността на топлообменен апарат $\varepsilon - \Theta$ методът води до по-малка грешка. Това е така защото зависимостите от вида $\varepsilon = \phi(\Theta^*, R^*, \text{конфигурация})$ дават по-точни резултати, когато участващото в тях отношение на водните еквиваленти е в интервала $0 \div 1$.

- Методът $\varepsilon - \Theta$ позволява, при известни ограничения, да се извършват необходимите изчисления за топлообменници с фазов преход на единия от флуидните потоци.

- Методът дава възможност топлообменните системи да се моделира с елемент, през който преминава само един флуиден поток. Флуидният поток обменя топлина с източник, за който топлинния поток се задава (т.е. в този елемент не се извършва топлообмен между два флуидни потока).

ЗАДАВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ТОА И НА ВХОДЯЩИТЕ ПОТОЦИ В СТА

Параметрите избрани за задаване, при описание на топлообменниците и на входящите флуидни потоци в дадена топлообменна система, съответстват на параметрите използвани в моделите на ТОА и на температурата на смесване.

Параметри на флуидните потоци входящи в СТА

За всеки флуиден поток входящ в анализирана система се въвеждат: масов дебит, температура, налягане и флуид (вещество).

Масовият дебит на входящите потоци се записва във вектори $\dot{m}'^r$, $\dot{m}'^c$. Индексите на елементите в двата вектора съответстват на номерата на входните възли на горещата и студената мрежи. Така векторът $\dot{m}'^r$ има n'_r на брой елемента, а $\dot{m}'^c$ има n'_c елемента.

Температурата на всички възли в системата е представена чрез вектори θ^r и θ^c . Векторът θ^r има $\dot{N}_r$ на брой елемента, а в θ^c те са $\dot{n}_c$.

Елементът θ_g^r е температурата на флуида във възела с номер g (или v_g^r) от мрежата на горещи потоци, а θ_l^c е температурата във възела с номер l (или v_l^c) от студената мрежа. Зададените температури на горещите потоци входящи в системата се съхраняват в първите n'_r елемента на вектора θ^r , т.е. $\theta_g^r (g = 1, 2, \dots, n'_r)$. Изчислените температури на потоците на изходите от горещата мрежа се получават в елементи $\theta_g^r (g = \dot{n}_r - n''_r, \dots, \dot{n}_r - 1, \dot{n}_r)$.

Аналогично температурите на студените потоци на входа на система, след въвеждането им се записват в първите n'_c елемента на вектора θ^c , а резултатите за изходящите студени потоци от система са в елементи $\theta_l^c (l = \dot{n}_c - n''_c, \dots, \dot{n}_c)$.

Налягането на флуидните потоци за възлите на система се съхранява във вектори p^r и p^c . Размерите на тези вектори и елементите, в които се записват въведените данни за входящите потоците, са както при векторите на температурите описани по-горе.

Флуидите, които постъпват в системата като входящи потоци, се посочват във връзка с топлофизичните характеристики необходими за изчисленията. За удобство задаването може да се извърши като избор от предварително въведен списък на флуиди (вещества). На всеки от флуидите в списъка съответстват предварително заложиени зависимости за техните термодинамични свойства, като функции от температура и налягане.

След задаването им, флуидите се идентифицират чрез числа от множеството $\mathbb{N}$, записани във вектори f'^r и f'^c , с размери n'_r и n'_c . Така използваната за изчисления специфична енталпия се определя като $h_s^{r(c)}(\theta, p) = f_h(f_s^{r(c)}, \theta, p)$, $s = 1, 2, \dots, n'_{r(c)}$, където $f_h(\cdot)$ е функция на специфичната енталпия от зададени параметри.

Ако в списъка липсва някой от флуидите, тогава той се въвежда с неговите: наименование и термодинамичните свойства като функции от температура и налягане.

Параметри на апаратите в топлообменни системи

Проектните параметри, които се използват за изчисления на топлообменни апарати по $\varepsilon - \Theta$ метода са: площ на топлообменната повърхност A , коефициент на топлопреминаване U и схемата на движение на потоците. Те се задават за всеки апарат, в последователност определена от номерата на топлообменниците. Номерата на апаратите се съхраняват във вектора T .

Площта на топлообменните апарати на система се използва за изчисление на преносните топлинни единици Θ^* . С въведените стойности за всички апарати се построява вектора A , който има B на брой елементи.

Коефициентът на топлопреминаване на апаратите, също се използва за изчисление на Θ^* и с неговите стойности аналогично се построява вектора U , с размер B . Както е известно U се определя по познатите от литературата формули, с използване на коефициенти на топлопредаване намерени чрез критериални уравнения. Една алтернатива са проектните стойности на U , изчислени при номинален режим на работа на апаратите. Друга възможност дава използването на характерни стойности на коефициента на топлопреминаване U , които са посочени в утвърдени литературни източници.

Схемата на движение на потоците (конфигурацията на апарата) е параметър необходим за изчисление на ефективността ε на даден топлообменник, при използване на уравнения от вида $\varepsilon = \phi(\Theta^*, R^*, \text{схема})$. Различният характер на зависимостите за определяне на ε води до различни възможности за задаване на този параметър.

Има два вида зависимости за определяне на ε : аналитични и универсални (обобщени). Към универсалните зависимости се отнасят: (1) уравнението за ефективност на противоток с корекция на преносните топлинни единици; (2) уравнението на Трефни за еквивалентен ϕ -ток; (3) универсална формула с отчитане на конфигурацията чрез индекса на противоток.

ИЗЧИСЛИТЕЛЕН АЛГОРИТЪМ

За решаване на задачата за анализ на система от каноничен вид се предлага итерационен изчислителен алгоритъм. В рамките на един основен итерационен цикъл, последователно за всеки топлообменен апарат се извършва изчисляване на крайните температури на потоците, в комбинация с последователно изчисляване на температурите на смесване във възлите. Последователността на изчисления за топлообменниците и за възлите следва структурата на матрица $\ddot{T}$ получена за топлообменна система в каноничен вид.

Решаването на задачата води до получаване на серия температури за основните позиции в система, а именно: (1) температури на входовете и изходите на всички топлообменни апарати /във вектори θ^{Γ} , θ^{C} , $\theta^{\text{r}\Gamma}$ и $\theta^{\text{r}\text{C}}$, с еднакъв размер B /; (2) температури на флуидните потоци във възлите на двете мрежи – гореща и студена /вектори θ^{Γ} и θ^{C} /. Търсените температури на изходящите потоци от система са елементи θ_g^{Γ} ($g = \ddot{n}_{\Gamma} - n_{\Gamma}'', \dots, \ddot{n}_{\Gamma} - 1, \ddot{n}_{\Gamma}$) и θ_l^{C} ($l = \ddot{n}_{\text{C}} - n_{\text{C}}'', \dots, \ddot{n}_{\text{C}} - 1, \ddot{n}_{\text{C}}$). Топлинният поток (мощността) на всички апарати се получава във вектора $\dot{Q}$ с брой елементи B .

По време на изчислителния процес активно се използват позиционните температури $\bar{\theta}^{\Gamma}$ и $\bar{\theta}^{\text{C}}$. В зависимост от етапа на изчислителния процес, температурата $\bar{\theta}_j^{\Gamma}$ може да съответства на начална или крайна температура на горещия поток на някой от топлообменниците разположени в $j^{\text{тия}}$ ред на матрица $\ddot{T}$. Аналогично $\bar{\theta}_i^{\text{C}}$ е температурата на студения поток на някой от апаратите в

i -тият стълб на $\ddot{T}$. Използването на позиционни температури $\vec{\theta}^r$ и $\vec{\theta}^c$ улеснява и ускорява изчислителния процес. Отпада необходимостта от изчисляване и съхранение на начални и крайни температури на двата потока за фиктивните топлообменни апарати от множеството на елементи $\ddot{t}_{ij}$ ($i = 1, 2, \dots, \dot{m}_c$; $j = 1, 2, \dots, \dot{M}_r$) в матрица $\ddot{T}$.

Изчислителният ресурс се спестява още и при използване на следното уравнение за топлинния капацитет на потоците в даден топлообменник:

$$W^r = \frac{\dot{m}^r(h'^r - h''^r)}{\theta'^r - \theta''^r}; \quad W^c = \frac{\dot{m}^c(h'^c - h''^c)}{\theta'^c - \theta''^c}. \quad (5.4)$$

Така отпада необходимостта от поддържането на база данни и информация за специфичния топлинен капацитет на флуидите, който е възприето да се използва за пресмятане на $W^{r(c)}$. В следствие на това отпада изчислението на средната температура на потоците в апарата, тъй като тя е необходима за определяне на c_p .

ИЗВОДИ

С предложения алгоритъм и съпътстващите методи към него е постигната целта за разработване на изчислителен модел с по-висока точност на резултатите спрямо класическите матрични методи. Неговата адекватност е в обхвата на изброените допускания в началото на настоящата глава. Един от факторите, които допринасят за постигане на целта, е познаването на дяловото разпределение на входящите потоци по клоните на система. Това разпределение се съдържа в елементите на матрици $\ddot{R}^{r(c)}$ и $\ddot{R}^{c(c)}$, а техните стойности се намират чрез методите предложени в трета глава. Другият фактор е прилагането на итерационен механизъм, чиято последователност на изчисления се управлява въз основа на структурираната матрица на каноничната форма. Така математическият модел достига бързо до сходимост и отчита зависимостта на термодинамичните свойства на флуидите от температурата, както при изчисленията относно топлообменниците, така и относно смесването на флуидни потоци.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачата за структурно-параметричен анализ на системи от топлообменни апарати има непреходна актуалност. Такива системи са широко използвани както в промишлеността, така и в сградния сектор. Въпреки усилията на множество изследователски екипи, до настоящия момент в световен мащаб не е постигнато удовлетворяващо решение за единен подход и метод.

Главната цел на дисертационния труд - разработване на усъвършенстван метод за моделиране на системи от топлообменни апарати, основан на метода на каноничната форма и нов алгоритъм за прецизно определяне на работните параметри на системата, е постигната на основата на системен подход. Прилагането му включи задълбочено проучване и критичен анализ на методите за моделно изследване на системи от топлообменни апарати, в резултат на

който се обоснова значимостта и предимствата на метода на каноничната форма спрямо други съществуващи методи. Наред с това анализът показва и съществени недостатъци на този метод, преодоляването на които ще допринесат за действителното му развитие като универсален метод за моделиране и анализ на система топлообменни апарати с произволна структура и достатъчна за решаване на проверочната задача точност.

За развитие на метода на каноничната форма и преодоляване на констатираните недостатъци при неговото прилагане са разработени оригинални алгоритми, които се характеризират с **научно-приложни** и **инженерно-приложни приноси** както следва:

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Създаден е нов алгоритъм за описание на СТА на основата на теория на графите. Класическият метод на каноничната форма не включва варианта за разделяне и събиране на потоци в топлообменна система (разклонена топлообменна система), а това е най-често срещания случай в практиката. До сега чрез използваните матрични методи описанието на взаимната свързаност между елементи в модела на разклонени системи се извършва чрез матрици на съчетаване, които не дават възможност за еднозначно описание на разделяне и събиране на потоци. Разработеният нов алгоритъм дава възможност за описание на топлообменна система с разклонена структура във вид на ориентиран граф. С използване на техниките на теорията на графите се постига разширяване на възможностите на метода на каноничната форма за описание на СТА с произволна структура.
- Разработен е алгоритъм за идентификация на движението на потоците, който облекчава решаването на задачите за анализ на движението на флуидните потоци в гореща/студена мрежа, определяне на разпределението на масовия дебит на входящите потоци по клони и съвместен анализ на флуидните потоци и топлинните потоци от топлопреминаване за клоните с топлообменни апарати. Чрез този алгоритъм става възможно разделяне на системата на групи от подсистеми, които могат да се преобразуват в каноничен вид, независимо една от друга.
- Създаден е детайлизиран алгоритъм за привеждане на СТА с произволна структура в канонична форма. Чрез него се преодоляват съществените недостатъци на класическия метод на каноничната форма, като неизпълнимостта на критерия „минимален брой стълбове“, невъзможността стълбовете на матрицата да бъдат пренаредени в съответствие с пътя на движение на студените потоци през топлообменните апарати, значителният времеви ресурс за генериране на всички възможни пермутации и съпътстващите изчисления, неефективността на използване на векторите на пътя за движение на флуидните потоци при разклонени топлообменни системи и др.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Разработени са метод и алгоритъм на последователен масов баланс във възлите на анализирана система, изискващи малки ресурси за съхраняване на информация и осигуряващи висока точност.
- Предложен е нов прецизен метод за определяне на температурата на смесване на флуидни потоци и на основата на анализ на известните и използвани в практиката модели на топлообменни апарати е разработен и представен итерационен алгоритъм за намиране на решение на задачата за анализ на СТА, основан на метода на преносните топлинни единици.
- Създадените алгоритми формират цялостна система от процедури за моделиране на система от топлообменници при улеснено въвеждане на информация, идентифициране на разпределението на входящите флуидни потоци по клоновете на СТА, привеждане на системата в каноничен вид, намиране на решение на задачата и визуализация на получените резултати в структуриран вид, съответстващ на канонична форма. Системата от процедури е автоматизирана на програмен език C++, а извършените анализи с нея доказваха наличието на сходимост на итерационния подход и бързо достигане до решение с висока точност. Тази система е пригодна за решаване както на изследователски, така и на инженерно-приложни задачи.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Василев М.** *Върху метода на каноничната форма за анализ на топлообменни системи.* Сборник доклади на VII^{-та} научна конференция с международно участие, ЕМФ'2002, Том II, стр. 70–77, Варна, 2002.
2. Калоянов Н., **М. Василев.** *Един алгоритъм за намиране на оптимална матрица на канонична форма при система от топлообменници.* Сборник доклади на VII^{-та} научна конференция с международно участие, ЕМФ'2002, Том II, стр. 78–83, Варна, 2002.
3. **Василев М.**, Н. Калоянов. *Итеративен метод за решаване на проверочна задача при топлообменни системи от каноничен вид.* Научна конференция с международно участие, УХТ, том XLIX, стр. 210–216, Пловдив, 2003.
4. Калоянов Н., **М. Василев.** *Един подход за описание на топлообменни системи с разделяне и събиране на потоците.* Списание „Топлотехника“, година 4, книга 1, 2013, стр. 31–37, ISSN 1314-2550.
5. **Василев М.**, Н. Калоянов, Чан Ван Хънг. *Метод за определяне на разпределението на масовия дебит на входящите потоци в системи от топлообменни апарати.* Сборник доклади на XXIII^{-та} Научна конференция с международно участие ЕМФ'2018, стр. 99–106, Созопол, 2018.

PARAMETRIC ANALYSIS OF HEAT EXCHANGER NETWORKS

Momchil Petrov Vassilev

ABSTRACT

The main purpose of the doctoral thesis is to develop an advanced method for modeling heat exchanger networks (HEN) based on the canonical form method and a new algorithm for precise calculation of the operating parameters of a network.

An in-depth study and critical analysis of existing methods for modeling HENs is carried out, as a result of which the advantages and disadvantages of the canonical form method are identified. Based on this analysis several objectives are defined to improve the canonical form method by expanding its capabilities for modeling a wider variety of HEN structures.

A new algorithm is proposed for modeling HENs of any structure as a directed graph. The proposed algorithm expands the capabilities of the canonical form method by allowing the analysis of branched networks. Two methods are proposed for identification of the fluid streams in the HEN with the purpose to form matrices, describing the distribution of the input streams in the branches of the network. A new method is proposed for determining the temperature of mixing fluid streams with very high accuracy. Finally an iterative algorithm is developed for solving the equations describing the mass and energy balances of the HEN. The energy balance of each heat exchanger is calculated according to the effectiveness–NTU method.

The presented methods and procedures form a complete algorithm for solving the rating problem for HENs which can be implemented as a software tool.