

УДК 621.321

## Оптимизация позиционирования подачи и структуры потоков теплоносителей в многоступенчатых теплообменниках

Жуков В. П., д-р техн. наук, Барочкин А.Е., асп., Лапшин А.К., инж.

Сформулирована задача оптимизации подачи и структуры потоков теплоносителей в многоступенчатых теплообменных аппаратах, предложены пути ее решения. Приведен пример постановки и решения оптимизационной задачи для пластинчатого теплообменника.

*Ключевые слова:* позиционирование подачи, структура системы, теплоноситель, пластинчатый теплообменник.

### Optimization of Heat Carriers Feed Positioning and Flow Structure in Multi-Stage Heat Exchangers

V.P. Zhukov, Doctor of Engineering; A.E. Barochkin, Post-Graduate Student; A.K. Lapshin, Engineer

The optimization problem of feeding and heat carriers flow structure in multi-stage heat exchangers is formulated, and approaches to its solution are suggested. The example of the problem statement and the optimization problem solution to a plate-type heat exchanger is shown.

*Keywords:* feed positioning, system structure, heat carrier, plate-type heat exchanger.

Эффективная организация процесса теплообмена в целях уменьшения теплового загрязнения окружающей среды представляется в настоящее время особо актуальной проблемой [1]. Сложные теплообменные системы, состоящие из большого числа ступеней с подачей в них нескольких теплоносителей с разными параметрами, представляют в этом отношении особый интерес. К таким установкам относятся системы регенерации на тепловых электрических станциях или теплофикационные системы жилищно-коммунального хозяйства. При подаче в установку теплоносителей с разными параметрами встает вопрос выбора оптимальной точки подачи теплоносителей и оптимальной структуры системы. Целью нашего исследования являлись постановка и решение задачи оптимального выбора позиционирования подачи и структуры потоков теплоносителей в многоступенчатых установках.

В общем случае для произвольного числа входных потоков оптимизационная задача может быть сформулирована следующим образом: выбрать оптимальную точку подачи для каждого из  $n$  входных потоков и оптимальную структуру потоков, которые обеспечивают наиболее эффективный теплообмен при заданных технологических ограничениях. Для оценки эффективности теплообмена обычно выбирают стоимостные параметры теплообменника или величина тепловых выбросов (загрязнение окружающей среды). В качестве ограничения могут выступать регламентируемые значения температур теплоносителя, подаваемого потребителю.

В терминах теории исследования операций [2] оптимизационная задача может быть формализована следующим образом. Введем следующие обозначения:  $\alpha$  – вектор известных

параметров;  $X$  – искомый вектор решений, как совокупность искомых параметров;  $W$  – целевая функция или показатель эффективности решения;  $u$  – управление (регулирование) процессом. При заданном комплексе условий  $\alpha$  требуется найти такое решение  $X = X^*$ , которое при управлении процессом  $u$  обеспечивает экстремальное значение показателя эффективности  $W$ . Математическая запись операции представляется в виде

$$W = W(\alpha, X, u) \Rightarrow \min_x \quad (1)$$

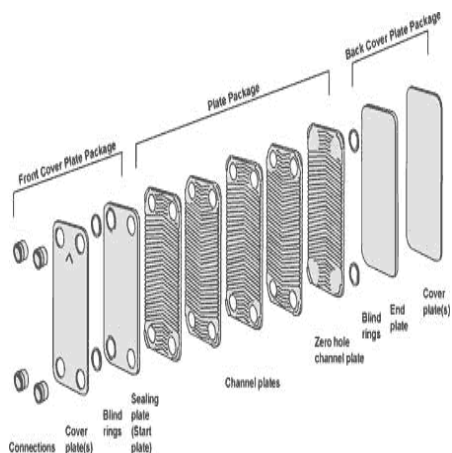
Для задачи позиционирования подачи теплоносителей выражение (1) с учетом выбранных обозначений перепишем следующим образом. При заданных температурах и расходах теплоносителей на входе в установку ( $\alpha = (t_{0i}, G_{0i}), i = 1, 2, \dots, n$  ( $n$  – число входных потоков)) выбрать оптимальный вектор координат точек их подачи  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , который при поддержании регламентируемых значений температур выходных потоков ( $t_j = const$ ) обеспечивает минимальную температуру горячего теплоносителя на входе (или минимальные тепловые потери):

$$t_{0i}(\alpha, X, u(t_j)) \Rightarrow \min_x \quad (2)$$

Постановку задачи и порядок ее решения поясним на конкретном примере оптимизации подачи и структуры потоков теплоносителей в многоступенчатом пластинчатом теплообменном аппарате, внешний вид и конструкция которого приведены на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Пластинчатый теплообменный аппарат: а – внешний вид; б – конструкция

Малые габариты, компактность и высокие эксплуатационные показатели делают такие аппараты особенно привлекательными [3]. Дополнительные преимущества этих аппаратов обуславливаются возможностью простого управления структурой потоков и позиционирования подачи теплоносителей в этот аппарат, что легко обеспечивает реализацию оптимальных решений на практике.

Для решения оптимизационной задачи (2) необходимо разработать модель установки, т. е. определить связь целевой функции с параметрами оптимизации. Для пластинчатого аппарата модель системы строится на основе матричной формализации [1], которая успешно используется для решения аналогичных задач. Матричная формализация расчета теплообменных аппаратов предполагает представление каждой ступени или аппарата четырехполюсником с двумя входными и двумя выходными потоками для холодного и горячего теплоносителя соответственно.

В пластинчатом теплообменнике [1] каждый теплоноситель в ступени взаимодействует с двумя соседними теплоносителями (рис. 2), поэтому метод матричной формализации для пластинчатых аппаратов нуждается в корректировке.

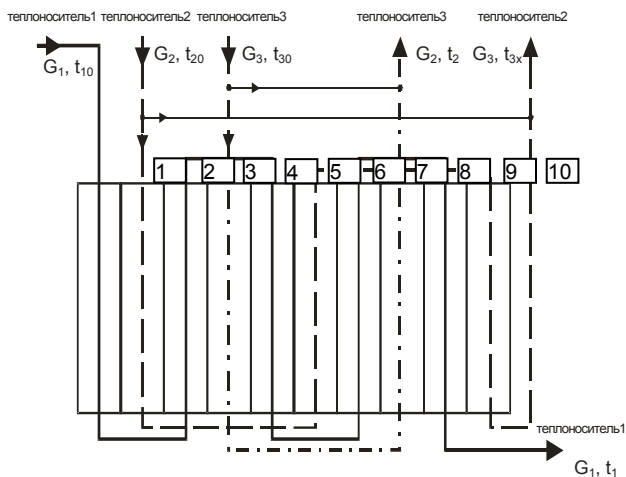


Рис. 2. Структура потоков теплоносителей в пластинчатом теплообменнике

Для адаптации метода принимается следующее допущение: каждая ступень вдоль направления движения теплоносителя условно разбивается на две теплоизолированные между собой части, в каждой из которых теплоноситель контактирует только с одним из соседних теплоносителей. Данный расчетный прием позволяет представить ступень в виде двух четырехполюсников. Расчет пластинчатого теплообменника выполняется согласно [1] в два этапа: сначала определяются расходы теплоносителей через каждую ступень, затем вычисляются значения температур теплоносителей в произвольной точке аппарата.

При решении оптимизационной задачи (2) анализируются варианты структур потоков теплоносителей, приведенные в табл. 1. Каждому варианту соответствует код, который однозначно определяет анализируемый вариант. Код представляется в виде матрицы (табл. 1), каждая строка которой соответствует одному потоку теплоносителя. Номер теплоносителя соответствует номеру строки матрицы, номер столбца показывает порядковый номер шага в маршруте теплоносителя. Значение элемента матрицы кода  $K = \{k_{ij}\}$  показывает, в какую ступень установки подается  $i$ -й теплоноситель на  $j$ -м шаге. Другими словами  $i$ -я строка кода показывает последовательность номеров ступеней установки, через которые проходит  $i$ -й теплоноситель. Элементы первого столбца матрицы  $K$  показывают номера ступеней, в которые подаются входные потоки теплоносителей. Порядок выбранной нумерации ступеней показан на рис. 2. Такая система кодировки применима к поверхностным подогревателям, в которых не происходит смешивания потоков теплоносителей и в каждой ступень подается только один поток. Предложенная система кодировки позволяет оценить число возможных вариантов подачи  $n$  теплоносителей в установку из  $N$  ступеней.

Таблица 1. Структуры потоков в системах пластинчатых теплообменных аппаратов и коды этих систем

N	Схема	Код
1		$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ 2 & 6 & 10 \\ 4 & 8 \end{bmatrix}$
2		$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 9 \\ 2 & 5 & 8 \\ 3 & 10 \end{bmatrix}$
3		$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 9 \\ 2 & 4 & 7 & 10 \\ 3 & 6 & 8 \end{bmatrix}$
4		$\begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 2 & 4 & 7 & 9 \\ 3 & 5 & 8 & 10 \end{bmatrix}$
5		$\begin{bmatrix} 1 & 7 \\ 2 & 4 & 6 & 9 \\ 3 & 5 & 8 & 10 \end{bmatrix}$
6		$\begin{bmatrix} 1 & 8 \\ 2 & 4 & 6 & 9 \\ 3 & 5 & 7 & 10 \end{bmatrix}$
7		$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 9 \\ 2 & 4 & 7 & 10 \\ 3 & 6 & 8 \end{bmatrix}$
8		$\begin{bmatrix} 1 & 10 \\ 2 & 4 & 6 & 8 \\ 3 & 5 & 7 \end{bmatrix}$

Очевидно, что первый теплоноситель может быть подан в любую из  $N$  ступеней, второй – в любую из оставшихся  $(N - 1)$  ступеней, а последний  $n$ -й теплоноситель – в любую из  $(N - n + 1)$  ступеней. Общее число вариантов позиционирования теплоносителей определяется как число размещений из  $N$  элементов по  $n$  согласно известной из комбинаторики [4] формуле

$$A_N^n = N \cdot (N - 1) \cdot \dots \cdot (N - n + 1).$$

Общее число вариантов соединения  $N$  ступеней может быть оценено по известной формуле для числа перестановок из  $N$  элементов [4]:

$$P_N = N \cdot (N - 1) \cdot \dots \cdot 2 \cdot 1 = N!$$

В качестве примера, демонстрирующего возможности предлагаемого алгоритма, приводится решение оптимизационной задачи для пластинчатого теплообменника, состоящего из  $N = 10$  ступеней. Число подаваемых теплоносителей  $n = 3$ : прямая сетевая вода обеспечивает нагрев до заданных температур двух холодных теплоносителей, предназначенных для отопления и горячего водоснабжения. Тепловые нагрузки системы выбираются одинаковыми для всех анализируемых вариантов. В качестве критерия эффективности (целевой функции оптимизации) выбрана минимальная температура горячего теплоносителя на входе, которая обеспечивает нагрев холодных теплоносителей до заданных параметров.

В ходе численных экспериментов рассматривается множество вариантов позиционирования подачи теплоносителей (табл. 2).

Расчет выполняется для следующих исходных данных: расход горячего теплоносителя на входе  $G_1 = 10$  кг/с; теплоемкость горячего теплоносителя  $c_1 = 4200$  Дж/кг·К; расход холодных теплоносителей на входе  $G_2 = G_3 = 10$  кг/с; теплоемкость холодного теплоносителя  $c_2 = 4200$  Дж/кг·К; температура холодных теплоносителей на входе в теплообменник  $t_{20} = 10$  °С и  $t_{30} = 10$  °С; нагрев холодных теплоносителей для отопления и горячего водоснабжения осуществляется соответственно до температур 90°С и 65°С. Особенностью расчетной схемы (рис. 2) является наличие байпасов, связывающих потоки на входе и выходе из теплообменника. Посредством байпасирования производится регулирование конечной регламентируемой температуры теплоносителей. На рис. 2 изображена первая расчетная схема пластинчатого теплообменника с указанием расходов и температур теплоносителей. Рассчитанные значения температуры теплоносителей для различных вариантов схем приведены в табл. 2. Анализ полученных результатов показывает, что оптимальной схемой является схема №2, которая позволяет обеспечить заданный подогрев холодных теплоносителей горячим теплоносителем с минимальной температурой.

Предложенный подход может использоваться при выполнении проектных и наладочных работ и анализе эффективности работы пластинчатых подогревателей в энергетике, жилищно-коммунальном хозяйстве и химической промышленности.

**Таблица 2. К выбору оптимального позиционирования подачи и структуры потоков теплоносителей**

	Температура теплоносителей (°С) для различных вариантов схем (см. табл.1)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Теплоноситель 1 (вход)	203	197	212	226	241	225	204	287
Теплоноситель 1 (выход)	80,8	76,3	95,1	111	121,7	107	89,4	64,7
Теплоноситель 2 (вход)	10	10	10	10	10	10	10	10
Теплоноситель 2 (выход)	65	65	65	65	65	65	65	65
Теплоноситель 3 (вход)	10	10	10	10	10	10	10	10
Теплоноситель 3 (выход)	90	90	90	90	90	90	90	90

### Заключение

Решение сформулированной задачи позволяет для установки со сложной конфигурацией потоков выбрать эффективные схемы и наметить пути их практической реализации.

### Список литературы

1. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009.

2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1981.

3. Бродов Ю.М. Расчет теплообменных аппаратов паротурбинных установок: Учеб. пособие. – Екатеринбург: УГТУ, 2001.

4. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Высш. шк., 1973.

Жуков Владимир Павлович,  
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,  
 телефоны: (4932) 26-97-45, 8-910-680-13-35,  
 адрес: 153038, г. Иваново, пр. Строителей, д. 40, кв.10,  
 e-mail: zhukov@ispu.ru

Барочкин Алексей Евгеньевич,  
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 аспирант кафедры прикладной математики,  
 телефон (4932) 26-97-45.

Лапшин Андрей Кимович,  
 ОАО «Северсталь»,  
 инженер,  
 телефон (8202) 22-77-77.