Tạp chí
NĂNG LƯỢNG NHIỆT
THERMAL ENERGY REVIEW
ISSN 0868-3336
Số 154 - Tháng 7/2020
Trang 7 - 10

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP QUI HOẠCH TUYẾN TÍNH XÁC ĐỊNH CẤU TRÚC HỆ THỐNG TRAO ĐỔI NHIỆT NHIỀU GIAI ĐOẠN

Lê Quang Tuyến, Nguyễn Đắc Nam - ***ĐH Công nghiệp Việt Trì***
Email: tuyenlequangpt@gmail.com

Ngày nhận bài: 09/09/2020 Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 15/10/2020
Ngày bài được duyệt đăng: 15/11/2020

***Tóm tắt**: Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu trên cơ sở phân tích mô hình toán học của các thiết bị trong hệ thống trao đổi nhiệt, sử dụng phương pháp tối tối ưu tuyến tính và phương pháp qui hoạch tuyến tính để đưa ra phương pháp xác định cấu trúc tối ưu hệ thống trao đổi nhiệt nhiều giai đoạn. Đây là phương pháp tối ưu hệ thống theo luật phân tách dựa theo các tham số xấp xỉ ở đầu vào trong các giai đoạn của hệ thống trao đổi nhiệt.*

***Keywords**: optimal synthesis, heat recovery, heat intergration, heat exchange network*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhiệt năng là nguồn năng lượng quan trọng trong mọi lĩnh vực, đóng góp rất lớn cho sự nghiệp công nghiệp hóa và hiện đại hóa đất nước. Hiện nay các nguồn năng lượng nhiệt được sử dụng ngày càng rộng rãi và chiếm trọng số rất lớn trong các quá trình sản xuất như: Hóa chất, phân bón, hóa dầu, dầu khí, luyện kim, cơ khí,…

Trong quá trình trao đổi nhiệt, năng lượng nhiệt thường bị tổn thất rất lớn, vì thế việc nghiên cứu để làm giảm năng lượng tổn thất này cũng như việc giảm chi phí vận hành hệ thống trao đổi nhiệt là công việc hết sức ý nghĩa và cần thiết. Quá trình trao đổi nhiệt luôn xảy ra giữa một nguồn nóng và một nguồn lạnh. Theo [1], đối với hệ thống trao đổi nhiệt một giai đoạn tối ưu trong quá trình trao đổi nhiệt mỗi nguồn lạnh chỉ nhận năng lượng nhiệt của duy nhất một nguồn nóng, hay mỗi nguồn nóng chỉ cung cấp năng lượng nhiệt cho một nguồn lạnh duy nhất. Như vậy, để tối ưu hóa quá trình trao đổi nhiệt ta cần xây dựng những hệ thống trao đổi nhiệt nhiều giao đoạn - MHEN (Multi - stage Heat Exchanger Network) có cấu trúc tối ưu. MHEN được xây dựng từ nhiều hệ thống trao đổi nhiệt một giai đoạn liên tiếp. Trong đó mỗi nguồn nóng thứ *i* có thể truyền nhiệt năng đến một vài nguồn lạnh, còn các nguồn lạnh *j* cũng có thể nhận nhiệt năng từ một số nguồn nóng. Hiện nay, đã có một vài công trình nghiên cứu việc tối ưu hóa MHEN nhưng chủ yếu được thực hiện với hệ thống một giai đoạn hoặc bằng phương pháp thực nghiệm nên khối lượng tính toán lớn, nhiều điểm cực trị và kết quả nhận được có thể sẽ không được như mong muốn [2], [3].

Để khắc phục những hạn chế trên, chúng tôi đề xuất một giải pháp để tối ưu hóa MHEN đó là sử dụng phương pháp quy hoạch tuyến tính [4]. Việc tối ưu MHEN được thực hiện dựa trên nguyên lý cố định các tham số trung gian [5]. Thuật toán chia ra nhiều Lớp:

Lớp thứ nhất: Xây dựng ma trận giá trị chi phí (tổng chí phí qui đổi vận hành và chi phí tổn thất đối với từng cặp nguồn nhiệt nóng, lạnh thực hiện trao đổi năng lượng ngẫu nhiên).

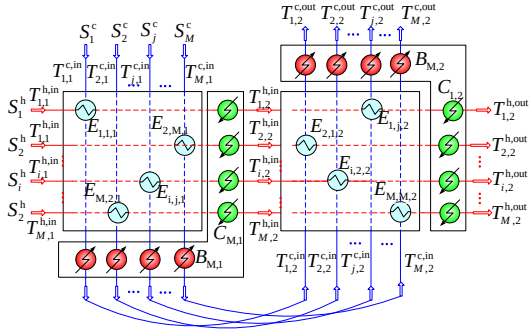
Lớp thứ 2: Tìm cấu trúc tối ưu của hệ thống trao đổi nhiệt theo phương pháp qui hoạch tuyến tính.

Lớp thứ 3: Tối ưu hệ thống bằng chương trình tính toán dựa trên cấu trúc đã nhận được ở Lớp 2 để hàm mục tiêu (tổng qui đổi chi phí cơ bản và chi phí vận hành) của hệ thống đạt giá trị nhỏ nhất.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Cấu trúc hệ thống trao đổi nhiệt nhiều giai đoạn

Giả sử ta có một tập hợp gồm *M* nguồn nhiệt nóng S^h_i, i = 1, 2, ... M và M nguồn lạnh S^c_j, j = 1, 2, ..., M (các nguồn nóng và nguồn lạnh đi qua các thiết bị trao đổi nhiệt); các nguồn nóng phải tiếp xúc với thiết bị làm lạnh và các nguồn lạnh phải tiếp xúc với thiết bị làm nóng.



Hình 1. Hệ thống trao đổi nhiệt hai giai đoạn

Các nguồn nhiệt có các tham số:

- F_i^h, F_j^c là lưu lượng của nguồn nóng và nguồn lạnh(Kg/h).

- $T_i^{h,in}, T_j^{c,in}$ là nhiệt độ ban đầu của các nguồn nhiệt nóng và lạnh (K)

- $T_i^{h,out}, T_j^{c,out}$ là nhiệt độ cuối cùng của các nguồn nhiệt nóng và lạnh (K).

- A_{ij} diện tích bề mặt tiếp xúc của thiết bị trao đổi nhiệt.

- A_j diện tích bề mặt tiếp xúc thiết bị làm nóng.

- A_i diện tích bề mặt tiếp xúc thiết bị làm lạnh.

- F_j^{hu}, F_i^{cu} lưu lượng của chất làm nóng và chất làm lạnh (Kg/h).

Xét MHEN gồm hai giai đoạn như Hình 1, đối với mỗi giai đoạn của quá trình trao đổi nhiệt gồm có: Hệ thống trao đổi nhiệt bên trong (các thiết bị trao đổi nhiệt), hệ thống trao đổi nhiệt bên ngoài (các thiết bị làm nóng và làm lạnh).

2.2. Xây dựng thuật toán tối ưu MHEN

Phương pháp giải bài toán nhiệt tối ưu nhiều giai đoạn dựa trên nguyên lý cố cố định các tham số trung gian. Từ giá trị cố định ở hệ thống phức tạp ta sẽ xác định được cấu trúc những hệ thống con riêng biệt độc lập. Điều này cho phép việc tối ưu cấu trúc của các hệ thống con độc lập không phụ thuộc vào hệ thống phức tạp từ những giá trị tham số cố định đã biết. Các tham số này được chọn theo trọng số năng lượng nhiệt của nguồn nóng và lạnh, *ở giai đoạn thứ q (q = 1,2,…,N)* đối với vòng lặp thứ *k* chúng có các giá trị $\alpha_{i,q}^{h,(k-1)}$, $\alpha_{i,q}^{h,(k-1)}$, những giá trị này nhận được từ kết quả tính toán ở vòng lặp thứ *(k - 1)*, từ giá trị cố định của các tham số chúng ta có thể tìm được cấu trúc riêng biệt ở các giai đoạn. Nhiệm vụ xây dựng cấu trúc hệ thống trao đổi nhiệt tối ưu được thực hiện dựa theo phương pháp qui hoạch tuyến tính.

Điều kiện (2), (3) đảm bảo yêu cầu rằng trên mỗi giai đoạn của hệ thống trao đổi nhiệt các nguồn nóng và nguồn lạnh chỉ thực hiện trao đổi nhiệt một lần duy nhất. Hàm mục tiêu thành phần $f_{\mathrm{i,j,q}}^{opt}$ được xác định từ một nguồn nóng và một nguồn lạnh bất kỳ trong một giai đoạn thực hiện trao đổi nhiệt, được gọi là một khối phần tử của hệ thống trao đối nhiệt-EBHEN (Ementary Blocks of the Heat Exchange Network), trong trường hợp tổng quát EBHEN bao gồm thiết bị trao đổi nhiệt, thiết bị làm lạnh và thiết bị làm nóng, được trình bày như Hình 2.

$$\min_{z_{ij}} \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M} f_{ij}^{opt} z_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{M} z_{ij} = 1, \sum_{j=1}^{M} z_{ij} = 1, \quad i, j = 1,...,M \quad (2)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\}, i, j = 1...M \quad (3)$$

Trong đó: z_{ij} là biến nhị phân được xác định theo điều kiện như sau:

$Z_{ij} = 1$	nếu có sự trao đổi nhiệt giữa nguồn nóng thứ *i* và nguồn lạnh thứ *j* tại thiết bị trao đổi nhiệt hoặc nguồn nóng chuyển năng lượng nhiệt tới thiết bị làm lạnh và nguồn lạnh nhận năng lượng nhiệt từ thiết bị làm nóng.
$Z_{ij} = 0$	nếu cả hai $(S_i^h; S_j^c)$ thực hiện trao đổi nhiệt với những nguồn nhiệt khác hoặc là S_i^h trao đổi nhiệt với một trong số nguồn nóng còn lại hoặc S_j^c trao đổi nhiệt với một trong số nguồn lạnh còn lại.

$$f_{ijq}^{opt} = \min_{A_{ijq}, A_{iq}, A_{jq}, F_{iq}^{cu}, F_{jq}^{hu}} \Phi_1 \quad (4)$$

Trong đó:

$$\Phi_1 = f_{\mathrm{ij}}^{he} + f_{\mathrm{ij}}^{col} + f_{\mathrm{ij}}^{reb} \quad (5)$$

$$f_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{he}} = m_1^{\mathrm{he}} + m_2^{\mathrm{he}} (\mathrm{A}_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{he}})^{\gamma^{\mathrm{he}}} \quad (6)$$

$$f_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{col}} = m_1^{\mathrm{col}} + m_2^{\mathrm{col}} (\mathrm{A}_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{col}})^{\gamma^{\mathrm{col}}} + m^{\mathrm{cu}} F_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{cu}} \quad (7)$$

$$f_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{reb}} = m_1^{\mathrm{reb}} + m_2^{\mathrm{reb}} (\mathrm{A}_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{reb}})^{\gamma^{\mathrm{reb}}} + m^{\mathrm{hu}} F_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{hu}} \quad (8)$$

$$\varphi^{\mathrm{he}}(T_i^{h'}, T_j^{c'}, T_{iq}^{h,in}, T_{jq}^{c,in}, A_{ij,q}, F_i^h, F_j^c, \mathrm{U}_{\mathrm{ijq}}) = 0 \quad (9)$$

$$\varphi^{col}(T_{iq}^{h'}, T_{iq}^{h,out}, T_q^{cu,in}, T_q^{cu,out}, A_{iq}, F_i^h, F_{iq}^{cu}, U_{iq}) = 0 \quad (10)$$

$$\varphi^{\mathrm{reb}}(T_{jq}^{c'}, T_{iq}^{\mathrm{c,out}}, T_q^{\mathrm{hu,in}}, T_q^{\mathrm{hu,out}}, A_{jq}, F_j^{\mathrm{c}}, F_{jq}^{\mathrm{hu}}, U_{iq}) = 0 \quad (11)$$

Trong đó:

$f_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{he}}, f_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{col}}, f_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{col}}$ là tổng qui đổi chi phí vận hành và chi phí tổn thất khi thực hiện trao đổi nhiệt các nguồn nóng và lạnh đối với Thiết bị trao đổi nhiệt, Thiết bị làm lạnh, Thiết bị làm nóng tại EBHEN,

$m_1^{\mathrm{he}}, m_1^{\mathrm{col}}, m_1^{\mathrm{reb}}$ là đơn giá cố định đối với chi phí cơ bản,

$m_2^{\mathrm{he}}, m_2^{\mathrm{col}}, m_2^{\mathrm{reb}}$ là hệ số tính toán chi phí cơ bản,

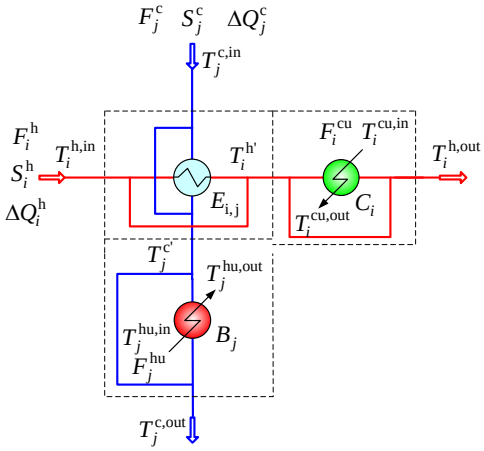
$m_1^{\mathrm{cu}}, m_2^{\mathrm{hu}}$ là hệ số tính toán chi phí vận hành,

$\gamma^{\mathrm{he}}, \gamma^{\mathrm{col}}, \gamma^{\mathrm{reb}}$ là hệ số tương đối,

$T_{iq}^{h,in}, T_{jq}^{\mathrm{c,in}}$ là nhiệt độ đầu vào bộ trao đổi nhiệt của nguồn nóng và nguồn lạnh ở giai đoạn thứ *q*,

$T_{iq}^{h'}, T_{jq}^{c'}$ là nhiệt độ đầu ra bộ trao đổi nhiệt của nguồn nóng và nguồn lạnh ở giai đoạn thứ *q,*

U là hệ số truyền nhiệt; (9), (10), (11) lần lượt là mô hình toán học của thiết bị trao đổi nhiệt, thiết bị làm lạnh, thiết bị làm nóng.



Hình 2. Cấu trúc một khối phần tử

Ở mỗi vòng lặp tại Lớp thứ 2 của thuật toán sẽ giải quyết nhiệm vụ (1), đối với giai đoạn thứ *q* từ những giá trị nhiệt lượng đã biết:

$$\Delta Q_{i,q}^{h,(k-1)} = \alpha_{i,q}^{h,(k-1)} \Delta Q_i^h \text{ và } \Delta Q_{\mathrm{j},q}^{\mathrm{c},(k-1)} = \alpha_{\mathrm{j},q}^{\mathrm{c},(k-1)} \Delta Q_j^c$$

Trong đó:

$\Delta Q_{i,q}^{h,(k-1)}, \Delta Q_{j,q}^{c,(k-1)}$ lần lượt là kết quả tính toán giá trị nhiệt lượng của nguồn nóng và lạnh ở vòng lặp thứ (*k*-1) tại giai đoạn *q*,

ΔQ_i^h là giá trị nhiệt lượng mà nguồn nóng sẽ chuyển tới nguồn lạnh để giảm nhiệt độ từ $T_i^{h,in}$ xuống $T_i^{h,\mathrm{out}}$,

ΔQ_j^c là giá trị nhiệt lượng mà nguồn lạnh cần nhận từ nguồn nóng để nhiệt độ tăng từ $T_j^{\mathrm{c},in}$ đến $T_j^{\mathrm{c,out}}$.

Ở Lớp thứ 3 sẽ giải quyết nhiệm vụ (12)

$$\min_{A_{ijq},A_{iq},A_{jq},F_{iq}^{cu},F_{jq}^{hu}} \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}\sum_{q=1}^{N} f_{\mathrm{ijq}}^k \qquad (12)$$

$$\varphi^{\mathrm{he}}(T_{iq}^{h,in,k}, T_{jq}^{c,in,k}, A_{ijq}, F_i^h, F_j^c, \mathrm{U}_{\mathrm{ijq}}) = 0 \qquad (13)$$

$$\varphi^{col}(\bar{T}_{iq}^{h,k}, T_q^{cu,in}, A_{iq}, F_i^h, F_{iq}^{cu}, U_{iq}) = 0 \qquad (14)$$

$$\varphi^{reb}(\bar{T}_{jq}^{c,k}, T_q^{hu,in}, A_{jq}, F_j^c, F_{jq}^{hu}, U_{jq}) = 0 \qquad (15)$$

Trong đó:

f_{ijq}^k là hàm mục tiêu của EBHEN tương ứng với cấu trúc của hệ thống trao đổi nhiệt tìm được ở vòng lặp thứ *(k-1)* và (13), (14), (15) tương ứng là mô hình toán học của các thiết bị trao đổi nhiệt, thiết bị làm nóng, thiết bị làm lạnh.

Giải quyết nhiệm vụ (12) dựa theo các giá trị $\alpha_{i,q}^{h,(k-1)}, \alpha_{\mathrm{j},q}^{\mathrm{c},(k-1)}$ ở vòng lặp thứ *(k-1),* đối với vòng lặp thứ *k* nhận được các giá trị tham số cố định mới: $\alpha_{i,q}^{h,k} = \dfrac{\Delta Q_{i,q}^{h,k}}{\Delta Q_i^h}, \alpha_{\mathrm{j},q}^{\mathrm{c},k} = \dfrac{\Delta Q_{\mathrm{j},q}^{\mathrm{c},k}}{\Delta Q_{\mathrm{j}}^{\mathrm{c}}}$

Quá trình thực hiện được lặp đi lặp lại cho tới khi sai số giữa các vòng lặp nằm trong phạm vi cho phép thì dừng lại. Lúc đó chúng ta sẽ nhận được một hệ thống trao đổi nhiệt tối ưu.

3. VÍ DỤ TÍNH TOÁN ÁP DỤNG.

Xét một hệ thống trao đổi nhiệt gồm 4 nguồn nóng, và 4 nguồn lạnh, các thông số ban đầu của hệ thống được trình bày ở Bảng 1, Bảng 2 và Bảng 3. Bao gồm các giá trị nhiệt độ ban đầu và giá trị nhiệt độ cuối cùng của các nguồn nhiệt, đơn giá chi phí cơ bản, lượng chênh lệch nhiệt độ nhỏ nhất có thể ở các thiết bị khi thực hiện trao đổi nhiệt.

Bảng 1. Thông số của nguồn nóng.

Nguồn nóng	$T_i^{\mathrm{h,in}}$, K	$T_i^{\mathrm{h,out}}$, K	*FCp* kW/K	CFI kW/m^2 k
H1	420	360	50	1
H2	470	375	200	2,5
H3	485	390	150	2
H4	500	435	100	2
Chất làm nóng	$T^{\mathrm{hu,in}}$, K	$T^{\mathrm{hu,out}}$,K		CFU$^{\mathrm{h}}$ kW/m^2 k
	620	620		5

Bảng 2. Thông số nguồn lạnh.

Nguồn lạnh	$T_j^{\mathrm{c,in}}$, K	$T_j^{\mathrm{c,out}}$, K	*FCp* kW/K	CFJ kW/m^2 k
C1	340	380	60	1
C2	365	430	120	1
C3	395	450	100	1
C4	410	465	400	1
Chất làm lạnh	$T^{\mathrm{cu,in}}$,K	$T^{\mathrm{cu,out}}$,K		CFU$^{\mathrm{c}}$ kW/m^2 k
	300	315		1

Bảng 3. Đơn giá chi phí cơ bản và chi phí vận hành

Đơn giá phí vận hành chất làm nóng	85$/kW-năm
Đơn giá phí vận hành chất làm lạnh	15$/kW-năm
Đơn giá chi phí cơ bản	380 $/m^2
Hệ số tương đối	0,65
Độ chênh lệch nhiệt độ nhỏ nhất	10 K

- Nhiệt lượng $\Delta Q_i^h, \Delta Q_j^c$ được phân phối trên các giai đoạn được chọn theo hệ số như $\alpha_{i,q}^h, \alpha_{\mathrm{j},q}^c$ như sau:

$\alpha_i^h = [0.6\ 0.4; 0.7\ 0.3; 0.2\ 0.8; 0.2\ 0.8]$

$\alpha_i^h = [0.2\ 0.8; 0.4\ 0.6; 0.8\ 0.2; 0.4\ 0.6]$

- Ma trận giá trị chi phí khi có sự trao đổi nhiệt giữa nguồn nóng và nguồn lạnh bất kỳ như Bảng 4, Bảng 5.

Bảng 4. Giá trị chi phí ở giai đoạn 1

i	q = 1			
	j			
	25288	122399	340006	784085
	202954	166106	151246	94009
	39435	27828	139141	515661
	14645	158601	268839	645039

Bảng 5.Giá trị chi phí ở giai đoạn 2

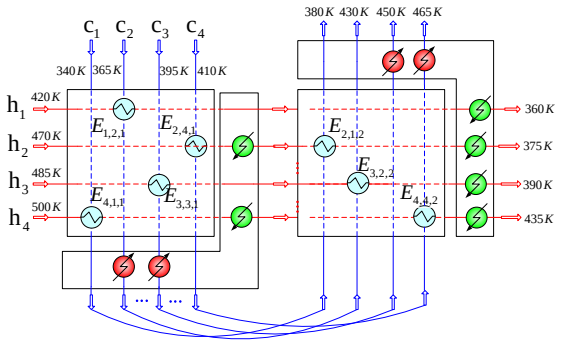
i	q = 2			
	j			
	72871	423020	116902	1151206
	69221	467843	187885	1222189
	154518	119189	170924	963447
	56090	18118	70277	772410

- Ma trận nhị phân thu được như **Bảng 6**.

Bảng 6. Ma trận nhị phân tương ứng với cả 2 giai đoạn của hệ thống trao đổi nhiệt.

i	q = 1				q = 2			
	j				j			
	0	1	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	1	1	0	0	0
	0	0	1	0	0	1	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	1

- Cấu trúc tối ưu hệ thống trao đổi nhiệt gồm 2 giai đoạn nhận được như **Hình 3**.



Hình 3. Cấu trúc tối ưu hệ thống trao đổi nhiệt 2 giai đoạn nhận được bằng phương pháp qui hoạch tuyến tính.

4. KẾT LUẬN

Trên cơ sở phân tích mô hình toán học của các thiết bị trong hệ thống trao đổi nhiệt, tính toán tối ưu EBHEN và ứng dụng phương pháp tối ưu qui hoạch tuyến tính, nhóm tác giả đã xây dựng được cấu trúc tối ưu MHEN có thỏa hiệp giữa chi phí cơ bản và chi phí vận hành và số lượng thiết bị trao đổi nhiệt. Kết quả này chúng ta có thể tối ưu hệ thống theo phương pháp thay đổi cấu trúc dưới dạng thuật toán gồm 3 Lớp như đã trình bày ở trên.

Việc khảo sát hệ thống dưới dạng từng phân đoạn riêng biệt theo phương pháp phân tách có ý nghĩa rất lớn trong việc giảm số lượng các biến số khi xây dựng chương trình tính toán tối ưu hệ thống.

Qua ví dụ thực hiện chúng ta thấy phương pháp này hoàn toàn có thể ứng dụng để tối ưu tham số các thiết bị cũng như hệ thống trao đổi nhiệt trong các quá trình sản xuất.

TÀI LIỆUTHAMKHẢO

1. Г.Ванер, “Основы исследования операций”, Москва, 1972
2. Klemeš J.J., Kravanja Z. Forty years of heat integration:pinch analysis (PA) and mathematical programming(MP) // Current Opinion in Chemical Engineering. 2013. V. 2. № 4. P. 461
3. X. Feng, X.X. zhu. Combining pinch and exergry analysis for process modifications // Applied Thermal Engineering. 1997. V. 17. № 3. P. 249
4. Nguyễn Doãn Phước, “Lý thuyết điều khiển nâng cao, Nhà xuất bản khoa học kỹ thuật”, 2005
5. Островкий Г.М., Волин Ю.М. “Моделирование сложных химико – технологических схема”, Москва ,1975

APPLICATION OF LINE PLANNING METHOD TO DETERMINATE STRUCTURE OF MULTI-STAGE HEAT EXCHANGER NETWORK

Le Quang Tuyen, Nguyen Dac Nam, Industry University of Viet Tri

Email: *tuyenlequangpt@gmail.com*

Abstract*: The paper presents the research results on the basis of analyzing the mathematical model of the equipment in the heat exchanger system, using the linear optimization method and the linear planning method to give a precise method. structured optimal multi-stage heat exchanger systems. This is the system optimization method according to the rules of separation based on approximate input parameters for heat exchanger stages.*