



ISSN 1815-4840

Himičeskaâ tehnologiâ. Kontrol' i upravlenie
**CHEMICAL TECHNOLOGY.
CONTROL AND MANAGEMENT**

2020, №2 (92) pp.21-28

International scientific and technical journal
journal homepage: <https://uzjournals.edu.uz/ijctcm/>



Since 2005

UDC 663.52:681

METHODS OF ORGANIZING ENERGY-CLOSED TECHNOLOGY

Nodirbek Rustambekovich Yusupbekov¹, Shukhrat Manapovich Gulyamov²,
Yusuf Shodiyevich Avazov³, Nasiba Djumabayevna Xodjiyeva⁴

^{1,2,3}Tashkent State Technical University named after Islam Karimov

Address: 2, University str., 100095, Tashkent, Uzbekistan

E-mail: yusufbek_avazov@mail.ru; yusuf.avazov@tdtu.uz;

⁴Tashkent University of Information Technology named after Muhammad Al-Khorazmi

Address: 108, Amir Temur Avenue, 100200, Tashkent, Uzbekistan

E-mail: nhojjeva8@gmail.com, Phone: +998-94-683-38-37.

Abstract: The classification of methods for analyzing energy-technological processes is conducted. Promising methods are considered: exergetic, thermo econometric, thermal diagram method, information-thermodynamic method, and method based on the consideration of the irreversible process of heat transfer of an object to the environment. A comparative assessment of the considered methods is given and the expediency of their use is justified.

Key words: thermodynamic optimization, methods of organizing energetically closed technology, exergy analysis, chemical technology system, entropy.

Аннотация: Энергия -технологик жараёнларни таҳлил қилиш усулларини таснифлаш амалга оширилган. Эксергия, термоиқтисодий усуллар, термал диаграммалар усули, ахборот-термодинамик усул ва объектни атроф-муҳитга иссиқлик узатишининг қайтмас жараёнини кўриб чиқишига асосланган усул каби истиқболли усуллар кўриб чиқилган. Кўриб чиқилган усулларга қиёсий баҳо берилган ва улардан фойдаланишининг мақсадга мувофиқлиги асосланган.

Таянч сўзлар: термодинамик оптималлаштириш, энергетик берк технологияни ташиқил этиш усуллари, эксергияни таҳлил қилиш, кимёвий технологик тизим, энтропия.

Аннотация: Осуществлена классификация методов анализа энерготехнологических процессов. Рассмотрены перспективные методы: эксергетический, термоэконометрический, метод тепловых диаграмм, информационно-термодинамический метод и метод, основанный на рассмотрении необратимого процесса теплопередачи объекта в окружающую среду. Дана сравнительная оценка рассмотренных методов и обоснована целесообразность их использования.

Ключевые слова: термодинамическая оптимизация; методы организации энергозамкнутой технологии; эксергетический анализ; химико-технологическая система; энтропия.

Введение

В последнее время в связи с дефицитом энергетических ресурсов проблема экономии энергии становится особенно актуальной, приобретая социально-экономическую значимость. В решении этой проблемы важное место занимают вопросы энерготехнологического комбинирования объектов, состоящих из отдельных подсистем, блоков и элементов: подготовка сырья, его переработка, выделение целевых продуктов и очистка от вредных выбросов. Оптимальное сочетание материальных и энергетических превращений должно базироваться на принципах организации энергозамкнутой технологии, в основе которой лежат фундаментальные методы системного анализа и синтеза сложных систем.

Постановка задачи и её решение

Известные фундаментальные методы системного анализа можно разделить на две группы:

- методы анализа однородных систем или систем, характеризующихся потреблением или выработкой только тепловой формы энергии;

- методы анализа неоднородных систем, сочетающих как тепловые, так и силовые (источники и потребители работы) энергетические ресурсы.

В многоуровневой структуре химико-технологической системы (ХТС) это представляется двумя иерархическими уровнями (рис.1). На первом уровне в основе оценки энергетического взаимодействия лежит установление эквивалентной формы работоспособной энергии – эксергии и расчет термодинамического баланса, основанного на втором начале термодинамики. Особенностью второго иерархического уровня является наличие большого количества источников и стоков энергии разного вида и различной пригодности, взаимодействие между которыми и характеризует в конечном счете энергозамкнутость системы в целом. Для первого иерархического уровня характерно изменение энтальпии или теплосодержания потока. Анализ тепловой подсистемы основан на рассмотрении необратимого характера процесса теплопередачи [1].



Рис. 1. Иерархическая структура ХТС для целей термодинамического анализа.

Уменьшение энтропии источника тепла равно:

$$dS_1 = -\frac{dQ}{T_1}; \quad (1)$$

где T_1 – температура источника тепла, dQ – количество тепла, передаваемого окружающей среде.

В то же время прирост энтропии окружающей среды равен:

$$dS_0 = -\frac{dQ}{T_0}; \quad (2)$$

где T_0 – температура окружающей среды.

В результате энтропия системы изменится на величину:

$$dS = dS_0 + dS_1 = -dQ\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right). \quad (3)$$

$dS = 0$ только в том случае, когда $T_1 = T_0$, поэтому необратимость процесса теплопередачи связана с разностью температур жидкостей. Для наиболее простого случая изотермической теплопередачи интеграл от выражения стремится к величине:

$$\Delta S = -Q\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right). \quad (4)$$

Для оценки минимального энергопотребления системы, характеризующейся изменением только тепловой формы энергии, в работе [2] предложен подход, существо которого заключается в минимизации разности площадей под кривыми, представляющими собой

тепловые диаграммы источников и стоков тепловой энергии. При этом изменение величины тепловой энергии как источника, так и стока тепла, определяется интегралом следующего вида:

$$\int_{\text{состояние 1}}^{\text{состояние 2}} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ.$$

Тепловая диаграмма представляет собой зависимость тепловой нагрузки от к.п.д. Карно $\left(\frac{T-T_0}{T}\right)$. Площадь под кривой равна эксергии потока.

Одним из перспективных методов системного анализа, применительно к неоднородным системам является метод термоэкономического анализа, основанный на построении стоимостной модели и ее декомпозиции [3].

Стоимостная модель химико-технологической системы представляет из себя систему уравнений, включающую зависимость выходных потоков эксергии E_i от эксергии выходных потоков E_p и зависимость капитальных затрат на создание элемента от этих параметров:

$$\begin{cases} E_i = s_i(\bar{E}_p; \bar{U}_p) & i = 1, 2, \dots, N; \\ K_p = Z_p(\bar{E}_p; \bar{U}_p) & p = 1, 2, \dots, P; \end{cases} \quad (5)$$

где \bar{U}_p – управление.

Каждому технологическому потоку схемы ставится в соответствие стоимость единицы эксергии λ_i , которая определяется декомпозиционным методом с использованием множителей Лагранжа [4].

Записывается функция Лагранжа:

$$H = \sum_{l=1}^L c_{0l} E_{0l} + \sum_{p=1}^P Z_p(\bar{E}_p, \bar{U}_p) + \sum_{i=1}^I \lambda_i [\bar{E}_i - \varepsilon_i(\bar{E}_p, \bar{U}_p)] + \sum_j \lambda_j [E_j - e_j(\bar{E}_p, \bar{U}_p)]; \quad (6)$$

а из нее получается система уравнений вида:

$$\frac{\partial H}{\partial U_m} = \frac{\partial}{\partial U_m} \left[\sum_{p=1}^P Z_p(\bar{E}_p, \bar{U}_p) - \sum_{i=1}^I \lambda_i \varepsilon_i(\bar{E}_p; \bar{U}_p) - \sum_{j=1}^J \lambda_j \varepsilon_j(\bar{E}_p, \bar{U}_p) \right] = 0; \quad (7)$$

$$m = 1, \bar{M},$$

$$\frac{\partial H}{\partial E_k} = \frac{\partial}{\partial E_k} \left[\sum_{l=1}^L c_{0l} E_{0l} + \sum_{p=1}^P Z_p(\bar{E}_p, \bar{U}_p) + \sum_{i=1}^I \lambda_i [E_i - \varepsilon_i(\bar{E}_p; \bar{U}_p)] - \sum_{j=1}^J \lambda_j \varepsilon_j(\bar{E}_p, \bar{U}_p) \right] k = 0, \bar{K}$$

Решение системы уравнений позволяет определить стоимости единиц эксергии всех потоков и суммарные потери работоспособной энергии, минимальное значение которых соответствует минимальному загрязнению окружающей среды энергетическими отходами.

Оптимальное распределение природных энергетических ресурсов между элементами неоднородной системы, осуществляющей как комплекс операций по переработке сырья в целевые продукты, так и комплекс вспомогательных операций (например, перекачку, сжатие, теплообмен и т. д.) связано с внутренней структурой системы, с организацией материальных и энергетических потоков внутри нее. Для этих целей предлагается комплексный информационно-термодинамический подход, позволяющий оценить количество и качество энергии, перерабатываемой внутри системы.

Комплексный информационно-термодинамический подход позволяет наряду с указанием, каким способом и в каких пределах возможно преобразование энергии (I и II законы термодинамики), ответить на вопрос, куда, т.е. в какой направлении должна осуществляться передача энергии («нулевой» закон термодинамики).

Исходная информация представляется следующим образом:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^k p_{ij} \varepsilon_{ij} = \langle E_i \rangle = \bar{E}_i = f_i(\bar{p}_i, \bar{T}_i); \\ \sum_{j=1}^k p_{ij} = 1 & i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (8)$$

В этих уравнениях вероятность p_{ij} -го дискретного состояния с энергией ε_{ij} , соответствующего одному из возможных состояний на выходе i -го процесса (альтернативное решение) и $\langle E_i \rangle$ – математическое ожидание энергии i -го ХТП, совпадающего в статике со среднеинтегральным уровнем энергии. Например в тепловом процессе роль E_i – играет функция среднелогарифмической температуры. Это описание имеет двухуровневую природу, причем, характеристика $\langle E_i \rangle$ является макрохарактеристикой ХТП. В системе наблюдается рассогласование средних термодинамических уровней \bar{E}_i по отношению к уровню системы в целом, определяемым постоянными $E_{\text{вх}}$ и $E_{\text{вых}}$.

Различные сочетания в расположении средних уровней характеризуются различным распределением природных ресурсов ($E_{\text{вспом}}$) и различной структурой связей элементов системы.

Оптимальное решение связано с максимизацией энтропии стохастического информационного процесса, учитывающей весь возможный ансамбль решений.

Функция энтропии представляется в виде:

$$\begin{cases} H_U = - \sum_{i=1}^N n_i \ln n_i; \\ \sum_{i=1}^N n_i = 1. \end{cases} \quad (9)$$

В этом выражении вероятность n_i равна:

$$n_i = \exp(-\bar{E}_i/RT_0), \quad (10)$$

где RT_0 – уровень энергии системы в целом.

Решение задачи о максимизации H_U соответствует решению задачи и максимизации общего критерия структурной организованности, приведенного в работе [5] и объединяющего все три начала термодинамики:

$$n_{\text{систем}} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \ln n_i}{\sum_{i=1}^N n_i}. \quad (11)$$

Раскрытие неопределенности выбора энергетических нагрузок на основании рассматриваемого подхода обеспечивается в дальнейшем выбором структуры внутреннего и внешнего воздействий объекта и окружающей внешней среды. При этом строится модель химико-технологической системы в виде обобщенного гипотетического описания через параметры структуры:

$$\bar{x}_{pt} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N K_{ij}^{pl} \bar{Y}_{lj} + \sum_{q=1}^N K_{ij}^{pl} \bar{Y}_{oq}. \quad (12)$$

где K_{ij}^{pl} – структурный параметр, характеризующий долю j -го выходного потока i -ой подсистемы (ХТП), подаваемого на 1-ый вход p -ой подсистемы; K_{oq}^{pl} – структурный параметр, показывающий, какое количество внешнего входного потока с энергией E_{oq} подается на 1-ый вход p -ой подсистемы.

Для оценки методов рассмотрим эффективность работы термодинамической системы, осуществляющей охлаждение нитрозного газа от $T_1 = const$ до $T_3 = const$. От выбора промежуточной температуры T_2 зависит распределение нагрузок между T_1 и T_2 , что приводит к различным значениям температур вспомогательных потоков (T_1, T_2, T_3 и T_4), в зависимости от которых меняется L -подведенная энергия, или G -количество природного топлива.

Эффективность работы термодинамической системы оценивается по критерию термодинамического совершенства:

$$\eta_T = \frac{E_{\text{целев}}}{\sum_1 E_{\text{затр } i}} = \frac{E_3}{E_1 + E'_1 + E'_3}. \quad (13)$$

Эксергия i -го теплового потока рассчитывается на основании зависимости:

$$E_i = G_i c_i (T_i - T_o) - G_i c_i T_o \ln \frac{T_i}{T_o}. \quad (14)$$

Для расчета температур теплоносителей составлено математическое описание, представляющее собой модель вытеснения по обоим потокам теплоносителей и хладагентов:

$$\begin{cases} \frac{dT_{\text{нг}}}{dl} = -\frac{kF}{G_{\text{нг}}c_{\text{нг}}}(T_{\text{нг}} - T_x); \\ -\frac{dT_x}{dl} = -\frac{kF}{G_x c_x}(T_{\text{нг}} - T_x). \end{cases} \quad (15)$$

Таблица 1

Расчёт коэффициента теплопередачи

Поток		V _{сек}	w, м/сек	Re	l _{ср} , м	d _э , м	a, ккал/м ² ·ч·град	К
T ₁	Воздух	3,40	13,5	65000	7,65	0,0210	159,2	δ _{ст} =0,002м λ=15 ккал/м ² ·ч·град
T ₂	Нитрозный газ	4,30	11,9	49000	7,65	0,0253	122,4	
T ₃	Хвостовые газы	2,65	10,5	52000	7,65	0,0210	142,1	68,75
T ₄	Нитрозный газ	3,80	10,1	41000	7,65	0,0251	135,1	

Примечание: для перевода ккал в кДж необходимо пользоваться коэффициентом 1 ккал = 4,18 кДж.

Расчет коэффициентов теплопроводности дан в таблице 1. Потоки эксергии и значения эксергетического к.п.д. при различных значениях T₁ и T₂ приведены в таблице 2. В таблице 3 приведены результаты расчетов информационных характеристик по методике [6, 7], позволяющей оценить эффективность химико-технологического процесса и, в частности тепловых процессов. Зависимость информационного критерия в зависимости от температуры приведена в таблице 3 (рис.2).

Таблица 2

Оценка эксергетических показателей термодинамической системы

T ₁ ', К	T ₂ , К	E ₁ ', ккал/ч	E ₃ ', ккал/ч	E ₁ ' + E ₃ ', ккал/ч	Q ₁ ' + Q ₃ ', ккал/ч	γ _i г
323	451,8	16056,4	227947,0	244003,4	111305670,0	0,2261
343	462,3	49942,5	166497,0	216439,5	111378352,0	0,2293
363	472,7	100230,0	113054,0	213284,0	11449525,0	0,2297
373	477,9	130964,0	90119,4	221083,4	11487376,0	0,2287
398	491,0	222561,0	42567,0	265128,0	11577474,0	0,2237
418	501,5	309659,0	16549,9	326208,9	11650157,0	0,2170

Примечание: 1. E₁ = 1717440 ккал/ч; E₃ = 443390 ккал/ч. 2. Для перевода ккал в кДж необходимо пользоваться и коэффициентом 1 ккал=4,18 кДж.

Таблица 3

Расчет информационного критерия совершенства системы

T ₁ ', К	T ₂ , К	I ₀₁	I ₀₂	Π ₁	Π ₂	Π _с = $\frac{n_1 I_{01} \eta_1 + n_2 I_{02} \eta_2}{n_1 I_{01} + n_2 I_{02}}$
323	451,8	15,49	0,6425	0,1984	0,2985	0,2031
343	462,3	11,96	1,2400	0,2153	0,2597	0,2202
363	472,7	9,21	2,0800	0,2332	0,2266	0,2318
373	477,9	8,07	2,6100	0,2425	0,2119	0,2341
398	491,0	5,77	4,3400	0,2670	0,1798	0,2260
418	501,5	4,38	6,2500	0,2878	0,1582	0,2060

Таблица 4

Оценка диссипативных потерь при теплообмене с окружающей средой

T ₁ ', К	T ₂ , К	$\frac{Q_I}{T_1}$, ккал/град	$\frac{Q_{II}}{T_2}$, ккал/град	$\sum \frac{Q_i}{T_i}$, ккал/град	$\frac{Q_c}{T_0}$, ккал/град
323	451,8	4545,36	756,11	5301,47	10186,6
343	462,3	4207,30	1188,02	5395,30	
363	472,7	3872,56	1574,29	5446,85	
373	477,9	3703,88	1762,50	5466,42	
398	491,0	3282,83	2274,90	5497,70	
418	501,5	2945,47	2560,36	5505,80	

Примечание: для перевода ккал в кДж необходимо пользоваться коэффициентом 1 ккал=4,18 кДж.

Зависимость $\eta_T = f(T_1')$ – практически прямая линия, в то время как $\eta_{инф} = f(T_1')$ существенно нелинейна. В результате поиска оптимального распределения нагрузок, суммарный поток тепла ($Q_1' + Q_3'$) в систему уменьшается.

Для рассматриваемой системы проведем оценку диссипативных потерь при перераспределении нагрузок между теплообменниками.

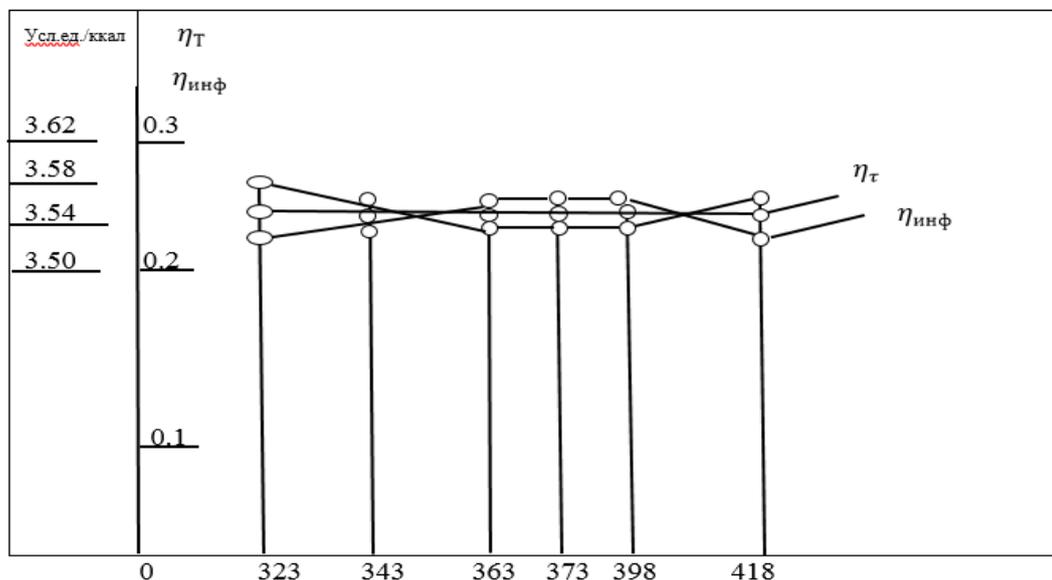


Рис. 2. Зависимость степени термодинамического, информационного совершенства и термодинамического критерия от распределения нагрузок в системе.

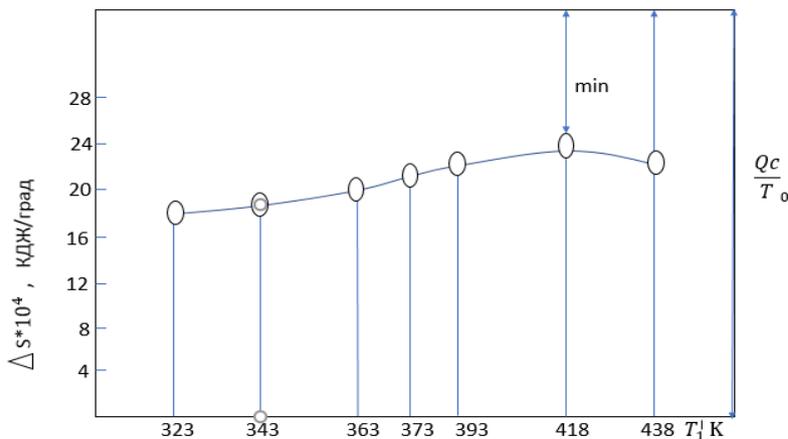


Рис. 3. Зависимость диссипативных потерь от распределения нагрузок в системе.

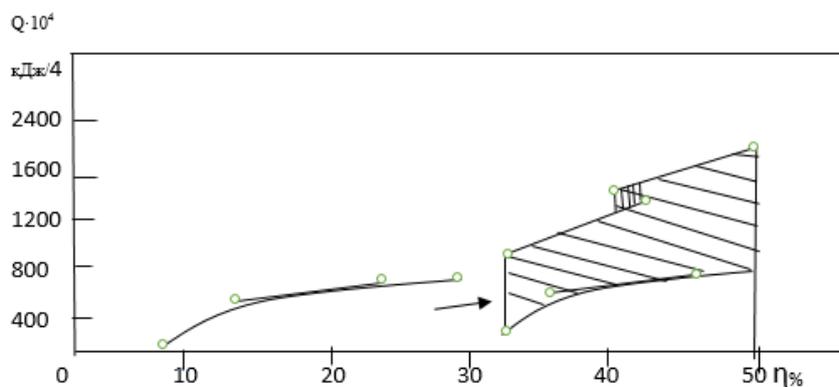


Рис. 4. Диаграммы источников и стоков тепловой энергии.

Таблица 5

Источники тепловой энергии

T_1', K	$T_1 - T_0, K$	$\eta_{\text{Карно}}$	$Q_{X1} * 10^{-4},$ ккал/ч	T_2', K	$T_2 - T_0, K$	$\tau i_{\text{Карно}}$	$Q_{II} * 10^{-4},$ ккал/ч
593	295	0,497	388,80	483	185	0,383	269,70
573	275	0,479	371,78	473	175	0,369	256,80
553	255	0,461	350,80	463	165	0,356	244,04
533	235	0,441	327,30	453	155	0,342	233,77
513	215	0,419	308,95	443	145	0,327	218,35
483	185	0,383	274,90	433	135	0,312	206,80

Примечание: 1. $T_1^{\text{зад}} = 593 \text{ K}$; $T_1^{\text{зад}} = 433 \text{ K}$. 2. Для перевода ккал в кДж необходимо пользоваться коэффициентом $1 \text{ ккал} = 4,18 \text{ кДж}$.

Таблица 6

Стоки тепловой энергии

T_1', K	$T_1' - T_0, K$	$\eta_{\text{Карно}}$	$Q_{X1} * 10^{-4},$ ккал/ч	T_3', K	$T_3' - T_0, K$	$\gamma_i_{\text{Карно}}$	$Q_{II} * 10^{-4},$ ккал/ч
323	25	0,078	38,86	403,20	105,20	0,2609	133,60
333	35	0,105	52,20	394,87	96,87	0,2450	124,20
343	45	0,131	68,80	386,60	88,60	0,2290	115,90
353	55	0,156	81,05	378,30	80,30	0,2120	106,60
363	65	0,179	94,38	369,90	71,90	0,1940	97,30
373	75	0,201	108,80	361,70	63,70	0,1760	86,94
383	85	0,221	122,14	353,40	55,40	0,1570	77,62

Примечание: для перевода ккал в кДж необходимо пользоваться коэффициентом $1 \text{ ккал} = 4,18 \text{ кДж}$.

Таблица 7

Результаты термозкономического анализа системы

T_1', K	Стоимость эксергии нитрозных газов усл.ед/ккал	Стоимость эксергии воздуха, усл.ед/ккал	Стоимость эксергии хвостовых Газов, усл.ед/ккал	Величина эксергии выходных потоков $*10^{-6}$	Стоимость единицы эксергии продукции $*10^5$, усл.ед/ккал
323	5167,78	32,4004	98,2455	1,47695	3,5874
343	5167,78	100,7860	71,7644	1,50999	3,5367
363	5167,78	202,2530	48,7260	1,54397	3,5096
373	5167,78	264,2860	38,8458	1,56148	3,5036
398	5167,78	449,1140	18,3457	1,60704	3,5067
418	5167,78	624,9110	7,1293	1,64522	3,5254

Примечание: Для перевода ккал в кДж необходимо пользоваться коэффициентом $1 \text{ ккал} = 4,18 \text{ кДж}$.

Величина диссипативных потерь определяется как:

$$\Delta S = \frac{Q_I}{T_1} + \frac{Q_{II}}{T_2} - \frac{Q}{T_0}; \quad (16)$$

где $Q = Q_I + Q_{II} = \text{const}$ (таб.4 и рис.3).

Для оценки степени совершенства системы с помощью тепловых диаграмм необходимо провести расчет эксергии источников (горячие потоки нитрозного газа с температурами T_1 и T_2) и стоков (холодные потоки воздуха T_1' и хлостовых газов T_3'). Результаты расчетов представлены на рис.4 и в табл.5 и табл.6.

Результаты расчета системы из двух теплообменников с позиции термозкономики приведены в табл.7 и на рис.2.

Заклучение

1. Термодинамический подход, основанный на оценке степени термодинамического совершенства системы по целевому продукту оказывается неприемлемым, поскольку критерий не чувствителен к перераспределению нагрузок между теплообменниками.

2. Метод «тепловых диаграмм» и метод, основанный на оценке необратимого процесса теплообмена двух источников и окружающей среды, дают близкий результат, однако несоответствие этого результата с результатами термоэкономического анализа указывает на то, что учет неэнергетических затрат сдвигает оптимальное значение температур от полученных по обоим методам. Целесообразно использовать эти методы на стадии выбора альтернативных термодинамически совершенных вариантов, выбор единственного из которых осуществляется на основе экономических примеров.

3. Соответствие результатов информационно-термодинамического и термоэкономического подходов, позволяет сделать вывод о перспективности этих направлений для целей организации энергосамкнутой технологии.

References:

1. Gorbunov V.A. Ispol'zovanie neyrosetevy'h tehnologiy dlya povysheniya e`nergeticheskoy e`ffektivnosti teplohnologicheskikh ustanovok. -Ivanova, 2011. -476s.
2. Fokin V.M., Boykov G.P., Vidin YU.V. Osnovy' e`nergoberejeniya v voprosah teploobmena. Monografiya. -M.: Mashinostroenie, 2005. -192 s.
3. Borovskaya M.E. Termoe`konomicheskiy analiz kak e`lement diagnostiki snijeniya zatrat organizacii. -Minsk: BGTU, 2018. -87s.
4. Van'ko V.I., Ermoshina O.V., Kuvy'rkin G.N. Variacionnoe ischislenie i optimal'noe upravlenie. -Moskva: MGTU im. N.E'.Baumana, 2006. -488s.
5. Yusupbekov N., Gulyamov Sh., Avazov Yu., Zaynutdinova M., Khojiyeva N. Analysis of Information Characteristics Objects of Chemical Technology // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. –India. -Vol. 6. Issue 5. May 2019. –PP.9453-9459.
6. Yusupbekov N.R., Gulyamov SH.M., Muhitdinov D.P., Avazov YU.SH. Matematicheskoe modelirovanie processov rektifikacii mnogokomponentny'h smesey, Tashkent 2014 - 156s.
7. Yusupbekov, Nadyrbek Rustambekovich; Gulyamov, Shukhrat Manapovich; Zainutdinova, Mastura Bahadirovna; and Khozhieva, Nasiba Zhumabaevna (2019) "Analysis of information characteristics objects of chemical technology,"*Chemical Technology, Control and Management*: Vol. 2019 : Iss. 1 , Article 6. Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ijctcm/vol2019/iss1/6>.