

13. Stolarski, M. J., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Krzyżaniak, M., Gulczyński, P., & Mleczek, M. (2013). Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. *Renewable energy*, 57, 20-26.
14. Lu, D., Tabil, L. G., Wang, D., Wang, G., & Emami, S. (2014). Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders. *Biomass and Bioenergy*, 69, 287-296.
15. Chou, C. S., Lin, S. H., & Lu, W. C. (2009). Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. *Fuel processing technology*, 90(7), 980-987.
16. Peretvaka, S.N., & Osadchuk, P.I. (2015). Tehnologija proizvodstva pellet iz vinogradnih vzhimok [The technology of pellet production from grape harvest]. Naukovi pratsi [Odeskovi natsionalnovi akademiyi harchovih tehnologiy] - Scientific works [Odessa National Academy of Food Technologies], (47 (2)), 213-215.
17. Peretvaka, S.N. (2011). Issledovanie energeticheskikh harakteristik kofevnogo shlama. [Study of the energy characteristics of coffee slag]. Naukovi pratsi [Odeskovi natsionalnovi akademiyi harchovih tehnologiy] - Scientific works [Odessa National Academy of Food Technologies], (39 (2)), 345-348.

УДК 338.45: 662.6

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ДВУХПОТОКОВЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ

Ульев Л.М., д.т.н., профессор, Маатук А., аспирант  
Национальный технический университет «ХПИ»

## ENERGY EFFICIENT RECONSTRUCTION OF TWO-FLOW HEAT EXCHANGE SYSTEMS

Ul'ev L.M., doctor of technical sciences, professor, Maatuk A., graduate student  
National Technical University "KhPI"

Copyright © 2017 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**Аннотация.** В работе приведен широкий анализ опубликованных работ, посвященных методам интеграции процессов и оптимизации теплообменных систем в производствах, использующих химико-технологические методы переработки и производства веществ. Из множества возможных систем выделена двухпоточковая задача с утилитными путями, и для нее рассмотрены процессы перераспределения тепловых нагрузок на существующих теплообменных аппаратах и температур теплоносителей на входе и выходе из них при выполнении проектов энергоэффективной реконструкции систем теплообмена в условиях технологических и экономических ограничений. Получены аналитические зависимости изменения тепловых нагрузок, существующих теплообменных аппаратов и температур теплоносителей от величины площади поверхности теплообмена новых теплообменных размещений. Определено оптимальное значение площади поверхности теплообмена, добавляемой при реконструкции, при котором наблюдается наименьшая приведенная стоимость проекта реконструкции.

**Abstract.** The paper presents a wide analysis of published works devoted to the methods of process integration and optimization heat-exchange systems in production using chemical-technological methods for processing and production of substances. The dual stream heat system with utility paths was selected from the many possible exchanger systems and the processes of the redistribution of heat loads on existing heat exchangers and temperatures of heat carriers at the input and the output of them were studied for it with fulfilling of the energy efficient retrofit project in terms of technological and economic constraints. The analytical dependences for change of thermal loads for existing heat exchangers and heat carriers temperatures were obtained from the magnitude of the surface area for heat transfer a new heat-exchange placements. The definition of change of technological parameters for existing heat exchangers can significantly reduce economic costs for the implementation of energy efficiency retrofit of the heat exchanger networks for operating companies using the methods of heat and process integration, in particular using the methods of pinch analysis. For case study, two streams problem for heat transfer in heat network at the crude and gas separation units is considered in the paper. The exist system have three heat exchangers. The temperature measurements were fulfilled for all heat exchangers and the heat loads for heat exchangers and utility were calculated. The installation of one heat exchanger at the cool side of the system is proposed in retrofit project. The dependence of the temperature change of the hot and cold process stream of the value of the additional surface obtained for each heat exchanger. Utility power and power recovery of thermal energy in the system is also analyzed.

*The dependence for annual cost of capital investments in the retrofit project of heat network of the installed heat exchanger surface taking into account the finite surface area of separate sections of heat transfer is presented in the paper. It is shown that the total discounted cost of the retrofit project will be a non-monotonic function of new heat exchange surfaces. The optimal value of heat transfer surface at which the total discounted cost of the reconstruction project will be minimal is obtained in the paper.*

**Key words:** energy efficiency, retrofit, heat exchanger network, pinch analysis.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, реконструкция, сеть теплообменников, пинч анализ.

**Введение.** Интеграция Украины в мировую экономику и европейский выбор народа Украины, который приобрел поддержку индустриально развитых стран, предполагает достижения уровня жизни и энергоэффективности экономики стран Европейского Содружества. В настоящее время энергетическая ситуация в Украине критическая, прежде всего вследствие того, что за счет собственной добычи ископаемого органического топлива Украина сегодня может только частично удовлетворить потребности: в нефти – на 10–12 %, в природном газе – на 20–25 %, в угле – на 85–90 %. Пути и методы использования возможностей энергосбережения и снижения техногенной нагрузки известны уже четыре десятилетия, и получили широкое распространение в индустриально развитых странах. Прежде всего, это методы интеграции процессов и, в частности, методы пинч анализа [1], берущие свое начало в тепловой интеграции теплообменных сетей.

**Анализ литературных источников.** Одной из первых работ в области интеграции процессов была диссертационная работа Е.С. Хохманна из Университета Южной Каролины, США [2], в которой дано термодинамическое определение минимальной величины энергопотребления в теплообменной системе. Дальнейшее развитие тепловая интеграция получила в работах Линнхоффа и Фловера [3], Фловера и Линнхоффа [4]. Классическая формулировка тепловой интеграции была сделана в книге Б. Линнхоффа и др. [5]. К публикации работы [5] были созданы методы Пинч проектирования для синтеза энергоэффективных систем оптимизированных процессов. Одновременно развивались методы линейного и не линейного программирования синтеза оптимальных энергоэффективных систем теплообменников. Большинство опубликованных работ было посвящено, так называемым корневым проектам, т.е. синтезу новых энергоэффективных систем теплообмена для оптимизированных процессов. В последнее время больше внимания уделяется тепловой интеграции в системах теплообмена работающих предприятий. Методы линейного и нелинейного программирования для синтеза энергоэффективных систем теплообмена рассматривались в работах [6]. В работе [7] предложили путь метод (Path method) реконструкции теплообменных сетей, который можно отнести к методам декомпозиции. Жу и др. [8] развили методы Пинч анализа с использованием смешанного целочисленного линейного программирования. Но для успешной реализации смешанных методов линейного и нелинейного программирования необходимо использование современных суперкомпьютеров [9]. В [9] был представлен гибридный генетический алгоритм для получения оптимальных теплообменных систем с полным использованием существующих теплообменников и их структур. В недавно опубликованных работах [10, 11] обнародован метод мостового анализа (Bridge analysis), который основан на диаграммах переноса энергии и изменениях в теплопередачи тепловой сети, необходимых для уменьшения энергозатрат, которые и названы «мостами».

**Актуальность.** Технические, технологические и экономические ограничения могут быть лишь частично учтены в методах программирования, а в метода пинч анализа могут также использоваться как эвристики. Как правило, в промышленности при проведении реконструкции систем теплообмена требуют использовать минимально возможное число новых аппаратов, даже за счет снижения экономической выгоды, но, если и удается сделать проект энергоэффективной реконструкции только за счет переобвязки существующих теплообменников, при его реализации, в системе теплообмена произойдет перераспределение температур на аппаратах и их тепловых нагрузок. Из-за этого возникнет необходимость проведения экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ) для теплообменников системы, поскольку теплообменные аппараты – это оборудование, работающее под давлением. В итоге, казалось бы, безинвестиционное мероприятие переобвязки теплообменников превращается в мероприятие с большими затратами и сроком окупаемости, поскольку стоимость проведения ЭПБ одного теплообменника равна 4–5 тыс. долл. США. Поэтому при выполнении проектов энергоэффективной реконструкции необходимо контролировать технологические параметры существующих и новых аппаратов. В работе [12] на основе метода путевого анализа создан метод структурного целеуказания, позволяющий идентифицировать подсистемы теплообменной сети, содержащие, по крайней мере, одну горячую и одну холодную утилиту, и имеющие большой энергосберегающий потенциал.

**Постановка задачи.** В настоящей работе рассматривается повышение эффективности и оптимизация двухпоточковых теплообменных систем, которые были выделены из теплообменных сетей в процессах нефте- и газопереработки [12, 13] с помощью методов, описанных в [1] и [7].

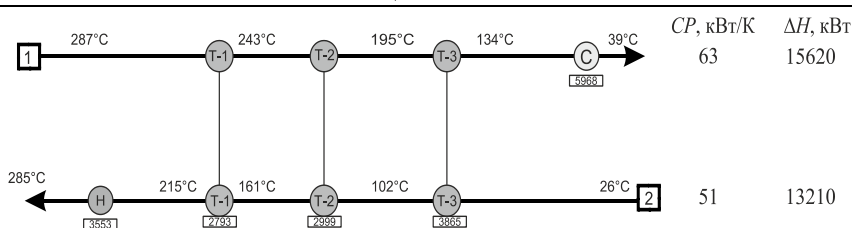


Рис. 1. Сеточная диаграмма двухпоточковой задачи теплообмена.

Рассмотрим одну из выделенных подсистем теплообмена (рис. 1). Она состоит из трех последовательно соединенных теплообменных аппаратов Т-1, Т-2 и Т-3, одного нагревателя (горячая утилита)  $H$ , и одного холодильника (холодная утилита)  $C$ . Начальная температура горячего технологического по-

тока равна  $t_{hS} = 287$  °С, конечная, равна  $t_{hT} = 39$ °С. Начальная температура холодного технологического потока равна  $t_{cS} = 26$  °С, конечная, равна  $t_{cT} = 285$ °С. Мощность горячей утилиты составляет значение  $Q_{Hmin} = 3617$  кВт, холодной утилиты равна  $Q_{Cmin} = 6032$  кВт, мощность рекуперации тепловой энергии –  $Q_{REC} = 9592$  кВт. Поточковая теплоемкость горячего технологического потока равна  $CP_h = 63$  кВт/град, холодного  $CP_c = 51$  кВт/град. При выполнении проекта реконструкции системы теплообмена будем считать теплофизические свойства теплоносителей постоянными, их расходы и параметры теплообменных аппаратов фиксированными, а их характеристики приведены в таблице 1. Также будем считать, что тепловые потери в системе теплообмена отсутствуют.

Таблица 1 - Характеристики теплообменных аппаратов

Теплообменник	Горячий теплоноситель		Потоковая тепл., кВт/град	Холодный теплоноситель		Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	Коэффициент теплопередачи, кВт/м <sup>2</sup> град
	Температура, °С			Температура, °С			
	Вход	Выход	Вход	Выход			
Т-1	287	243	63	161	215	214	0.17
Т-2	243	195	63	102	1161	214	0.16
Т-3	195	134	63	26	102	214	0.18



Рис. 2. Температурно-энтальпийные профили теплоносителей двухпоточковой системы теплообмена.

Построим температурно-энтальпийную диаграмму исходной системы теплообмена. Для этого отложим температурные профили теплоносителей так, чтобы их перекрытие по энтальпийной оси составляло значение мощности рекуперации тепловой энергии в системе теплообмена (рис. 2). Температурно-энтальпийная диаграмма системы теплообмена показывает возможность уменьшения величины горячих и холодных утилит, поскольку нагрузка на охлаждение горячего потока равна  $\Delta H_h = CP_h \times (t_{hS} - t_{hT}) = 15620$  кВт, а нагрева холодного теплоносителя  $\Delta H_c = CP_c \times (t_{cS} - t_{cT}) = 13210$  кВт, что больше мощности рекуперации. В рассматриваемом случае для снижения значения утилит необходимо увеличить мощность рекуперации тепловой энергии в системе, а для этого необходимо увеличить площадь поверхности теплообмена, поскольку параметры существующих теплообменников фиксированы.

Паспортные данные насосного оборудования и существующие перепады давления по теплоносителям позволяют установить дополнительное теплообменное оборудование в рассматриваемой системе теплообмена, а анализ расположения оборудования на установке показал, что установить дополнительный теплообменник возможно только на холодном крае теплообменной системы (Рис. 3). Рассмотрим, как будут меняться температуры на теплообменных аппаратах в зависимости от тепловой нагрузки нового теплообменника Т-4. Для этого запишем тепловые балансы для каждого теплообменника, предполагая, что в системе  $N$  аппаратов:

Паспортные данные насосного оборудования и существующие перепады давления по теплоносителям позволяют установить дополнительное теплообменное оборудование в рассматриваемой системе теплообмена, а анализ расположения оборудования на установке показал, что установить дополнительный теплообменник возможно только на холодном крае теплообменной системы (Рис. 3). Рассмотрим, как будут меняться температуры на теплообменных аппаратах в зависимости от тепловой нагрузки нового теплообменника Т-4. Для этого запишем тепловые балансы для каждого теплообменника, предполагая, что в системе  $N$  аппаратов:

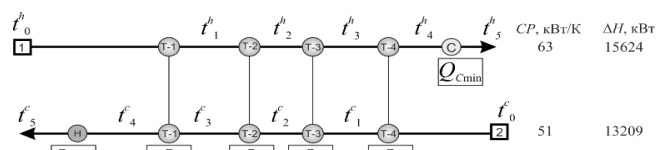


Рис. 3. Сеточная диаграмма двухпоточковой системы теплообмена с четырьмя теплообменниками.

$$CP_c(t_{N-i}^c - t_{N-i-1}^c) = CP_h(t_i^h - t_{i+1}^h), \quad i = 0 \dots N-1, \quad (1)$$

где  $t_0^h$  - начальная температура горячего потока, в нашем случае, равная 287 °С,  $t_0^c$  - начальная температура холодного потока, в нашем случае, равная 26 °С.

С другой стороны, нагрузка на теплообменный аппарат определяется, как:

$$Q_i = S_i \Delta T_{ln} K_i, \quad i = 0 \dots N-1, \quad (2)$$

и тогда для  $i$ -го теплообменника можно записать:

$$S_i K_i \frac{(t_i^h - t_{i+1}^h) - (t_{N-1}^c - t_{N-i-1}^c)}{\ln \frac{t_i^h - t_{N-1}^c}{t_{i+1}^h - t_{N-i-1}^c}} = CP_h (t_i^h - t_{i+1}^h), i = 0 \dots N - 1. \quad (3)$$

Принимая во внимание (1) получим соотношение:

$$t_i^h - t_{N-1}^c = (t_{i+1}^h - t_{N-i-1}^c) e^{A_i}, i=0 \dots N-1, \quad (4)$$

где  $A_i = \frac{S_i K_i}{CP_h} \left(1 - \frac{CP_h}{CP_c}\right)$ .

Учитывая, что  $N=4$ , т.е. в теплообменной системе 4 теплообменника, делая в системе уравнений (4) последовательные подстановки, находим температуру холодного потока на выходе из первого теплообменника:

$$t_4^c = t_0^h - (t_4^h - t_0^c) E, \quad (5)$$

где  $E = e^{A_1} e^{A_2} e^{A_3} e^{A_4}$ .

Используя выражение для теплового баланса всей системы теплообмена

$$(t_4^c - t_0^c) CP_c = (t_0^h - t_4^h) CP_h, \quad (6)$$

найдем температуру горячего потока на выходе из 4-го теплообменника:

$$t_4^h = \frac{t_0^h \left(1 - \frac{CP_h}{CP_c}\right) + t_0^c (E-1)}{E - \frac{CP_h}{CP_c}}. \quad (7)$$

Определим разность температур теплоносителей на холодной стороне теплообменной системы:

$$\Delta t_m = t_4^h - t_0^c = (t_0^h - t_0^c) \frac{CP_c - CP_h}{E CP_c - CP_h}, \quad (8)$$

Из системы уравнений (1) найдем температуры теплоносителей на входе в теплообменники и температуры теплоносителей на выходе из теплообменников:

$$t_1^c = b + d \Delta t_m e^{A_4}, \quad (9)$$

$$t_2^c = b + d \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3}, \quad (10)$$

$$t_3^c = b + d \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3} e^{A_2}, \quad (11)$$

$$t_4^c = b + d \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3} e^{A_2} e^{A_1}, \quad (12)$$

$$t_1^h = b + g \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3} e^{A_2}, \quad (13)$$

$$t_2^h = b + g \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3}, \quad (14)$$

$$t_3^h = b + g \Delta t_m e^{A_4}, \quad (15)$$

где  $b = \frac{CP_c - CP_h}{CP_c - CP_h}$ ,  $d = \frac{CP_h}{CP_c - CP_h}$ ,  $g = \frac{CP_c}{CP_c - CP_h}$ .

Теперь мы можем записать выражения для вычисления мощности горячих и холодных утилит:

$$Q_{Cmin} = CP_h (t_4^h - t_5^h), \quad (16)$$

$$Q_{Hmin} = CP_c (t_5^c - t_4^c). \quad (17)$$

Используя найденные температуры теплоносителей на входе и выходе теплообменников, вычисляем их тепловые нагрузки (рис. 3):

$$Q_i = CP_c (t_{N+1-i}^c - t_{N-i}^c) = CP_h (t_{i-1}^h - t_i^h). \quad (18)$$

В рассматриваемом случае, по технологическим причинам могут быть использованы для реконструкции только кожухотрубчатые теплообменные аппараты. Стоимость установки одной секции кожухотрубчатого теплообменника определится, как [3]:

$$CosT = A + B(S)^c, \quad (19)$$

где  $A$  – стоимость установки одной секции теплообменника,  $B$  – эквивалент стоимости 1 м<sup>2</sup> площади теплообменной поверхности,  $c$  – показатель нелинейной зависимости стоимости, отображающей возможность размещения поверхности теплообмена различной величины в одном кожухе. В данном случае значения этих параметров равны:  $A = 40000$  долл. США;  $B = 1000$  долл. США;  $c = 0.97$ .

Максимальная площадь поверхности теплообмена для одной секции у выбранного производителя составляет значение  $S_{max} = 250$  м<sup>2</sup>.

С учетом величины максимальной поверхности теплообмена одной секции, выражение (18) для одного теплообменного размещения, примет вид:

$$CosT_m = A \left[ \frac{S}{S_m} \right] + B(S)^c, \quad (20)$$

где  $[x]$  функция «потолка» Айверсона, возвращающая наименьшее целое, большее или равное  $x$  [15].

Стоимость горячих утилит на рассматриваемой установке включает стоимость собственного газа, природного газа из городской магистрали, стоимость жидкого топлива, состоящего из смеси мазута, газойлей и дизельных топлив. Итоговая стоимость горячей утилиты составляет значение, равное  $C_H = 120$  долл. США за 1 кВт год. Стоимость холодных утилит, включает стоимость свежей охлаждающей воды, стоимость элек-

троенергии, питающей приводы насосов и двигателей вентиляторов воздушных холодильников, и она равна  $C_C = 25$  долл. США в год.

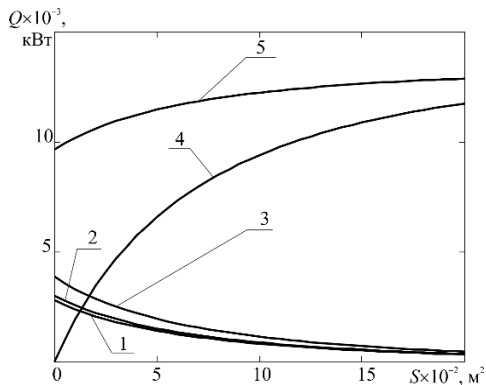
Приведенная стоимость установленного оборудования определяется выражением [4]:

$$C_d = \text{Cos} T_m \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1}, \quad (21)$$

где  $i$  - годовая процентная ставка,  $n$  - число лет.

Приведенная стоимость энергии в рассматриваемой системе теплообмена определится соотношением:

$$CE = Q_{H\min} C_H + Q_{C\min} C_C. \quad (22)$$

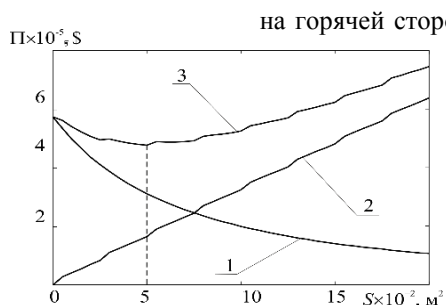


1 - на первом теплообменном аппарате; 2- на втором теплообменнике; 3- на третьем; 4 - на четвертом; 5- общая мощность рекуперации теплоты в новой теплообменной системе.

**Рис. 4. Мощность рекуперации тепловой энергии.**

аппарата. С уменьшением нагрузки на существующих аппаратах происходит уменьшение разности температур теплоносителей на них, и уменьшение изменения температуры теплоносителей в аппаратах (рис. 6).

Наибольшая разность температур между теплоносителями, начиная с некоторой величины его поверхности, будет наблюдаться на новом теплообменнике. Как следствие все температуры теплоносителей

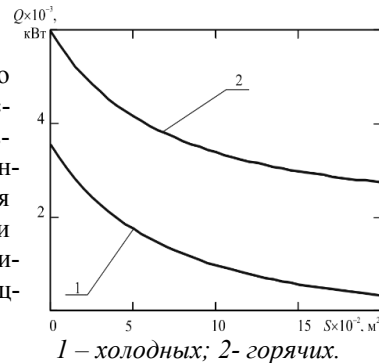


1 - годовая стоимость энергии; 2- приведенные капитальные затраты; 3- общая приведенная стоимость проекта реконструкции.

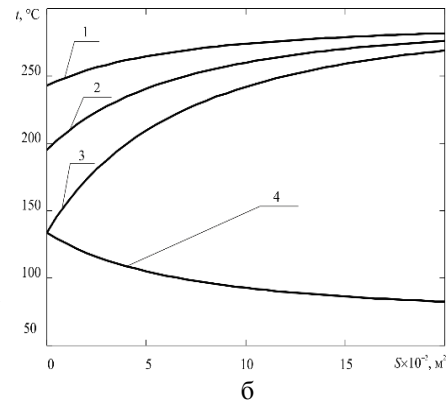
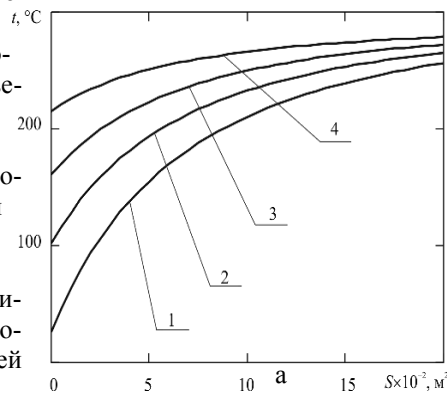
**Рис. 7. Дисконтированные стоимостные кривые.**

увеличению стоимости секций теплообменного размещения, но стоимость энергии вследствие увеличения мощности рекуперации теплоты монотонно уменьшается. В итоге общая приведенная стоимость проекта реконструкции будет немонотонной функцией. Минимальное значение будет соответствовать минимальным приведенным затратам на проект реконструкции теплообменной систе-

При увеличении площади поверхности теплообмена нового теплообменного аппарата его тепловая нагрузка будет возрастать (рис. 4), а тепловая нагрузка существующих теплообменников будет уменьшаться, хотя общая мощность рекуперации теплоты будет лишь увеличиваться. Вследствие этого мощность утилит уменьшается с увеличением поверхности теплообмена четвертого аппарата (рис. 5). Уменьшение тепловой нагрузки существующих аппаратов происходит в основном за счет увеличения теплообменной поверхности четвертого



1 - холодных; 2- горячих.  
**Рис. 5. Мощность утилит, потребляемых процессом.**



а) - изменение температуры холодного теплоносителя. 1- температура входа в 4й теплообменник, 2- в 3й, 3- во 2й, 4 в 1й; б) - горячего теплоносителя в зависимости от величины площади поверхности теплообмена нового теплообменника. 1- температура выхода из 1го теплообменника, 2- из 2го, 3- из 3го, 4 из 4го.

**Рис. 6. Изменение температуры теплоносителя.**

мы, а величина новой площади поверхности теплообмена будет являться оптимальной для проекта реконструкции. В нашем случае оптимальной величиной является поверхность теплообмена площадью 500 м<sup>2</sup>.

#### Выводы

В работе решена задача оптимизации проектов реконструкции двухпоточковых теплообменных систем, позволяющая оценивать режимные параметры работы теплообменников после реконструкции.

#### Литература

1. Smith R. Chemical Process Design and Integration. 2<sup>nd</sup> Edition. Chichester: Wiley & Sons Ltd, 2016. 920 p.
2. Hohmann E.C. Optimum networks for heat exchange. PhD thesis. Los Angeles. Univ. of Southern Calif. 1971.
3. Linnhoff B, Flower JR: Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks // AIChE J. 1978. Vol. 24, pp. 633-642.
4. Flower J.R., Linnhoff B. Synthesis of heat exchanger networks. 2. Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality// AIChE J. 1978. Vol. 24, pp. 642-654.
5. A user guide on process integration for the efficient use of energy / Linnhoff B. et al.// IChemE, Rugby, UK 1982 (New editions 1991, 1994, 2007). 247 p.
6. Mathematical programming model for heat exchanger networks synthesis including detailed heat-exchanger designs. 2. Networks synthesis / Mizutani F.T. et.al. // Ind. Eng. Chem. Res. 2003. Vol. 42, pp. 4019-4027.
7. Grievink J., Polley G.T., Verheijen P.J.T. The placement of 2-stream and multi-stream heat-exchangers in an existing network through path-analysis / Reisen van J.L.B. et.al. // Comput. Chem. Eng. 1995. Vol. 19, pp. 143-148.
8. Zhu X.X., Zhanfir M., Klemes J. Heat transfer enhancement for heat exchanger network retrofit // Heat Transf. Eng. 2000, Vol. 21, pp. 7-18.
9. Liu X.-W., Luo X., Ma H. Studies on the retrofit of heat exchanger network based on the hybrid genetic algorithm // Appl. Therm. Eng. 2013. Vol. 61, No. 2. pp. 785-790.
10. Bonhivers J.-C., Srinivasan B., Stuart P.R. New analysis method to reduce the industrial energy requirements by heat-exchanger network retrofit: Part 1 – Concepts // Appl. Ther. Eng. – 2017, vol. 119, No. 5, pp. 659–669.
11. New analysis method to reduce the industrial energy requirements by heat-exchanger network retrofit: Part 2 – Stepwise and graphical approach / Bonhivers J.-C. et.al. // Applied Thermal Engineering. – 2017, vol. 119, No. 5, pp. 670–686.
12. Heat Energy Integration of Light Hydrocarbons Separation Process / Khusanov A.E. et.al. // International Conference of Industrial Technology and Engineering. Shymkent, Kazakhstan. 2015. P. 149–155.
13. Total Site Integration of Light Hydrocarbons Separation Process / Ulyev L. et.al. // Chemical Engineering Transaction. 2016. Vol. 52. P. 1–6.
14. Concrete Mathematics. A Foundation for Computer Science. Second Edition / Graham R.L. et.al. //Amsterdam: Addison-Wesley. 1994.

#### References

1. Smith R. (2016). Chemical Process Design and Integration. 2<sup>nd</sup> Edition, Chichester: Wiley & Sons Ltd, 920 p.
2. Hohmann E.C. (1971). Optimum networks for heat exchange., PhD thesis. Los Angeles. Univ. of Southern Calif.
3. Linnhoff B, Flower J.R. (1978) Synthesis of heat exchanger networks – I. Systematic generation of energy optimal networks, AIChE J., 24, 633-642.
4. Flower J.R., Linnhoff B. (1978) Synthesis of heat exchanger networks – 2. Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality, AIChE J., 24, 642-654.
5. Linnhoff B., Townsend D.W., et al. (2007). A user guide on process integration for the efficient use of energy, IChemE, Rugby, 247.
6. Mizutani F.T., Pessoa F.L.P., Queiroz E.M., Hauan S., Grossmann I.E. (2003) Mathematical programming model for heat exchanger networks synthesis including detailed heat-exchanger designs. 2. Networks synthesis, Ind. Eng. Chem., 42, 4019-4027.
7. Reisen van J.L.B., Grievink J., Polley G.T., Verheijen P.J.T. (1995) The placement of 2-stream and multi-stream heat-exchangers in an existing network through path-analysis, Comput. Chem. Eng., 19, 143-148.
8. Zhu X.X., Zhanfir M., Klemes J. (2000) Heat transfer enhancement for heat exchanger network retrofit, Heat Transf. Eng., 21, 7-18.
9. Liu X.-W., Luo X., Ma H. (2013) Studies on the retrofit of heat exchanger network based on the hybrid genetic algorithm, Appl. Therm. Eng., 61(2), 785-790.
10. Bonhivers J.-C., Srinivasan B., Stuart P.R. (2017) New analysis method to reduce the industrial energy requirements by heat-exchanger network retrofit: Part 1 – Concepts, Appl. Ther. Eng., 119(5), 659–669.
11. Bonhivers J.-C., Alva-Argaez A., Srinivasan B., Stuart P.R. (2017) New analysis method to reduce the industrial energy requirements by heat-exchanger network retrofit: Part 2 – Stepwise and graphical approach, Applied Thermal Engineering, 19(5), 670–686.
12. Khusanov A.E., Ulyev L.M., Vasilyev M. V., Kaldybaeva B.M., Maatouk A. (2015) Heat Energy Integration of Light Hydrocarbons Separation Process, International Conference of Industrial Technology and Engineering. Shymkent, Kazakhstan, 149–155.
13. Ulyev L., Vasilyev M., Maatouk A., Duic N., Khusanov A. (2016) Total Site Integration of Light Hydrocarbons Separation Process, Chemical Engineering Transaction, 52, 1–6.
14. Graham R.L., Knuth D.E., Patashik O. (1994) Concrete Mathematics. A Foundation for Computer Science. Second Edition, Amsterdam: Addison-Wesley.