

А. М. МИРОНОВ, М. В. ІЛЬЧЕНКО, Ю. Г. ДОНЕЦЬ, Є. В. КОВАЛЬОВ

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ БЛОКУ ПОПЕРЕДНЬОГО ГІДРООЧИЩЕННЯ ПРЯМОГОННОЇ БЕНЗИНОВОЇ ФРАКЦІЇ НА СЕКЦІЇ КАТАЛІТИЧНОГО РИФОРМІНГУ

Відштовхуючись від інформації про низьку ефективність конверсії тепла на промислових підприємствах, здійснено спробу розрахунковим шляхом провести інтеграцію одного з блоків діючої нафтопереробної установки. Наведено результати дослідження, присвяченого обробці підсумків обстеження блоку попереднього гідроочищення прямогонної бензинової фракції на секції каталітичного риформінгу. Визначено передумови для скорочення обсягів використання зовнішніх енергоносіїв за рахунок максимізації рекуперації теплоти в рамках даної енерготехнологічної системи. На підставі детального вивчення інформації про роботу установки та відштовхуючись від особливостей розглянутої технологічної схеми виробництва наведено аналіз даних енергоспоживання і визначені перспективи для пінч-інтеграції. З метою впровадження теплової інтеграції теплообмінної мережі було виділено необхідну кількість технологічних потоків, які будуть брати участь у модернізації. Сформовано таблицю потокових даних з приведенням ключових теплофізичних характеристик кожного потоку, необхідних для здійснення заходів щодо розрахунку та проектування удосконаленої системи теплообмінних апаратів даної установки. Для існуючого процесу побудовано сіткову діаграму та складові криві, які здатні наочно і в числовому вигляді вказати доступну величину потужності рекуперації установки. Відповідно до базових принципів інтеграції теплообмінних мереж, який використовує метод пінч-аналізу для визначення оптимальної мінімальної різниці температур, розроблено нову сіткову діаграму та складові криві, а також розрахована потужність теплообмінного обладнання. Наведено модернізовану схему проекту реконструкції блоку попереднього гідроочищення прямогонної бензинової фракції, яка враховує нове розташування теплообмінних апаратів. Для визначення економічного ефекту пінч-інтеграції розглянутої схеми розраховано показники річної економії, річного приросту прибутків та терміну окупності капітальних витрат підприємства. На основі отриманих даних зроблено висновок про доцільність впровадження розробленого проекту до виробництва.

Ключові слова: пінч-аналіз, потокова таблиця, сіткова діаграма, утиліти, рекуперація тепла, каталітичний риформінг.

А. М. МИРОНОВ, М. В. ИЛЬЧЕНКО, Ю. Г. ДОНЕЦ, Е. В. КОВАЛЕВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛООБМЕНА БЛОКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ГИДРООЧИСТКИ ПРЯМОГОННОЙ БЕНЗИНОВОЙ ФРАКЦИИ НА СЕКЦИИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

Отталкиваясь от информации о низкой эффективности конверсии тепла на промышленных предприятиях, предпринята попытка расчётным путём произвести интеграцию одного из блоков действующей нефтеперерабатывающей установки. Приведены результаты исследования, посвящённого обработке итогов обследования блока предварительного гидроочистки прямогонного бензинового фракции на секции каталитического риформинга. Определены предпосылки для сокращения объёмов использования внешних энергоносителей за счёт максимизации рекуперации теплоты в рамках рассматриваемой энерготехнологической системы. На основании детального изучения информации о работе установки и отталкиваясь от особенностей рассмотренной технологической схемы производства приведён анализ данных энергопотребления и определены перспективы для пинч-интеграции. С целью внедрения тепловой интеграции теплообменной сети было выделено необходимое количество технологических потоков, которые будут принимать участие в модернизации. Сформировано таблицу потоковых данных с приведением ключевых теплофизических характеристик каждого потока, необходимых для осуществления мероприятий по расчёту и проектированию усовершенствованной системы теплообменных аппаратов рассматриваемой установки. Для существующего процесса построена сеточная диаграмма и составные кривые, которые способны наглядно и в числовом представлении указать доступную величину мощности рекуперации установки. В соответствии с базовыми принципами интеграции теплообменных сетей, использующего метод пинч-анализа для определения оптимальной минимальной разницы температур, разработано новую сеточную диаграмму и составные кривые, а также рассчитана мощность теплообменного оборудования. Приведено модернизированную схему проекта реконструкции блока предварительной гидроочистки прямогонной бензинового фракции, которая учитывает новое расположение теплообменных аппаратов. Для определения экономического эффекта пинч-интеграции рассмотренной схемы рассчитано показатели годовой экономии, годового прироста прибыли и срока окупаемости капитальных затрат предприятия. На основе полученных данных сделано заключение о целесообразности внедрения разработанного проекта в производство.

Ключевые слова: пинч-анализ, теплообмен, потоковая таблица, сеточная диаграмма, утилиты, рекуперация тепла.

A. M. MYRONOV, M. V. ILCHENKO, YU. G. DONETS, E. V. KOVALYOV ENERGY-EFFICIENT MODERNIZATION OF THE HEAT EXCHANGE SYSTEM FOR PRELIMINARY HYDRAULIC CLEANING OF STRAIGHT-RUN PETROL FRACTIONS BLOCK ON CATALYTICAL REFORMING SECTION

Based on information about the low efficiency of the heat conversion on industrial plants, an integration of the existing petroleum-refining plant block is attempted to calculate. Results of research devoted to processing the outcomes of preliminary hydraulic cleaning of straight-run gasoline fraction block on the catalytic reforming section survey are given. The preconditions for reducing the volume of the use of external energy sources due to the maximization of heat recovery in the framework of this energy-technological system are identified. Based on a detailed study of the information about the plant operation and starting from the features of considered technological production scheme, the data analysis of energy consumption is given and the prospects for a pinch-integration are identified. In order to implement the integration of thermal heat exchange network the required number of processing streams that will be taking part in modernization was allocated. The table of streaming data that bringing the core thermophysical properties of each stream, necessary for the implementation of measures for the calculation and design of an improved heat exchangers system of the installation is generated. For an existing process a grid diagram and compound curves, which are capable of visually and numerically represent the available unit's recovery duty value are built. In accordance with the basic principles of heat exchanger networks integration using pinch analysis method to determine the optimum minimum temperature difference, the new grid diagram and compound curves are designed, as well as the duty of heat exchange equipment is calculated. An upgraded scheme of reconstruction project for preliminary hydraulic cleaning of straight-run gasoline fraction block, which takes into account the new location of heat exchangers, is given. To determine the economic effect of pinch-integration for considered scheme the indicators of annual savings, the annual increase in profits and payback period of capital costs of the enterprise are calculated. Based on received results it was concluded that implementing the developed project into production is advisable.

Keywords: pinch analysis, heat exchange, flow chart, grid diagram, utilities, heat recovery.

© А.М. Миронов, М.В. Ильченко, Ю.Г. Донець, Є.В. Ковальов, 2018

Вступ. Корисні властивості нафти відомі людству здавна. Вона використовується для отримання палива та сировини для виробництва синтетичних волокон і пластмас. При цьому людство завжди прагнуло максимізувати отримувану вигоду від переробки вихідного палива. Одним з таких способів став каталітичний риформінг – процес, який дав початок високоякісним бензинам і ароматичним вуглеводнів. Каталітичний риформінг – це процес дегідрування (відщеплення молекули водню від органічних сполук) шестичленних фосфоровмісних нафтенів у присутності нікелю та деяких інших металів платинової групи за високої температури, що призводить до утворення ароматичних сполук. Таким чином, це процес, який дозволяє отримувати високооктановий продукт (риформат) з низькоякісної сировини – прямогонного бензину. Бензинова фракція використовується для отримання різних сортів моторного палива. Вона являє собою суміш різних вуглеводнів, в тому числі нерозгалужених і розгалужених алканів. Тому бензинову фракцію нерідко піддають термічному риформінгу, щоб перетворити нерозгалужені молекули в розгалужені [1].

До основних цілей риформінгу належать наступні: підвищення октанового числа бензинів задля вироблення неетилованого високооктанового бензину, отримання ароматичних вуглеводнів та водневмісного газу для процесів гідроочищення, гідрокрекінгу, ізомеризації тощо. Риформат може використовуватися у якості одного з важливих компонентів автомобільних та авіаційних бензинів або знову спрямовуватися на виділення ароматичних вуглеводнів. Газ, що при цьому утворюється, піддають розділенню. Водень, що вивільняється при цьому, частково використовують для поповнення втрат циркулюючого водневмісного газу та для гідроочищення вихідної сировини, але більшу частину водню з установки виводять. Такий водень значно дешевший за спеціально вироблений. Саме цим пояснюється його широке застосування в процесах, що споживають водень, особливо у гідроочистці нафтових дистилатів. Тим паче очевидно є стадійна технологічна та енергетична незбалансованість означених нафтопереробних процесів, а це означає необхідність пошуку шляхів підвищення ефективності споживання первинного палива.

Аналіз стану питання. Багато управлінських рішень, що стосуються реконструкції виробництва, в більшості своїй ґрунтуються на результатах економічного аналізу з використанням системи показників оцінки ефективності проекту, що відображають співвідношення результатів і витрат, а також методів оцінки для забезпечення порівнянності показників ефективності інвестицій. На сьогоднішній день галузеві спеціалісти визнають, що режим споживання енергії за наявних умов значно перевищує об'єктивні потреби виробництва у перерахунку на кількість кінцевого продукту. Таким чином, собівартість останнього суттєво зростає саме за рахунок нераціонального розподілу теплових потоків та недостатнього ступеню конверсії первинної енергії. При цьому одним з достатньо простих, відомих у світі та економічно оку-

пних заходів є інтеграція процесів. Вона дозволяє навіть у замкненій системі підприємства відшукати низьку шляхів для підвищення енергетичної ефективності виробництва. Серед відомих наукових методів інтеграції хіміко-технологічних процесів у країнах Західної Європи та Далекого Сходу, де нафтопереробка є основою національної економіки, найбільшу популярність здобув пінч-аналіз. Його розрахункова база є достатньо зрозумілою для інженерів означеної галузі, строки реалізації проектів дозволяють планувати діяльність підприємств на кілька років вперед, а невтручання у технологію робить можливим швидкий період технічного переобладнання.

Оскільки каталітичний риформінг належить до категорії найбільш енергоємних стадій нафтопереробки, будь-яку величину економії на ній можна вважати суттєвою. З урахуванням невеликого терміну окупності подібних проектів доцільність використання не викликає сумнівів [2, 3].

Опис технологічного блоку. Схема процесу блоку гідроочищення бензинової фракції у секції каталітичного риформінгу представлена на рис. 1. Сировина фракція 85–180 °С подається через фільтр очищення від механічних домішок на прийом сировинних насосів. З нагнітання насосів сировина двома потоками направляється в трійник змішання з водневмісним газом (ВВГ). ВВГ риформінгу і гідроочищення надходить до вузла змішування.

Суміш сировини та водневмісного газу (газо-сировинна суміш) проходить у міжтрубному просторі теплообмінників Т-1/1,2,3 і Т-2/1,2,3 паралельними потоками, де нагрівається зустрічним потоком газопродуктової суміші з реактора Р-1.

Після сировинних теплообмінників газо-сировинна суміш об'єднаним потоком надходить в піч гідроочищення П-1. Нагріта в печі П-1 до температури реакції газо-сировинна суміш надходить в реактор гідроочищення Р-201.

Газо-продуктова суміш гідроочищення двома паралельними потоками проходить трубний простір теплообмінників Т-1/3,2,1 і Т-2/3,2,1, де віддає тепло на нагрівання газо-сировинної суміші, потім охолоджується в трьох паралельно розташованих повітряних холодильниках Х-1/1а,б, 2а,б, 3а,б, у водяному холодильнику Х-2 і надходить в сепаратор гідроочищення С-1. У сепараторі відбувається поділ газо-продуктової суміші на ВВГ і нестабільний гідрогеніза́т.

Водневмісний газ з сепаратора С-1 надходить в сепаратор С-4, а потім на прийом компресорів ПК-3, ПК-4. Також до сепаратора С-4 поступає ВВГ від ПК-1, ПК-2. Надлишок водневмісного газу з викиду компресора направляється на установку ізомеризації, на щит скидання в лінію сухого газу, а також в лінію подачі водневмісного газу блоку риформінгу до вузла змішування гідроочищення, та до сепаратора С-5.

У сепараторі С-5 відбувається поділ водневмісного газу і рідини, що була віднесена. З сепаратора С-5 водневмісний газ направляється до вузла змішування й гідроочищення.

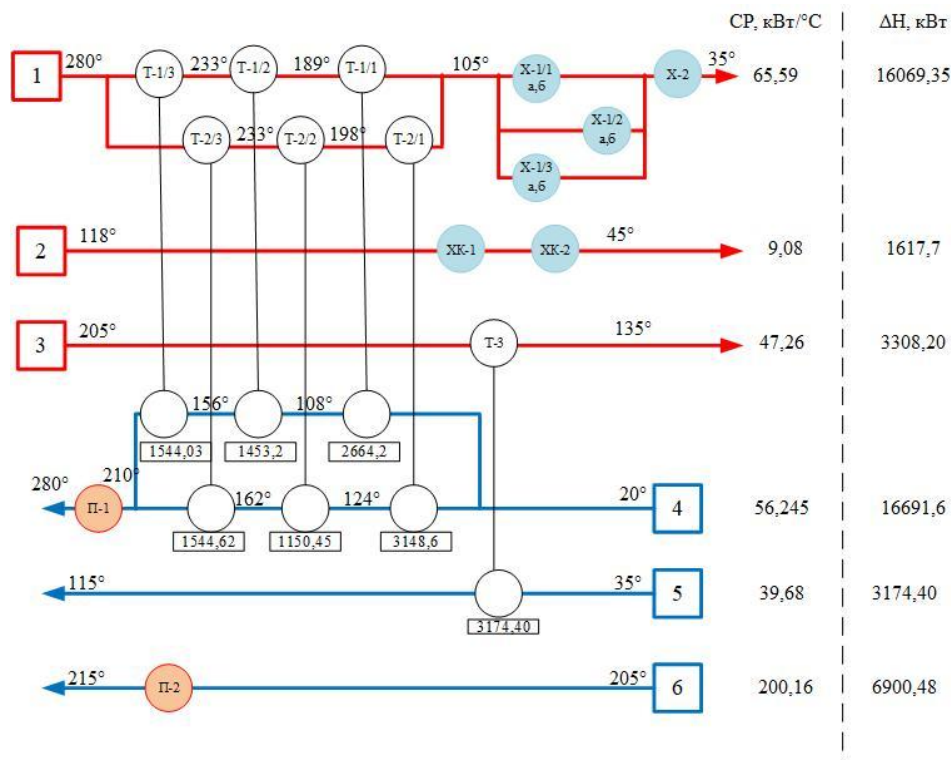


Рис. 2 – Сіткова діаграма існуючого процесу

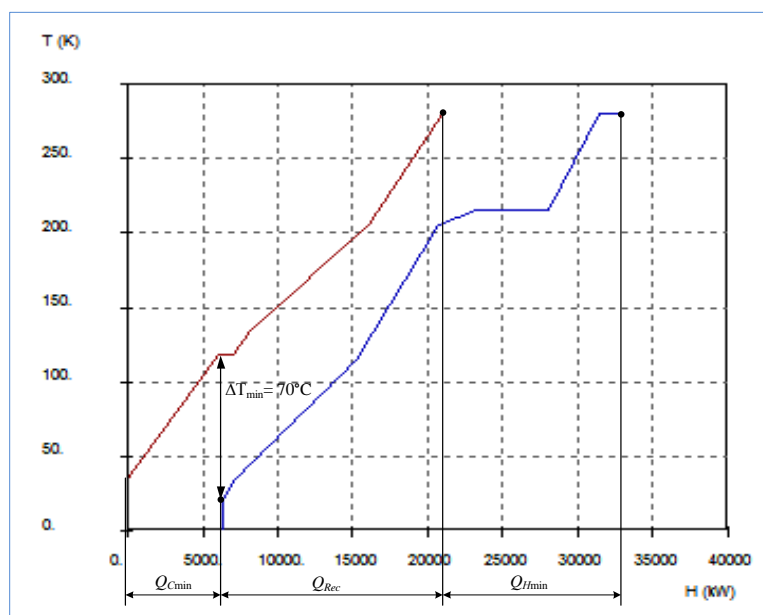


Рис. 3 – Складові криві процесу гідроочищення бензинової фракції для даних технологічних потоків

Використовуючи отримані дані технологічних потоків, будемо сіткову діаграму існуючого процесу (рис. 2). Для подальшого аналізу необхідно визначити величину потужності рекуперації у процесі, що існує. За вимірними температурами технологічних потоків і їх поточковими теплоємностями визначаємо потужність кожного з рекуперативних теплообмінників [5, 6].

Гарячі утиліти Q_{Hmin} в процесі становлять величину 12 087 кВт, а холодні утиліти Q_{Cmin} – 6 209 кВт. Після визначення та підсумовування теплових навантажень усіх теплообмінних апаратів отримано потужність рекуперації Q_{Rec} , що дорівнює 14 746 кВт.

Використовуючи технологічні дані з табл. 1, побудуємо на ентальпійно-температурній діаграмі гарячу і холодну складові криві обраної системи технологічних потоків, і далі розмістимо їх таким чином, щоб інтервал перекриття між ними становив величину 14 746 кВт (рис. 3). Різниця температур в області пінчу дорівнює 70 °С.

Визначення потенціалу енергозбереження. Для виконання проекту обраний метод пінч-аналізу, який показав свою ефективність в дослідженнях, що проводилися раніше в хімічній і нафтохімічній галузях промисловості [7, 8].

З урахуванням оптимального співвідношення енергетичних і капітальних витрат було прийнято $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Побудова складових кривих (рис. 4) для системи потоків технологічного процесу з урахуванням знайденого значення $\Delta T_{\min, \text{опт}}$ дозволяє визначити цільові енергетичні значення для проекту реконструкції. Споживання гарячих утиліт $Q_{H\min}$ процесом складе – 8 126 кВт, споживання холодних утиліт $Q_{C\min} = 2 355 \text{ кВт}$, потужність рекуперації теплообмінної мережі Q_{Rec} збільшилось до 18 639 кВт.

Відповідно до принципів пінч-аналізу [9–11], для отриманого значення $\Delta T_{\min, \text{опт}}$, спроектовані нові

сіткові діаграми і розрахована потужність теплообмінного обладнання (рис. 5).

Завдяки розрахунку пінчу і побудові діаграми складових кривих інтегрованого процесу, можна створити проект реконструкції установки та переобладнати схему блоку попереднього гідроочищення прямогонної бензинової фракції на секції каталітичного риформінгу рис. 6.

Характеристика нових теплообмінних апаратів для проекту реконструкції наведена у таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики нових теплообмінних апаратів в проекті реконструкції теплообмінної системи блоку атмосферної перегонки нафти

Тепл. ап-т	Гар. потік		Хол. потік		$\Delta T_{\min}, \text{ }^\circ\text{C}$	$Q, \text{ кВт}$	$S, \text{ м}^2$	Вартість, грн
	$T_{\text{ВХ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{ВИХ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{ВХ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{\text{ВИХ}}, \text{ }^\circ\text{C}$				
T-1	205	138	35	115	96,35	3 174,4	43,40	1 157 761
T-2	215	44	205	20	73,07	11 201,8	12,54	683 715
T-3	228	215	209	205	12,65	844,2	39,68	1 103 928
T-4	261	215	209	205	22,39	3 419,15	106,60	2 008 601
Всього						18 639,55	202,22	4 954 006

T (K)

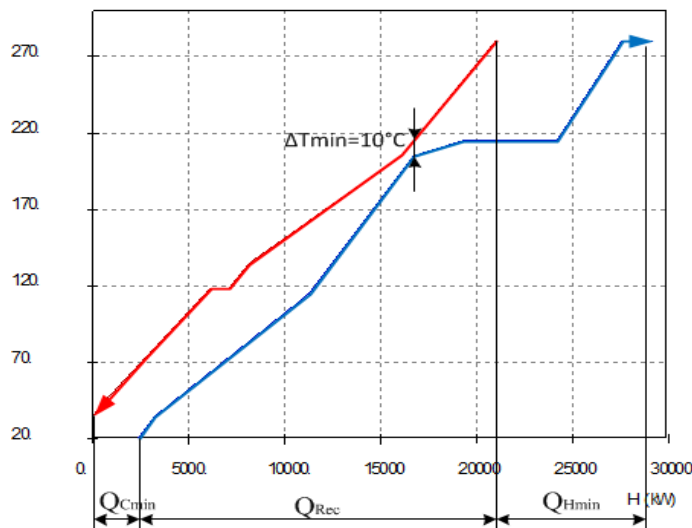


Рис. 4 – Складові криві для $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

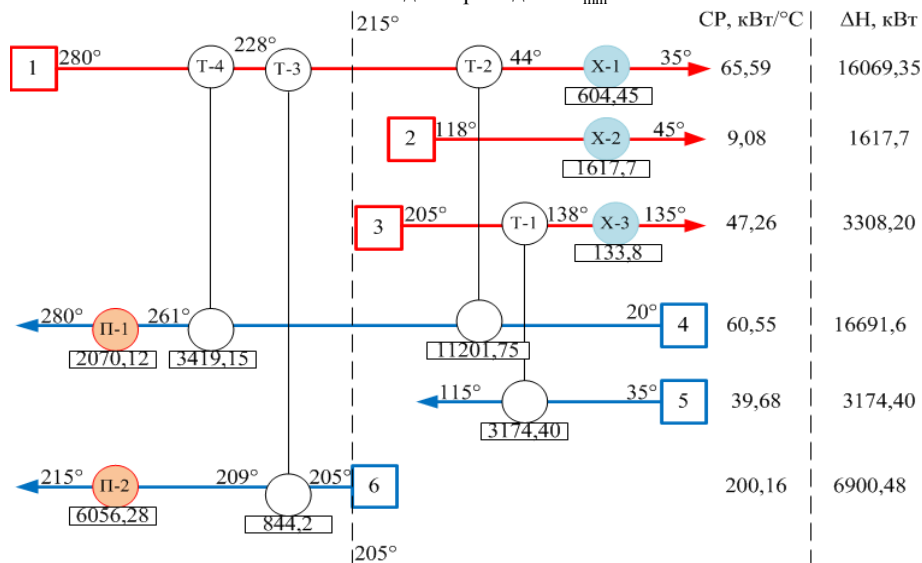


Рис. 5 – Сіткова діаграма для інтегрованого процесу

- Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. Харків: НТУ «ХПІ». 2014. № 16 (1059). С. 45–58.
- Ульєв Л. М., Яценко О. А., Ильченко М. В. Экстракция данных для пинч-анализа процессов выделения бензол-толуол-ксилольной фракции и гидродеалкилата в производстве бензола. Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. 2014. Вип. 45(3). С. 125–130.
 - Ульєв Л. М., Яценко О. А., Ильченко М. В. Энергозберігаючий потенціал процесів виділення бензол-толуол-ксилольної фракції та гідродекалкілата в процесі виробництва бензолу. Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип. : Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Харків : НТУ «ХПІ». 2014. № 49 (1091). С. 116–124.
 - Kemp I.C. Pinch analysis and process integration. Second Edition: A User Guide on Process Integration for Efficient Use of Energy. The Netherlands, Amsterdam: Elsevier, 2007.
 - Nordman R. New process integration methods for heat-saving retrofit projects in industrial systems. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Goteborg: Printed by Chalmers Reproservice, Sweden. 2005. p. 77.
 - Linnhoff B., Townsend D. W., et al. User guide on process integration for the efficient use of energy. Rugby, UK. 1994. p. 247.
 - Мешалкин В. П., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л., Ульєв Л. М., Мельникова Л. А., Ходченко С. М. Энергоэффективная реконструкция установки нефтепереработки на основе пинч-анализа с учётом внешних потерь // Теорет. основы хим. технологии. 2012. Т. 46, № 5. С. 491–500.
 - Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyanskiy L. L., Kapustenko P. A., Ulev L. M. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov / Harkov: HGPU, 2000. 457 s.
 - Ulyev L. M., Garev A. O., Myronov A. M. Pinch-analiz protsesu rektifikatsiyi sumishi furfurolo-voda. Visnik Nats. tehn. un-tu «HPI»: zб. nauk. pr. Temat. vip. : Innovatsiyi doslidzhennya u naukovih robotah studentiv. – Harkiv : NTU «HPI». 2013. no. 9 (983). pp. 90–97.
 - Ulyev L. M., Garev A. O., Myronov A. M. Zastosuvannya metodu tablichnogo algoritmu «Kaskad» ta robota z sitkovoyu diagramoyu. Visnik Nats. tehn. un-tu «HPI»: zб. nauk. pr. Temat. vip. : Innovatsiyi doslidzhennya u naukovih robotah studentiv. Harkiv : NTU «HPI». 2014. no. 16 (1059). pp. 45–58.
 - Ulyev L. M., Yatsenko O. A., Ilchenko M. V. Ekstraktsiya danyih dlya pinch-analiza protsessov vyideleniya benzol-toluol-ksilolnoy fraktsii i gidrodealkilata v proizvodstve benzola. Naukovi pratsi [Odeskoyi natsionalnoyi akademiyi harchovih tehnologiy]. 2014. Vip. 45(3). pp. 125–130.
 - Ulyev L. M., Yatsenko O. O., Ilchenko M. V. Energozberigayuchiye potentsial protsesiv vidilennya benzol-toluol-ksilolnoy fraktsiyi ta gidrodealkilata v protsesi virobnitstva benzolu. Visnik Nats. tehn. un-tu «HPI»: zб. nauk. pr. Temat. vip. : Innovatsiyi doslidzhennya u naukovih robotah studentiv. Harkiv : NTU «HPI». – 2014. – no. 49 (1091). – pp. 116-124.
 - Kemp I.C. Pinch analysis and process integration. Second Edition: A User Guide on Process Integration for Efficient Use of Energy. – The Netherlands, Amsterdam: Elsevier, 2007.
 - Nordman R. New process integration methods for heat-saving retrofit projects in industrial systems. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Goteborg: Printed by Chalmers Reproservice, Sweden. 2005. p. 77.
 - Linnhoff B., Townsend D.W., et al. User guide on process integration for the efficient use of energy. Rugby, UK. 1994. p. 247.
 - Meshalkin V. P., Tovazhnyanskiy L. L., Ulev L. M., Melnikovskaya L. A., Hodchenko S. M. Energoeffektivnaya rekonstruktsiya ustanovki neftepererabotki na osnove pinch-analiza s uchnotom vneshnih poter // Teoret. osnovyi him. tehnologii. 2012. T. 46, no.5. S. 491–500.

Bibliography (transliterated)

- Kataliticheskiy riforming. [elektronniy resurs] // Vikipediya. Rezhim dostupu: https://ru.wikipedia.org/wiki/Kataliticheskiy_riforming accessed 05.10.2018.
- Ukraine policy review. [elektronniy resurs] // International Energy Agency. Rezhim dostupu: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Ukraine_2012_free.pdf accessed 08.05.2015.
- Kataliticheskiy riforming [elektronniy resurs] // Neftegaz.RU. Rezhim dostupu: https://neftegaz.ru/tech_library/view/4412-Kataliticheskiy-riforming accessed 11.10.2018.

Надійшла (received) 19.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Миронов Антон Миколайович (Миронов Антон Николаевич, Myronov Anton Nikolaevich) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, тел.: (093) 406-30-35; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4250-6259>; e-mail: anton.myronov.mail@gmail.com.

Ільченко Марія Володимирівна (Ильченко Мария Владимировна, Ilchenko Mariya Vladimirovna) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, тел.: (066) 961-36-20; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1353-2108>; e-mail: mariia.ilchenko.mail@gmail.com.

Донець Юрій Георгійович (Донец Юрий Георгиевич, Donets Yuriy Georgievich) – старший викладач кафедри фізичного виховання, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, тел.: (050) 643-86-55; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0946-8705>; e-mail: barbudafish@ukr.net.

Ковальов Євген Володимирович (Ковалёв Евгений Владимирович, Kovalev Evgeniy Vladimirovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (067) 669-80-13, e-mail: evgenyukovalev.1.00@gmail.com.