

УДК 66.012.45:664.1.048

Т. Г. БАБАК, С. В. БАЛЮК, О. А. ГОЛУБКИНА, Е. Д. ПОНОМАРЕНКО**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ**

Проведено аналіз сучасних засобів енергозбереження в хімічній технології. Зроблено екстракцію даних ректифікаційної установки розділення суміші фурфурол-вода та виявлено недоліки в організації рекуперації енергії потоків системи. За допомогою технологій пінч-аналізу було проведено реконструкцію існуючої технологічної схеми: для економічно обґрунтованого значення ΔT_{\min} сплановано мережу теплообмінників, що забезпечують максимально можливу рекуперацію енергії в системі. Розраховано параметри теплообмінного обладнання.

Ключові слова: ректифікація, пінч-аналіз, складові криві, сіткова діаграма, пластинчаті теплообмінники.

Проведен анализ современных подходов к энергосбережению в химической технологии. Произведена экстракция данных ректификационной установки разделения смеси фурфурол-вода и выявлены недостатки в организации рекуперации энергии потоков системы. С помощью технологий пинч-анализа была проведена реконструкция существующей технологической схемы: для экономически обоснованного значения ΔT_{\min} спланирована сеть теплообменников, обеспечивающая максимально возможную рекуперацию энергии в системе. Рассчитаны параметры теплообменного оборудования.

Ключевые слова: ректификация, пинч-анализ, составные кривые, сеточная диаграмма, пластинчатые теплообменники.

The analysis of modern approaches to energy saving in chemical technology was carried out. Extraction of data of furfural-water mix separation rectifying installation was made and shortcomings of the organization of system streams energy recovery were revealed. By means of the pinch-analysis technologies the reconstruction of the existing technological scheme was carried out: for economically reasonable ΔT_{\min} value the network of heat exchangers providing the greatest possible energy recovery in system was designed. Parameters of the heat exchange equipment were calculated.

Keywords: rectification, pinch-analysis, composite curves, grid diagram, plate heat exchangers.

Вступлення.

Многотоннажные производства непрерывного цикла работы, характеризующиеся невысоким коэффициентом полезного действия, являются одними из основных потребителей топливно-энергетических ресурсов. В промышленности Украины это химические, нефтехимические, фармацевтические, пищевые производства, которые включают такие энергоёмкие процессы как, например, разделение методом ректификации многокомпонентных смесей [1].

Приоритетным направлением создания и модернизации химических технологий является энергосбережение, рациональное использование и экономия энергетических ресурсов. В большинстве химических производств расход энергии составляет основную часть затрат. Основными теплоносителями, обеспечивающими тепловой энергией низкотемпературные технологические процессы, являются пар и горячая вода. Главным способом снижения потребления тепловой энергии является модернизация действующих установок с использованием метода пинч-анализа, который позволяет интенсифицировать процессы теплообмена. Научной основой для решения задач энергосбережения является термодинамический анализ, в рамках которого удается реализовать различные способы энергосбережения в химической технологии.

Основные концепции современных подходов к энергосбережению.

Современная методология энергосбережения, основана на системном анализе, который позволяет

сформулировать основные стратегические принципы и определить тактические приемы реализации направлений оптимизации, являющихся основой устойчивого развития сложных химических технологий.

Системные подходы к энергосбережению на сегодня четко сформулированы [2]. Определены три основных тактических глобальных принципа:

- использование рециркуляции потоков энергии и вторичного сырья техногенного происхождения;
- работа по обеспечению энергосбережения должна выполняться на всех трех основных стадиях: производства, транспортировки и преобразования, потребления энергии;
- наиболее целесообразно использовать системные методы энергосбережения на стадии потребления энергии, в особенности для энергоёмких отраслей производства (прежде всего, химия и металлургия).

Некоторые из этих принципов имеют общетехнический характер (ресурсосбережение, рекуперация, утилизация низкопотенциальных энергосбросов) и имеют особое значение для перерабатывающих отраслей промышленности, в частности для химической, металлургической, пищевой. К примеру, реализуется концепция обеспечения энергетической малоотходности не столько за счет утилизации энергетических отходов или ресурсосбережения, сколько за счет повышения селективности, т.е. выхода высокопотенциального целевого продукта или отходов. В конце концов, эта концепция сводится к стремлению не бороться с энергетическими низко потенциальными отходами, а

вести процесс так, чтобы они образовывались в минимальном количестве.

В качестве основного аппаратного оформления для различных процессов химической технологии применяются пластинчатые теплообменники различной конструкции. В процессах ректификации успешно используются пластинчатые теплообменники перекрестного тока при высоких температурах, для низко потенциальной утилизации – разборные и паяные аппараты. Одним из наиболее эффективных приложений использования специального разборного пластинчатого теплообменника является использование аппаратов марки TS производства фирмы «Альфа Лаваль» [3], в качестве дефлегматора ректификационной колонны. Главной особенностью конструкции этих аппаратов является укороченная пластина, показанная на рис. 1, использование которой позволяет при конденсации флегмы не допускать переохлаждения и жестко зафиксировать выходящую температуру конденсата.

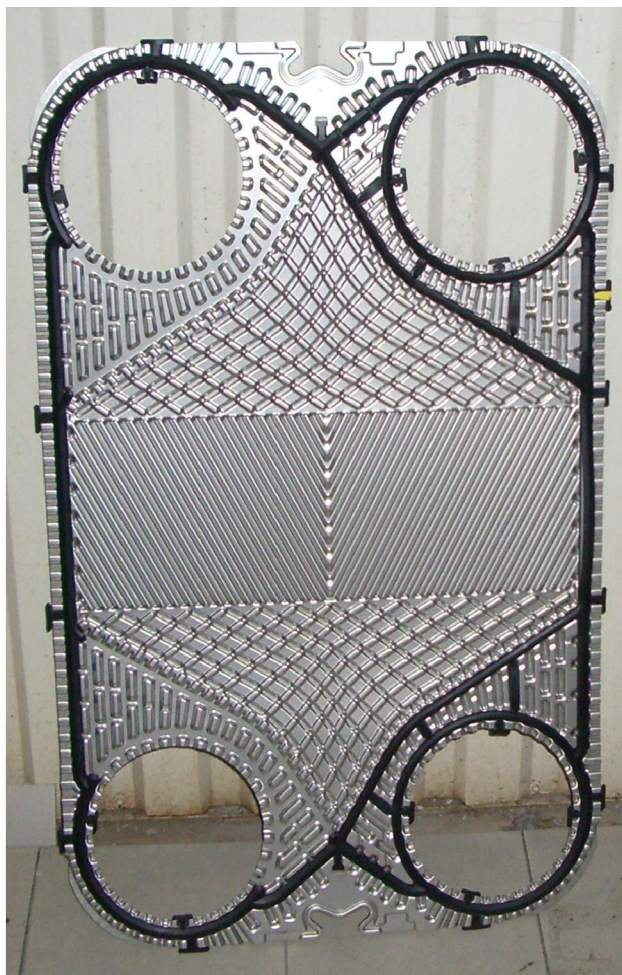


Рис. 1. Пластина разборного пластинчатого теплообменника типа TS20

Целью работы является оптимизация рекуперации энергии тепловых потоков ректификационной установки разделения частично растворимой азеотропной смеси фурфурол-вода на основе принципов пинч-анализа и подбор для инсталляции современного пластинчатого теплообменного оборудования.

Обследование существующей ректификационной установки и анализ эффективности рекуперации энергии.

Исходная схема ректификации частично растворимой смеси фурфурол-вода имеет производительность 7200 кг/ч по исходной смеси с концентрацией 7 мас % фурфурола. Пары азеотропа 35 мас % фурфурола поступают в дефлегматор, конденсируются и разделяются на два потока G' и G'' . Поток G' охлаждается до 30°C и подается в отстойник. Легкая фракция из отстойника (8,8 мас % фурфурола [4]) соединяется с потоком G'' , догревается до температуры кипения азеотропа 98°C [5] и направляется в виде флегмы в верхнюю часть колонны. Тяжелая фракция из отстойника (94,2 мас % фурфурола [4]) отбирается в качестве готового продукта. Кубовый остаток представляет собой практически чистую воду.

Кроме испарителя, конденсатора, нагревателей и холодильника в системе имеется рекуперативный теплообменник, который полностью утилизирует избыток тепла кубового остатка. Все теплообменное оборудование представляет собой трубчатые теплообменные аппараты. Схема ректификационной установки представлена на рис. 2.

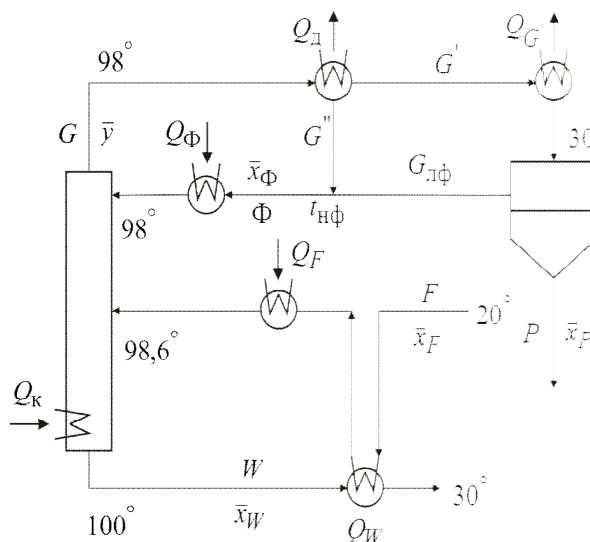


Рис. 2. Энергофункциональная схема ректификационной установки для разделения смеси фурфурол-вода

После проведения обследования объекта реконструкции, выбора тепловых потоков для их дальнейшей интеграции, экстракции необходимых данных и расчетов материальных и тепловых

балансов [6], все требуемые для проектирования данные сведены в таблицу 1.

На рис. 3 представлены составные кривые, построенные для существующей схемы и которые расположены на температурно-энтальпийной диаграмме таким образом, чтобы область их перекрытия по оси энтальпии ΔH была равна в

системе [7]. Как видно из рис. 3, мощность рекуперации для существующей схемы составляет 541,8 кВт, которые передаются исходной смеси от потока кубового остатка. Такое расположение составных кривых дает точку пинча с температурой горячих потоков 98°C, а холодных – 79,7°C, то есть $\Delta T_{\min} = 18,3$ °C.

Таблица 1. Данные потоков для интеграции

№	Название потока	Тип потока	G , кг/с	T_s , °C	T_i , °C	c , кДж/(кг·°C)	r , кДж/кг	ΔH , кВт	CP , кВт/°C
1	G'	гор	0,483	98	30	3,298	–	108,4	1,593
2	W	гор	1,852	100	30	4,18	–	541,8	7,739
3	G	гор	0,773	98	98	–	1640	1268,4	∞
4	Куб	хол		100	100	–	2262	1343	∞
5	F'	хол	2	20	98,6	4,004	–	629,4	8,008
6	Φ	хол	0,625	58,5	98	3,652		90,1	2,283

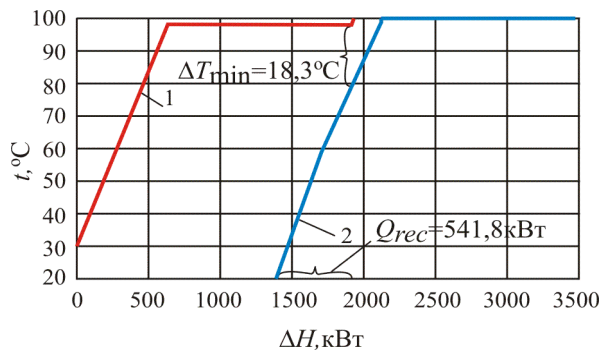


Рис. 3. Составные кривые процесса до реконструкции: 1 – горячих потоков, 2 – холодных потоков

Потребление горячих утилит (пара) в системе составляет 1520,7 кВт, холодных (охлаждающая вода) – 1376,7,2 кВт.

Чтобы проанализировать эффективность организации теплообмена в системе, была построена сеточная диаграмма [7], на которой размещено существующее теплообменное оборудование. Сеточная диаграмма представлена на рис. 4.

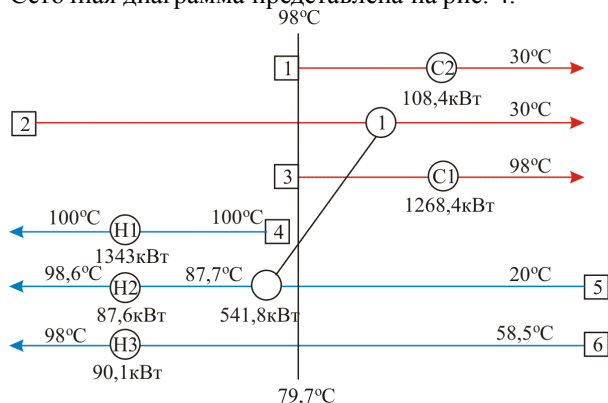


Рис. 4. Сеточная диаграмма процесса до реконструкции

Анализ сеточной диаграммы показывает, что в области ниже пинча энергия горячих потоков не рекуперирована. Кроме этого, рекуперативный теплообменник осуществляет перенос тепла через пинч, что противоречит принципам пинч-технологии [7]. Результатом является заниженное, по сравнению с теоретически возможным, значение температурного напора, а значит завышенная площадь поверхности теплообмена.

Для реконструкции существующей системы, в соответствии с принципами пинч-анализа [7], было выбрано экономически обоснованное значение $\Delta T_{\min} = 5$ °C, представляющее компромисс между капитальными и эксплуатационными затратами.

На рис 5 изображены составные кривые горячих и холодных потоков, размещённые на температурно-энтальпийной диаграмме таким образом, чтобы минимальное расстояние между ними по оси температур равнялось $\Delta T_{\min} = 5$ °C.

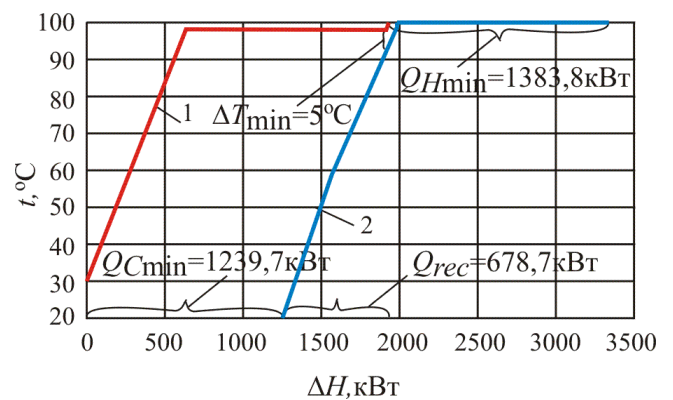


Рис. 5. Составные кривые процесса для $\Delta T_{\min} = 5$ °C: 1 – горячих потоков, 2 – холодных потоков

В этом случае температура пинча горячих потоков равна 98°C, холодных потоков – 93°C.

Целевые значения потребления горячих и холодных утилит составляют соответственно 1383,8 кВт и 1239,7 кВт. Максимально возможная мощность рекуперации – 678,7 кВт.

На рис. 6 представлена сеточная диаграмма, построенная при $\Delta T_{\min} = 5^\circ\text{C}$ в соответствии с CP-правилом ($CP_{out} \geq CP_{in}$) и N-правилом ($N_{out} \geq N_{in}$), где были размещены теплообменные устройства.

Выше пинча находится один горячий поток – №2, который, в соответствии с CP-правилом может отдать тепло потоку №5. Поэтому устанавливается рекуперативный теплообменник РТ1 с нагрузкой 15,5 кВт. Чтобы довести потоки №5 и №6 до целевой температуры, установлены паровые подогреватели Н2 и Н3. Поток №4 не имеет партнеров для теплообмена, поэтому оставлен существующий испаритель Н1.

В области ниже пинча находятся три горячих и два холодных потока, что формально обеспечивает выполнение N-правила. Однако было принято решение использовать поток №3 после того, как будут исчерпаны другие возможности для рекуперации. Это связано с тем, что данный поток – пар с верха колонны, который конденсируется и по технологии нельзя допускать переохлаждения конденсата. Поэтому поток №5 в соответствии с CP-правилом был расщеплен на два с потоковыми теплоемкостями 1,484 кВт/°C и 6,523 кВт/°C. Рекуперативный теплообменник РТ3 обеспечивает целевую температуру потока №1, а РТ4 и последовательно установленный холодильник С2 – целевую температуру потока №2. Для достижения температуры пинча на потоке №6 установлен конденсатор РТ2 с нагрузкой 78,8 кВт. Это устройство установлено на потоке №3 параллельно с существующим конденсатором С1.

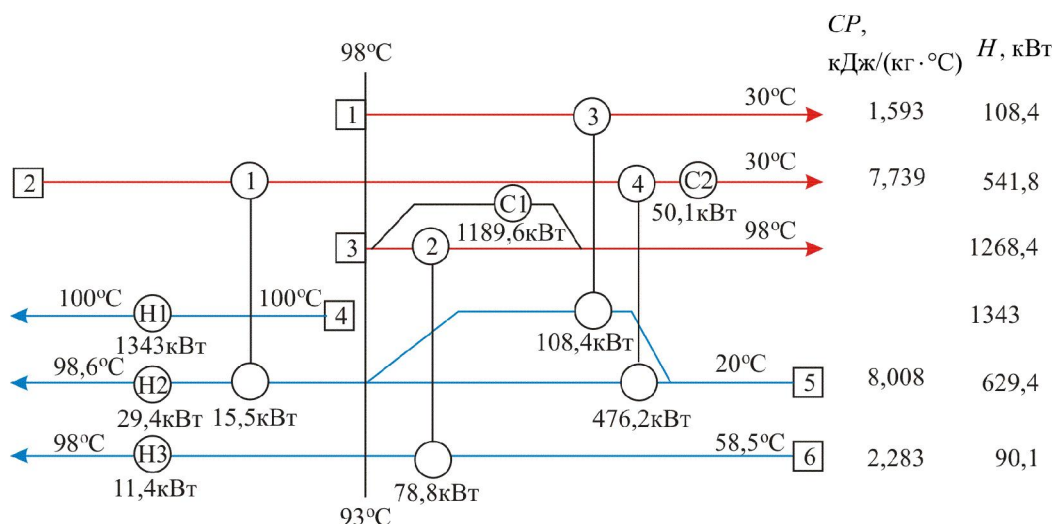


Рис. 6. Сеточная диаграмма процесса после реконструкции

Для установки было подобраны разборные пластинчатые теплообменники [8] фирмы Alfa Laval. Их краткие характеристики указаны в таблице 2.

Следует отметить, что на позиции РТ2 рекомендован к установке пластинчатый дефлегматор ТS6М.

Таблица 2. Выбранное теплообменное оборудование

Позиция	Тип пластины	Число пластин	Поверхность теплопередачи (м ²)
РТ1	М6	10	1,5
РТ2	TS6M	28	2,397
РТ3	М6	29	4,35
РТ4	М6	67	10,05
Н2	М3	10	0,32
Н3	М3	18	0,576
С2	М3	25	0,8

Выводы.

Оптимизация рекуперации тепловой энергии дала следующие результаты: снижение потребляемой мощности горячих утилит с 1520,7 кВт до 1383,8 кВт, мощности холодных утилит – с 1376,7 кВт до 1239,7 кВт, что обеспечивается дополнительной

рекуперацией 137,1 кВт за счет реконструкции существующей схемы.

Срок окупаемости капитальных затрат за счет чистой прибыли составляет 7,5 месяца.

Список литературы:

1. Гололобова О.М., Ларка М.П. Аналіз рівня використання потенціалу енергозбереження в промисловості України / О.М. Гололобова, М.П. Ларка // Вестник НТУ «ХПИ». – 2015. – №25 (1154) – С. 127–134.
2. Зеркалов Д.В. Энергозбереження в Україні. Монографія. – К.: Основа, 2012. – 582 с.
3. Каталог оборудования «Альфа Лаваль». [Електронний ресурс]. – http://planetaklimata.com.ua/instr/Alfa_Laval_cata_log_2013_Rus.pdf
4. Коррозия и защита химической аппаратуры, т. 9. Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность / Под ред. А.М. Сухотина, А.В. Шрейдера, А.В. Арчакова. – М.: Химия, 1974. – 576 с.
5. Гурвич В.А. Избирательные растворители в переработке нефти (справочная книга) / В.А. Гурвич, Н.П. Сосновский. – М., Л.: ГОСТОПТЕХИЗАТ, 1953. – 321 с.
6. Товажнянський Л.Л. Процеси та апарати хімічної технології: Підручник у двох книгах. Кн. 2 / Л.Л. Товажнянський, А.П. Готлінська, В.О. Леценко [та ін.] – Харків: НТУ «ХПИ», 2007. – 538 с.
7. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов: Библиотека журнала ИТЭ / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянський, [и др.]. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – 458 с.
8. Товажнянський Л.Л. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении: Монографія / Л.Л. Товажнянський, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин [и др.] – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 448 с.

- [Analysis of the use of energy efficiency potential in industry of Ukraine]/ О.М. Hololobova, М.Р. Larka //Vestnyk NTU «HPI». – 2015. – No. 25 (1154) – P. 127–134.
2. Zerkalov D.V. Enerhozberezhennja v Ukrajinі [Energy efficiency in Ukraine]. Monohrafija. – K.: Osнова, 2012. – 582 p.
 3. Katalog oborudovanija «Al'fa Laval». [Elektronnij resurs]. – http://planetaklimata.com.ua/instr/Alfa_Laval_cata_log_2013_Rus.pdf
 4. Korrozija i zashhita himicheskoj apparatury [Corrosion and protection of chemical equipment], t. 9. Neftepereabatyvajušhaja i neftehimicheskaja promyšlennost' / Pod red. A.M. Suhotina, A.V. Shrejdera, A.V. Archakova. – M.: Himija, 1974. – 576 p.
 5. Gurvich V.A. Izbiratel'nye rastvoriteli v pererabotke nefti [Selective solvents in oil refining](spravochnaja kniga) / V.A. Gurvich, N.P. Sosnovskij. – M., L.: GOSTOPTENIZAT, 1953. – 321 p.
 6. Tovazhnyans'kyj L. L. Protsezy ta aparaty khimichnoyi tekhnolohiyi [Processes and devices of chemical technology]: Pidručnyk u dvokh knihakh. Kn. 2 / L. L. Tovazhnyans'kyj, A. P. Hotlins'ka, V. O. Leshchenko [ta in.] – Kharkiv: NTU «KhPI», 2007. – 538 p.
 7. Smit R. Osnovy integracii teplovyh processov [Basics integration of thermal processes]: Biblioteka zhurnala ITJe / R. Smit, J. Klemesh, L.L. Tovazhnjanskij, [i dr.]. – Har'kov.: NTU «HPI», 2000. – 458 p.
 8. Tovazhnjanskij L.L. Plastinchatye teploobmenniki v teplosnabzhenii: Monografija / L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, G.L. Havin [i dr.] – Har'kov: NTU «HPI», 2007. – 448 p.

Bibliography (transliterated):

Поступила (received) 23.05.2016

1. Hololobova O.M., Larka M.P. Analiz rivnja vykorystannja potencialu enerhozberezhennja v promyslovosti Ukrajinny

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимізація енергоспоживання ректифікаційної установки на базі інтеграції теплових потоків / Т. Г. Бабак, С. О. Балюк, О. О. Голубкіна, Є. Д. Пономаренко // Вісник НТУ «ХПИ». Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х : НТУ «ХПИ», 2016. – № 29 (1201). – С. 43 – 48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2220-4784.

Оптимизация энергопотребления ректификационной установки на основе интеграции тепловых потоков / Т. Г. Бабак, С. О. Балюк, О. А. Голубкіна, Е. Д. Пономаренко // Вісник НТУ «ХПИ». Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х : НТУ «ХПИ», 2016. – № 29 (1201). – С. 43 – 48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2220-4784.

Optimization of rectifying plant energy consumption by means of thermal streams integration / T. G. Babak, S. O. Balyuk, O. A. Holubkina, E. D. Ponomarenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovation researches in students' scientific work. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2016. – № 29 (1201). – С. 43 – 48. – Bibliogr.: 8 titles. – ISSN 2220-4784.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бабак Тетяна Геннадіївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Інтегрованих технологій, процесів і апаратів; тел.: +3800505669654; e-mail: : tgbabak@gmail.com.

Бабак Татяна Геннадиевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Интегрированных технологий, процессов и аппаратов; тел.: +380505669654; e-mail: tgbabak@gmail.com.

Babak Tatyana Gennadyevna – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», an assistant professor of integrated technologies, processes and devices; tel: +380505669654; e-mail: : tgbabak@gmail.com.

Балюк Світлана Олегівна – бакалавр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: +380956405616; e-mail: : svetlanka_pozutiv4ik@mail.ru.

Балюк Светлана Олеговна – бакалавр, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: +380956405616; e-mail: svetlanka_pozutiv4ik@mail.ru.

Balyuk Svetlana Olegovna – Bachelor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: +380956405616; e-mail: svetlanka_pozutiv4ik@mail.ru.

Голубкіна Ольга Олександрівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри Інтегрованих технологій, процесів і апаратів; тел.: +380977133599; e-mail: oalgolubkina@gmail.com.

Голубкина Ольга Александровна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры Интегрированных технологий, процессов и аппаратов; тел.: +380977133599; e-mail: oalgolubkina@gmail.com.

Holubkina Olga Aleksandrovna – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», a senior lecturer in integrated technologies, processes and devices; tel.: +380977133599; e-mail: oalgolubkina@gmail.com

Пономаренко Євгенія Дмитрівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Інтегрованих технологій, процесів і апаратів; тел.: +380681185532; e-mail: yevgeniya.ponomarenko@gmail.com.

Пономаренко Евгения Дмитриевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Интегрированных технологий, процессов и аппаратов; тел.: +380681185532; e-mail: yevgeniya.ponomarenko@gmail.com.

Ponomarenko Evgeniya Dmitrievna – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», an assistant professor of integrated technologies, processes and devices; tel.: +380681185532; e-mail: yevgeniya.ponomarenko@gmail.com.