

*Л.М. УЛЬЄВ*, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХП»;

*О.О. ЯЦЕНКО*, аспірант, НТУ «ХП»;

*М.В. ІЛЬЧЕНКО*, аспірант, НТУ «ХП»

## **ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ ПОТЕНЦІАЛ ПРОЦЕСІВ ВИДІЛЕННЯ БЕНЗОЛ-ТОЛУОЛ-КСИЛОЛЬНОЇ ФРАКЦІЇ ТА ГІДРОДЕАЛКІЛАТА В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА БЕНЗОЛУ**

Актуальність теми обумовлена тим, що зростання цін на енергію спонукає економніше використовувати енергоресурси, тому що рівень енерговитрат в значній мірі впливає на собівартість готової продукції. В роботі були виявлені недоліки існуючої теплообмінної системи, які призводять до збільшення енергоспоживання, розглянуто можливість поліпшення теплової інтеграції процесів виділення бензол-толуол-ксилольної фракції і гідродекантату в процесі виробництва бензолу. Визначено оптимальне значення мінімального температурного напору на теплообмінному обладнанні. У результаті впровадження проекту реконструкції споживання теплової енергії і охолоджуючої води може скоротитися на 10% і 30% відповідно.

**Ключові слова:** бензол, пінч-аналіз, сіткова діаграма, складові криві, утиліти.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науково-практичними завданнями.** В даний час енергетична та екологічна ситуація в Україні критична, насамперед внаслідок того, що забезпечення державою власними енергоресурсами складає приблизно 37%, а викиди шкідливих речовин 60 млн т на рік [1].

Промислові підприємства різноманітних галузей промисловості (хімічної, нафтохімічної, мінеральних добрив, металургії чорних та кольорових металів, харчової та ін.) являються найбільшими світовими споживачами енергетичних ресурсів у вигляді сировини [2]. Вони споживають 45–50% енергоресурсів держави і являються основними джерелами шкідливих речовин і парникових газів. Питоме енергоспоживання в промисловості України в 2–3 рази вище, ніж в економічно розвинених країнах, що свідчить про наявність великого енергозберігаючого потенціалу, а також про можливість зменшення техногенної загрози на навколишнє середовище. При ефективному проведенні енергозберігаючої технічної та економічної політики в масштабі держави темпи зниження

енерговитрат складають 1–1,5 % на рік, що забезпечує її двократному зниженню на протязі 50–70 років. Однак, незважаючи на таке повільне просування до енергоефективності, вплив від нього надмірно великий. Наприклад, 28,5 % світових ресурсів економиться за рахунок функціонування енергозберігаючих технологій, що еквівалентно світовій добичі нафти [3]. Такі можливості неможна упускати Україні, котра не забезпечена власними паливними ресурсами. Тому в рамках структурної перебудови економіки в Україні важливішою її частиною стало здійснення державної політики енергозбереження. Зниження питомого енергоспоживання можна досягти шляхом модернізації окремих систем виробництва, установок і заводів в цілому, а також вдосконаленням окремих виробничих операцій. Літературні дані, опубліковані в різних джерелах [4, 5], говорять, що застосування пінч-аналізу в середньому призводить до зниження вартості споживаної енергії (30–50) % і значно знижуються капітальні витрати при створенні нових підприємств. Інтегровані технології і пінч-метод засновані на здатності чіткого визначення можливостей енергозбереження і дозволяють мінімізувати як витрати теплової енергії (експлуатаційні витрати), так і капітальні вкладення.

**Визначення енергозберігаючого потенціалу процесів виділення бензол-толуол-ксилольної фракції і гідродеалкілата в процесі виробництва бензолу.** Для цього побудуємо популяцію гарячих і холодних технологічних потоків на сіткову діаграму згідно з температурними інтервалами в яких розташовані досліджувані потоки. Опис технологічної схеми та таблиця поточкових даних представлена в роботі [6]. Сіткова діаграма існуючої сітки теплообміну показана на рис. 1. В цілому, в розпорядженні є 9 гарячих технологічних потоків і 11 холодних потоків з визначеними поточковими даними. Для подальшого аналізу необхідно визначити величину потужності рекуперації у процесі, що існує [7]. За вимірними температурами технологічних потоків та їх поточковими теплоємностями визначаємо навантаження кожного з рекуперативних теплообмінників [8, 9]. Після визначення та підсумування теплових навантажень усіх теплообмінних апаратів отримано потужність рекуперації 2 930,90 кВт .

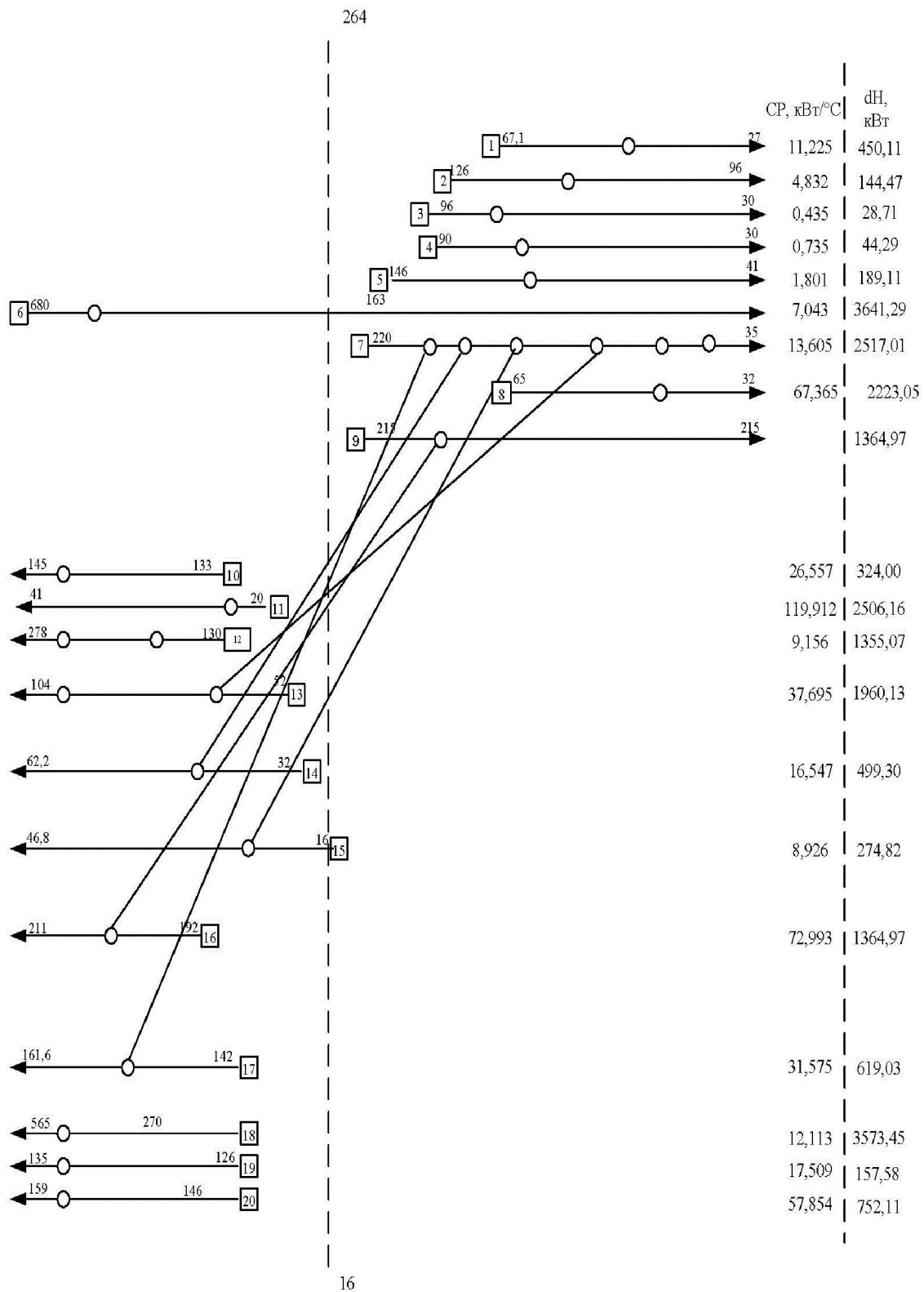


Рис. 1. Сіткова діаграма для процесу, що існує

Відомі значення цільової температури, температури постачання й величини теплових навантажень на потоки, дозволяють представити їх на температурно-ентальпійній діаграмі. Використавши дані сіткової діаграми (рис. 1), будемо на ентальпійно-температурній діаграмі гарячу і холодну складові криві обраної системи технологічних потоків (рис. 2). Розташування кривих повинне бути таким, щоб інтервал перекриття між ними складав розраховану величину рекуперації потужності ( $Q_{rec}$ ).

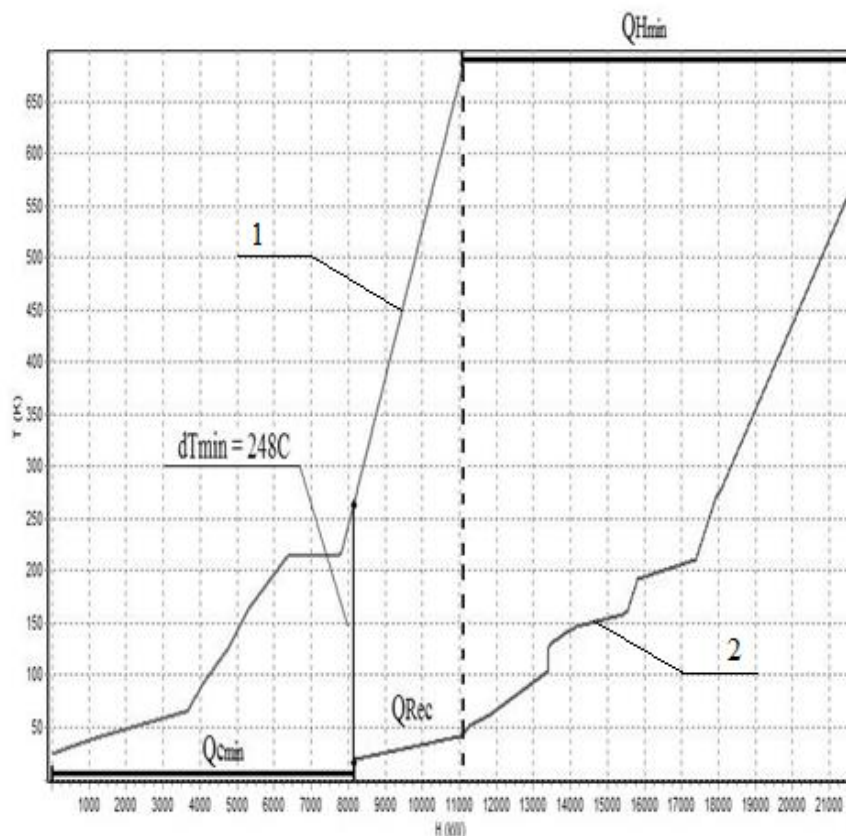


Рис. 2. Складові криві існуючого процесу: 1 – гаряча складова крива; 2 – холодна складова крива;  $Q_{cmin}$ ,  $Q_{hmin}$  – споживання холодних та гарячих утиліт;  $Q_{rec}$  – потужність рекуперації;  $\Delta T_{min}$  – мінімальна різниця температур

Складові криві містять великий об'єм інформації про систему технологічних потоків, утилітну систему і ефективність використання теплової енергії в процесі [7]. Проекція гарячої складової кривої на ентальпійну вісь (абсцис) показує значення теплової потужності, яку можливо відвести від системи гарячих потоків і використовувати для підігріву холодних технологічних потоків. Ця величина складає значення  $Q_{cmin} = 8143,66$  кВт. Аналогічно для холодної складової кривої потужність скла-

дає  $Q_{hmin} = 10\,455,72$  кВт. При впровадженні проекту підприємство несе разові (капітальні) витрати, пов'язані з розробкою проекту. Використовуючи ціни на теплообмінне устаткування можемо ще до виконання проекту реконструкції оцінити необхідні капвкладення і термін їх окупності. Отже капітальну вартість одного теплообмінного апарату можна визначити виразом:

$$\text{Кап.вартість} = A_T + B_T(S)^c, \quad (1)$$

де  $A_T = 5000$  дол. США – вартість установки одного теплообмінного апарату;  $B_T$  – коефіцієнт, еквівалентний вартості  $1 \text{ м}^2$  площі поверхні теплообміну, для кожухотрубчатих теплообмінних апаратів  $B_T = 500$ ;  $S$  – площа поверхні теплообміну теплообмінного апарату;  $c$  – коефіцієнт, що відображає нелінійну залежність вартості теплообмінника від величини його поверхні теплообміну. Для кожухотрубчатих теплообмінників  $c = 0.87$ .

За допомогою програмного забезпечення «Pinch» [10] будемо вартісні криві (рис. 3).

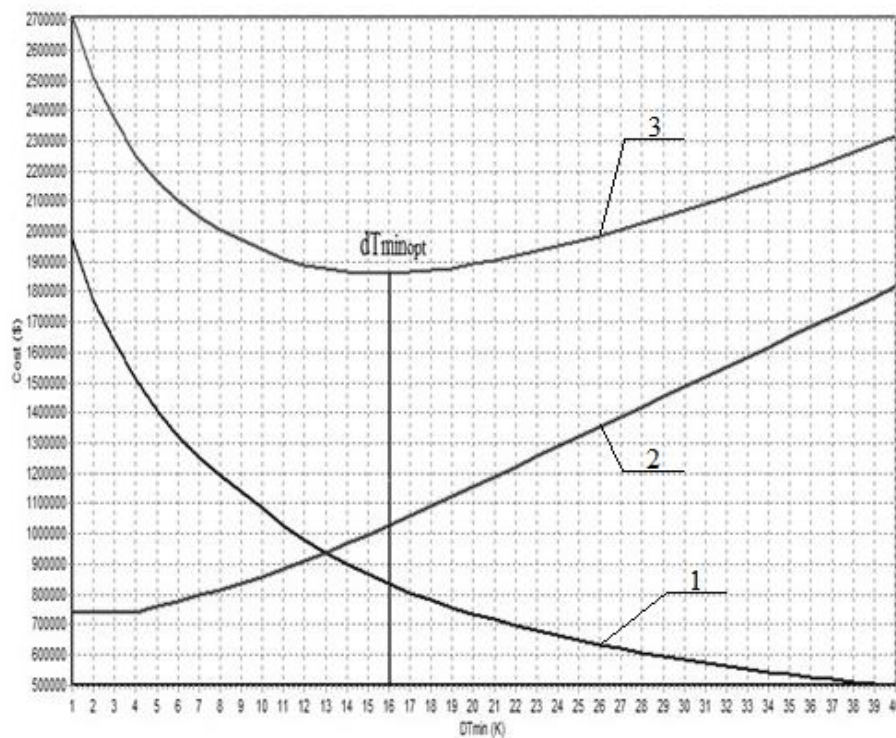


Рис. 3. Вартісні криві: 1 – вартість капітальних вкладень; 2 – вартість зовнішніх енергоносіїв; 3 – загальна вартість проекту;  $\Delta T_{min,opt} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$

Проаналізувавши отримані дані, обираємо нове значення мінімальної різниці температур  $\Delta T_{min}=16^{\circ}\text{C}$ . Будуємо складові криві для нової оптимальної різниці температур (рис. 4).

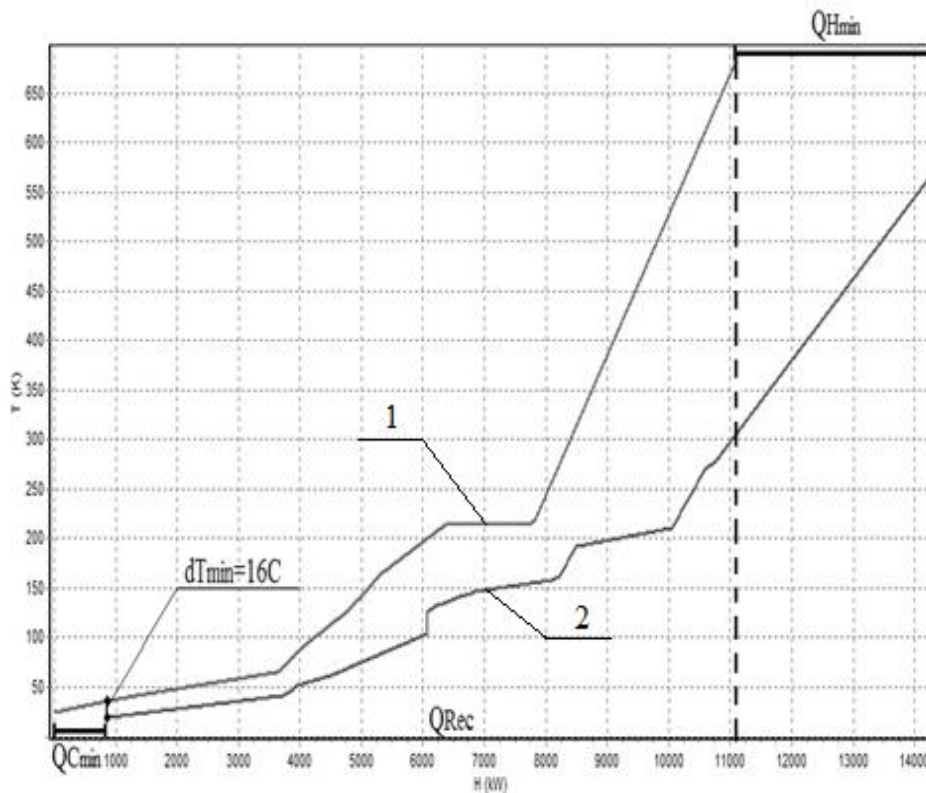


Рис. 4. Складові криві для  $\Delta T_{min}=16^{\circ}\text{C}$ : 1 – складова крива гарячих потоків; 2 – складова крива холодних потоків;  $Q_{Cmin}$ ,  $Q_{Hmin}$  – споживання холодних та гарячих утиліт;  $Q_{Rec}$  – потужність рекуперації;  $\Delta T_{min}$  – мінімальна різниця температур

Проекція гарячої складової кривої на ентальпійну вісь показує значення теплової потужності, яку можливо відвести від системи гарячих потоків і використовувати для підігріву холодних технологічних потоків. Ця величина складає значення 827,06 кВт. Аналогічно для холодної складової кривої потужність складає 3 139,39 кВт.

Для визначення економічного ефекту пінч-інтеграції необхідно розрахувати річну економію підприємства за рахунок зменшення енергоносіїв. Зробимо розрахунок вартості підведеного тепла, на нагрів холодних потоків. Визначимо вартість 1 кВт/рік енергії, що отримується при спалюванні природного газу:

– кількість енергії що виділяється при спалюванні  $1000\text{ м}^3$  природного газу  $-33,5 \cdot 10^9$  Дж.

– за допомогою рівняння розрахуємо вартість 1 кВт/рік енергії:

$$\begin{aligned} 33,5 \text{ Гдж} &= 4100 \text{ грн}, \\ 3600 \cdot 8000 \text{ год } 10^3 &= x \text{ грн}, \end{aligned}$$

де  $x$  – питома вартість 1 кВт/рік; 8000 год – кількість робочих годин на рік; 3600 сек – кількість секунд в 1 годині.

Звідси знаходимо, що  $x = 3\,524,78$  грн. Тобто 1 кВт/рік коштуватимуть 3 524,78 грн.

Вартість річної енергії, що піде на підігрів холодного потоку буде дорівнювати:

$$S_{\Gamma} = Q_{\text{H}} \cdot x, \quad (2)$$

де  $Q_{\text{H}}$  – теплова потужність для нагріву холодних потоків, кВт.

$$S_{\Gamma 1} = 10\,455,72 \cdot 3\,524,78 = 36\,845\,072,17 \text{ грн.}$$

З літературних джерел відомо, що вартість енергії для охолодження складає 10% від вартості енергії на нагрівання, отже:

$$S_{\text{X}} = Q_{\text{C}} \cdot x \cdot 0,1, \quad (3)$$

де  $Q_{\text{C}}$  – теплова потужність для охолодження гарячих потоків, кВт.

$$S_{\text{X}1} = 8\,143,66 \cdot 3\,524,78 \cdot 0,1 = 2\,870\,457,83 \text{ грн.}$$

Загальні річні витрати на енергоносії складають:

$$S_{\text{ЗАГ}} = S_{\Gamma} + S_{\text{X}}; \quad (4)$$

$$S_{\text{ЗАГ}1} = 36\,854\,072,17 + 2\,870\,457,83 = 39\,724\,530,00 \text{ грн.}$$

Після розробки та впровадження пінч технологій, було отримано нові значення гарячих та холодних утиліт, 3 139,39 кВт та 827,06 кВт відповідно. Зробимо перерахунок вартостей енергії згідно формул (2), (3):

$$S_{\Gamma 2} = 3\,139,39 \cdot 3\,524,78 = 11\,065\,646,90 \text{ грн.}$$

$$S_{\text{X}2} = 827,06 \cdot 3\,524,78 \cdot 0,1 = 291\,520,13 \text{ грн.}$$

Загальні річні витрати на енергоносії згідно формули (4) складатимуть:

$$S_{\text{ЗАГ}2} = 11\,065\,646,90 + 291\,520,13 = 11\,357\,167,04 \text{ грн.}$$

Розрахуємо суму економії за рік:

$$\Delta S = S_{3AG1} - S_{3AG2} \quad (5)$$

$$\Delta S = 39\,724\,530,00 - 11\,357\,167,04 = 28\,367\,362,96 \text{ грн.}$$

Показано, що економічний потенціал енергозбереження дорівнює близько 28 млн. грн.

### **Висновки і перспективи подальшого розвитку даного напрямку.**

Дослідження, яке було проведено в даній роботі показало значний потенціал енергозбереження процесів виділення бензол-толуол-ксилольної фракції і гідродеалкілата в процесі виробництва бензолу.

Зменшення споживання утиліт на процесі виробництва бензолу призводить до зменшення використання бензолу у якості палива. Це веде як до значної економії коштів, так і до зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище.

Результати даної роботи можна використати для аналізу та реконструкції існуючого виробництва та виробництв що проектуються.

**Список літератури:** 1. *Товажнянский Л.Л.* Теплоэнергетическая интеграция химико-технологических процессов – инструмент энергосбережения и уменьшения вредных выбросов / *Л.Л.Товажнянский, Л.М. Ульев* // Структурна перебудовата екологізація економіки в контексті переходу України до збалансованого розвитку Матеріали III українського екологічного конгресу, 10-11 грудня 2009р. – К: Центр екологічної освіти та інформації. – с. 193 – 197. 2. *Мешалкин В.П.* Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем / *В.П. Мешалкин, Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко.* – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – 412с. 3. *Капустенко П.А.* Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы / *П.А. Капустенко, А.К. Кузин, Е.Л. Макаровский и др.* – Х.: ООО Издательский дом «Вокруг цвета». 2004. – 321с. 4. *Товажнянский Л.Л.* Проблемы энергосбережения и пинч-анализ как метод их решения / *Л.Л. Товажнянский, Л.М. Ульев* // Оборудование и инструмент для профессионалов. 2006. – № 2. – с. 82–88. 5. *Смит Р.* Основы интеграции тепловых процессов / *Р. Смит, Й. Клемеш, Л. Л. Товажнянский и др.* – Х.: ХГПУ, 2000. – 457 с. 6. *Ульев Л.М.* Экстракция данных для пинч-анализа процессов выделения бензол-толуол-ксилольной фракции и гидродеалкилата в производстве бензола / *Л.М. Ульев, О.А. Яценко, М.В. Ильченко* // Наукові праці ОНАХТ.– Одесса: 2014.-Вип. 45.–Том. 3.– с.125-130. 7. *Tovazshneanski L.L.* Estimation of energy saving potential of industrial sites with methods of process integration / *L.L. Tovazshneanski, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev* // 14<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA'2000, Praha. – 2000. – Summaries



Vol. 4. Process System Engineering. Praha. – 2000. – p. 61. (Paper No. H5. 6. P.6). **8. Товажнянський Л.Л.** Интеграция теплоэнергетических процессов в промышленности / *Л.Л. Товажнянський, П.А. Капустенко, Л.М. Ульєв, К.П. Кусаков* // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. XIII конференция стран СНГ с международным участием. Труды конференции. (Севастополь. 14–18 июля 2003 г). К.: 2003. – с. 116–120. **9. Товажнянський Л.Л.** Интеграция тепловых процессов для развития энергосберегающего потенциала промышленности / *Л.Л. Товажнянський, П.А. Капустенко, Л.М. Ульєв, А.Ю. Перевертайленко, О.Б. Анипко* // Інтегровані технології та енергозбереження. 2002. – № 2. – с. 3–5. **10. Ульєв, Л.М.** Программное обеспечение для проектирования теплообменных сетей / *Ульєв Л.М., Яценко О.А.* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. . – №10. – с.61–72

**Bibliography (transliterated):** **1. Tovazhneanski L.L.** Teploenergeticheskaya integratsiya himiko-tehnologicheskikh protsessov – instrument Energoberezheniya i umensheniya vrednyih vyibrosov / *L.L. Tovazhneanski, L.M. Ulyev.* Strukturna perebudovata ekologizatsiya ekonomiku v konteksti perehodu Ukraine do zbalansovanogo rozvitku Materiali III ukrainskogo ekologichnogo kongresu, 10-11 December 2009. – Kiev: Tsentr ekologichnoyi osvitu ta Informatsii. – P. 193 – 197. **2. Meshalkin V.P.** Osnovy teorii resursoberegayuschih integrirovannykh himiko-tehnologicheskikh sistem / *V.P.Meshalkin, L.L. Tovazhneanski, P.A. Kapustenko.* – Kharkov: NTU «KhPI», 2006. – 412p. **3. Kapustenko P.A.** Alternativnaya energetika i energoberezhenie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy / *P.A. Kapustenko, A.K. Kuzin, E.L. Makarovskiy i dr.* – Kharkov: OOO Izdatelskiy dom«Vokrugsveta».–2004.–321p. **4. Tovazhneanski L.L.** Problemy energoberezheniya i pinch-analiz kak metod ih resheniya/ *L.L. Tovazhneanski, L.M. Ulyev.* Oborudovanie i instrument dlya professionalov. 2006. – No 2. – P. 82–88. **5. Smit R.** Osnovy integratsii teplovykh protsessov / *R. Smit, Y. Klemesh, L. L. Tovazhnyanskiy i dr.* – Kharkov: NTU «KhPI», 2000. – 457 p. **6. Ulyev L.M.** Ekstraktsiya dannykh dlya pinch-analiza protsessov vyideleniya benzol-toluol-ksilolnoy fraktsii i gidrodealkilata v proizvodstve benzola / *L.M.Ulyev, O.A. Yatsenko, M.V. Ilchenko.* Naukovo pratsi ONAHT.– Odessa: 2014.-V. 45.–Tom. 3.– P. 125-130. **7. Tovazhneanski L.L.** Estimation of energy saving potential of industrial sites with methods of process integration / *L.L. Tovazhneanski, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev* // 14th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA'2000, Praha. – 2000. – Summaries Vol. 4. Process System Engineering. Praha. – 2000. – P. 61. (Paper No. H5. 6. P.6). **8. Tovazhneanski L.L.** Integratsiya teploenergeticheskikh protsessov v promyishlennosti / *L.L. Tovazhneanski, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev, K.P. Kusakov* // Problemy ekologii i ekspluatatsii ob'ektov energetiki. XIII konferentsiya stran SNG s mezhdunarodnyim uchastiem. Trudy konferentsii. (Sevastopol. 14–18 July 2003). Kiev. – 2003. – P. 116–120. **9. Tovazhneanski L.L.** Integratsiya teplovykh protsessov dlya razvitiya energoberegayuschego potentsiala promyishlennosti/ *L.L. Tovazhneanski, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev, A.Yu. Perevertaylenko, O.B. Anipko.* Integrovani tehnologii ta energozberezhennya. 2002. – No 2.– P. 3–5. **10. Ulyev, L.M.** Programmnoe obespechenie dlya proektirovaniya teploobmennykh setey/ *Ulyev L.M., Yatsenko O.A.* Visnyk NTU "KhPI". – 2012.– No 10. – P. 61–72

*Надійшла (received) 10.10.14*