

Горбунов К.О., к.техн.н., професор, Селіхов Ю.А., к.техн.н., професор, Коцаренко В.О., к.техн.н., професор, Пономаренко Г.В., к.техн.н., доцент, Горбунова О.В., ст.викладач

## **ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ УСТАНОВКИ ВИПАРЮВАННЯ СІРЧАНОЇ КИСЛОТИ**

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

**Ключові слова:** сірна кислота, випарювання, інтеграція, пінч-аналіз

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В даний час в Україні гостро стоїть питання енергозбереження. Вже не викликає сумнівів, що безперервний зріст вартості енергоносіїв вимагає створення енергоефективних виробництв.

Проектування таких промислових виробництв може бути розділене на два етапи. Перший етап – це проектування індивідуальних установок, таких як, реактори, печі, системи розподілу, теплообмінні апарати сушарки, і так далі. Другий етап – це об'єднання цих установок в інтегровані системи виробничих процесів. Пінч-аналіз пов'язан з другим етапом [1–12].

Необхідно також відзначити ще два важливих момента, які є важливою частиною пінч-аналізу. По-перше – це можливість встановлення цілей проектування перед початком самого проектування. По-друге, це можливість інтеграції процесів в межах великого виробничо-територіального комплексу.

У зв'язку з вищесказаним, вважаємо за доцільне використання в якості методу інтеграції саме пінч-аналіз.

З усіх сполук сірки, які виробляються і споживаються в промисловості, перше місце займає сірчана кислота [13–14].

Вибір методу переробки залежить головним чином від складу кислоти. Найчастіше потрібна попередня підготовка кислоти в регенерації, яку здійснюють методом екстракції, окислення, висолювання, коагуляції, адсорбції, термічного розкладання. Регенерація сірчаної кислоти з отриманням продукту високої якості може бути досягнута термічною деструкцією  $H_2SO_4$  до  $SO_2$ , коли в умовах високих температур всі органічні домішки повністю згорають. Діоксид сірки очищають, переводять в триоксид (сірчаний ангідрид) і абсорбують. Концентрація  $SO_2$  в контактних газах майже лінійно залежить від концентрації сірчаної кислоти, яка направляється на розкладання.

У статті [15] авторами було розглянуто питання теплової інтеграції установки кристалізації гідролісної сірчаної кислоти на прикладі трикорпусної випарної установки.

У даній роботі досліджуються процеси, що протікають при випаровуванні сірчаної кислоти в чотирьохкорпусній випарній установці. В якості вихідних даних були задані наступні:

1. Продуктивність по вихідному розчину 12 т/год.
2. Початкова концентрація розчину 20 % (мас.).
3. Кінцева концентрація розчину 60 % (мас.).
4. Тиск грюючого пара 1 МПа.
5. Тиск у барометричному конденсаторі 0,02 ат.

Схема випарювання прямоточна. Циркуляція розчину природна. Вихідний розчин підігрівається в теплообміннику до температури кипіння в 1-му випарному апараті.

**Опис технологічної схеми установки.** Початковий розчин подається з ємності відцентровим насосом через підігрівач в перший корпус випарної установки. У підігрівачі початковий розчин нагрівається до температури близької до температури кипіння розчину. Перший корпус установки обігрівается свіжим (первинним) паром. Вторинний пар, який утворюється при кипінні розчину в першому корпусі, спрямовується як гріючий пар в другий корпус, сюди ж надходить частково сконцентрований розчин з першого корпусу. Аналогічно упарений розчин з другого корпусу подається в третій і четвертий корпуси. Упарений до кінцевої концентрації в четвертому корпусі готовий продукт надходить в ємність. У міру проходження з корпусу в корпус тиск і температура пари знижується, і з останнього (четвертого) корпусу пар з низьким тиском відводиться в барометричний конденсатор, в якому при конденсації пари створюється вакуум. Розчин і вторинний пар переміщуються з корпусу в корпус самопливом завдяки загальному перепаду тиску, що виникає в результаті надмірного тиску в першому корпусі і вакууму в останньому.

Суміш охолоджуючої води і конденсату зливається самопливом через трубу в бак-гідрозатор. Конденсат пари, що гріє з випарних апаратів і теплообмінника виводиться за допомогою конденсатовідвідників.

Принципова схема чотирьохкорпусний вакуум-випарної установки безперервної дії представлена на рис. 1.

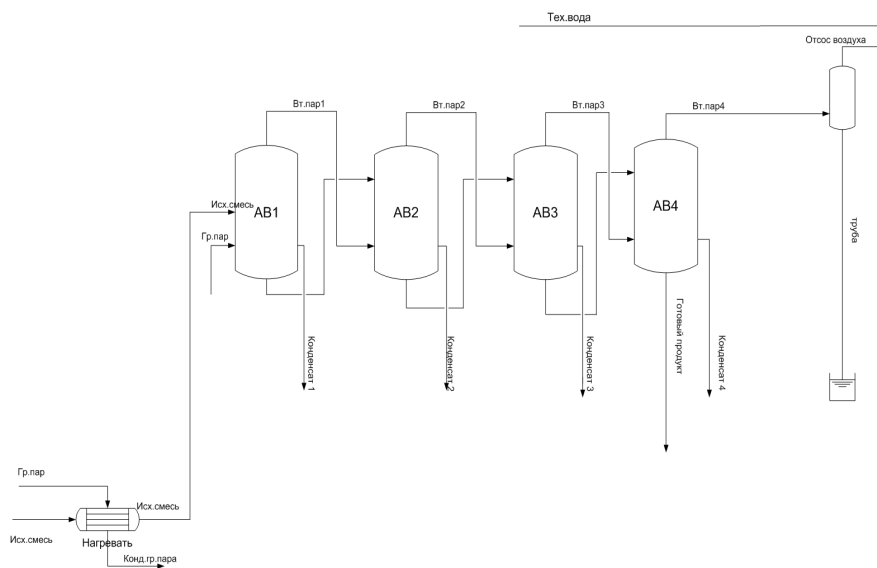


Рисунок 1 – Принципова схема установки випарювання сірчаної кислоти

**Виділення технологічних потоків для визначення енергозберігаючого потенціалу установки.** Збір даних, необхідних для розрахунку матеріального і теплового балансів, здійснювався шляхом прямих вимірювань температур і витрат потоків на обладнанні за допомогою витратомірів, стаціонарних і переносних термометрів [16]. В ході такого обстеження установки були отримані дані, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Система потоків для аналізу енергоспоживання установки

№	Назва потоку	Тип	$T_s, ^\circ C$	$T_t, ^\circ C$	$CP, \text{кВт/К}$	$\Delta H, \text{кВт}$
1	Кондесат гр. пара	гар	180	90	2,748	247
2	Конденсат вт. пара 1 корп.	гар	167	30	2,062	283
3	Конденсат вт. пара 2 корп.	гар	155	25	2,257	293
4	Конденсат вт. пара 3 корп.	гар	129	20	2,453	267
5	Втор. пар 4 корп.	гар	110	110		1481
6	Готовий продукт	гар	114	20	2,790	346
7	Вихідна суміш	хол	10	139	10,706	1381
8	Технологічна вода	хол	15	60	10,475	471

Використовуючи дані, отримані при обстеженні установки (табл. 1), була побудована сіткова діаграма процесу, як показано на рис. 2.



Рисунок 2 – Сіткова діаграма процесу до реконструкції

Для економічної оптимізації використовується графік залежності загальної річної вартості експлуатації проекту від найменшого температурного напору на теплообмінному обладнанні [17]. Вартість енергії, що витрачається зростає за рахунок недорекуперації теплоти, а вартість самого обладнання зменшується за рахунок зменшення поверхні теплообміну, що і призводить до немонотонної залежності сумарною річною вартості зовнішніх теплоносіїв і устаткування, що, в свою чергу, дозволяє визначити оптимальне мінімальне значення різниці температур (рис. 3).

Температура пінча для гарячих потоків склала  $114\text{ }^\circ\text{C}$ , а температура пінча для холодних потоків становить  $94\text{ }^\circ\text{C}$ .

Використовуючи отримані дані, будуємо нову сіткову діаграму. При цьому при проектуванні нової схеми, необхідно дотримуватися  $CP$  та  $\Delta T$  правил, із заборонаю переносу теплоти через пінч.

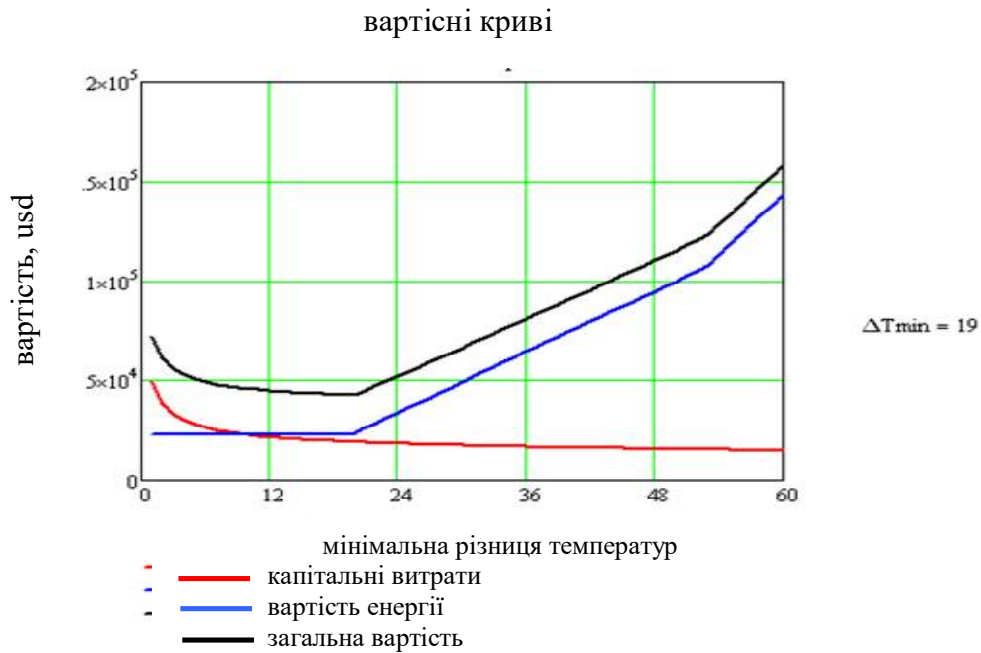


Рисунок 3 – Визначення оптимальної мінімальної різниці температур

Використовуючи дані з таблиці 1 і сітчастої діаграми (рис. 1), будемо на ентальпійно-температурній діаграмі складові криві (рис. 4) [18].

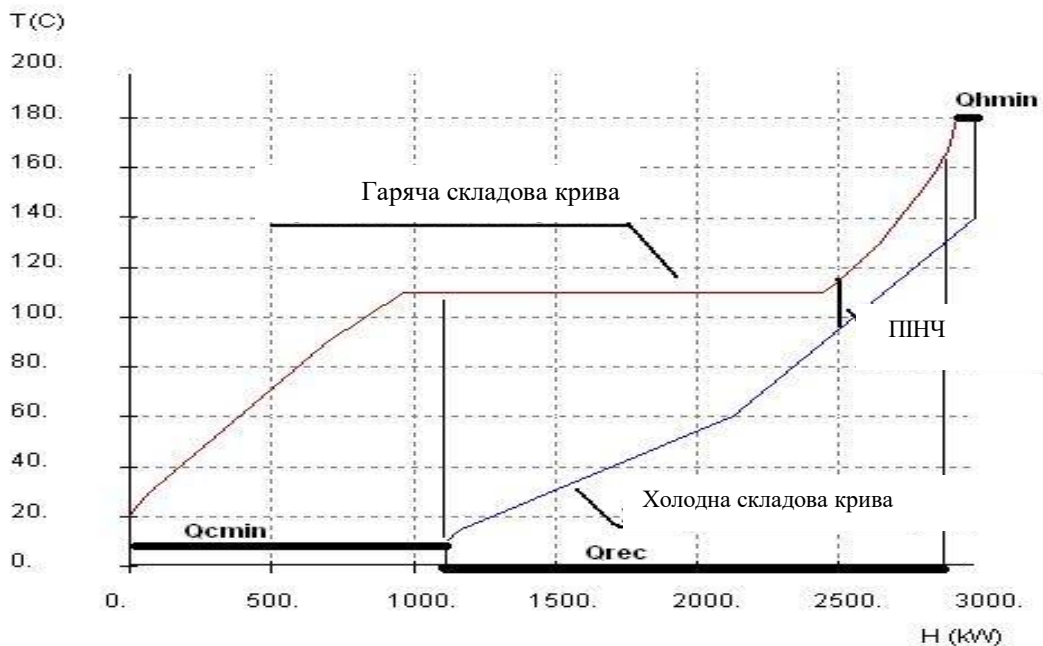


Рисунок 4 – Складові криві для  $\Delta T_{\min} = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$

Побудова підсистем вище і нижче пінча і установка нових теплообмінних апаратів наведена на рис. 5.

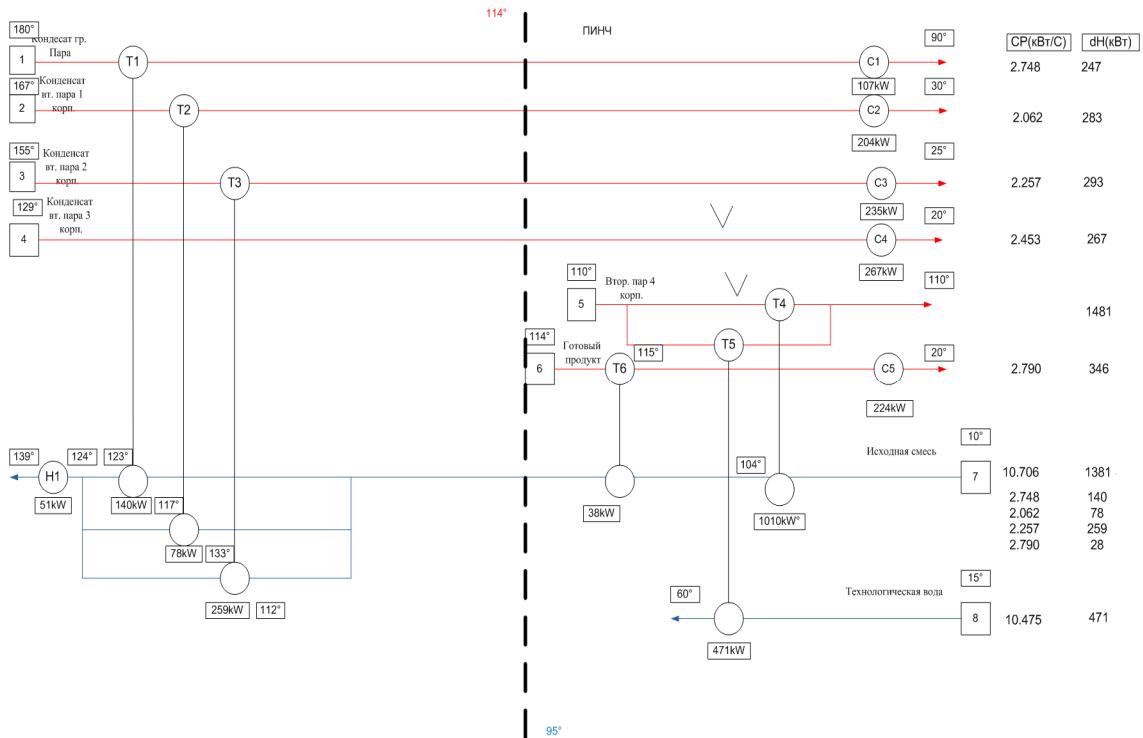


Рисунок 5 – Побудова підсистем вище і нижче пінча

Даний підхід до інтеграції виробництва сірчаної кислоти стало можливим завдяки проектуванню нової енерго-функціональної схеми – схеми проекту реконструкції установки (рис. 6).

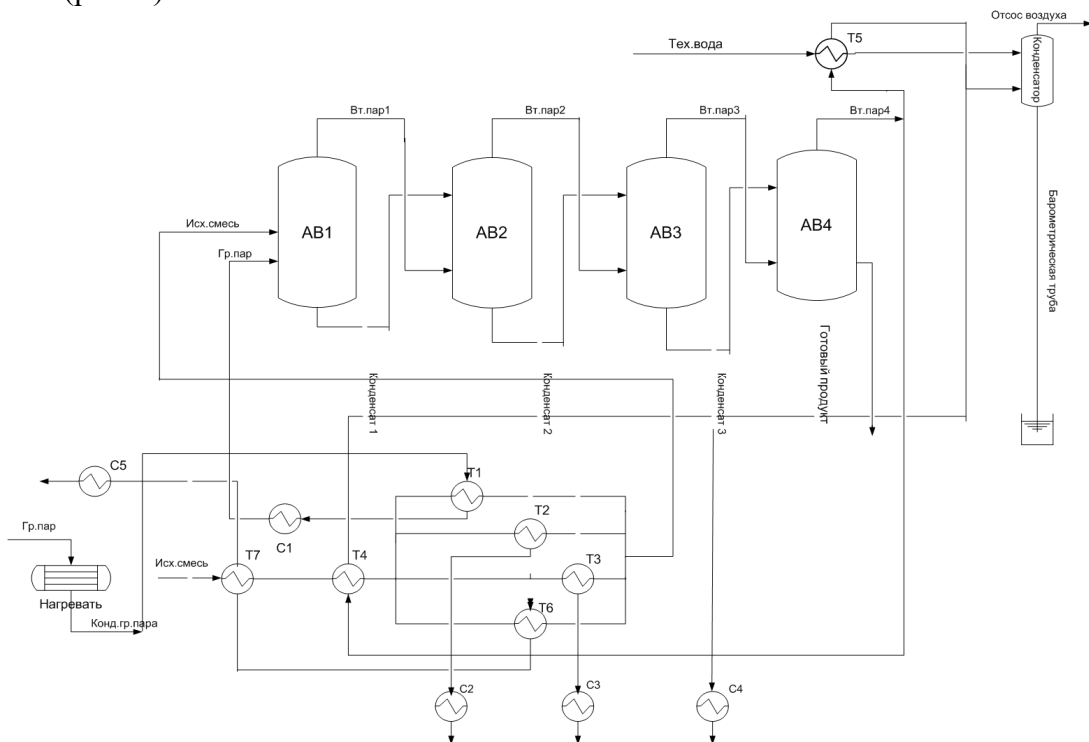


Рисунок 6 – Енерго-функціональна схема виробництва

## Висновки

В роботі був запропонований проект реконструкції системи теплообміну процесу випарювання сірчаної кислоти у багатокорпусній випарній установці, який дозволяє знизити витрати енергії. Після проведення інтеграції та розрахунків, було отримано економічні показники. Таким чином, потенціал енергозбереження складає близько 30 тис. грн на рік. Строк окупності запропонованого проекту реконструкції складає величину близько 4 місяців.

## Література

1. Klemes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., 2015, Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
2. Law R., Harvey A., Reay D. 2013. Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry. Applied Thermal Engineering 53: 188–196.
3. Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P. 2013. Process Integration for Energy Saving in Buildings and Building Complexes. Chapter 31 in Handbook of Process Integration (PI), Edited by Klemeš J.J., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK: 938-965.ASHRAE. 2013., Handbook Fundamentals. www.ashrae.org. (Accessed 10th April 2014).
4. Cipolla S.S., Maglionico M. 2014. Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy. Energy Procedia 45: 288–297.
5. Frijns, J., Hofman, J., Nederlof, M. 2013. The potential of (waste) water as energy carrier. Energy Conversion and Management 65: 357–363.
6. Schmid F. 2009, Sewage water: interesting heat source for heat pumps and chillers, Energy-engineer FH, Swiss Energy Agency for Infrastructure Plants. Zürich, Switzerland. 10p.
7. Energy Saver. 2019. Whole house ventilation systems. USDE. <https://www.energy.gov/energysaver/weatherize/ventilation/whole-house-ventilation> (Accessed 27<sup>th</sup> November 2019).
8. ASHRAE Handbook Fundamentals, 2017, <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook> (accessed 30 November 2019).
9. Kilkovsky B., Stehlik P., Jegla Z., Tovazhnyansky L.L., Arsenyeva O., Kapustenko P. O. 2014. Heat exchangers for energy recovery in waste and biomass to energy technologies—Energy recovery from flue gas. Applied Thermal Engineering 64(1): 213–223.
10. Doty S., Turner W. C. 2009. Energy management handbook. The Fairmont Press, Inc., Lilburn, GA, USA.
11. Основы интеграции тепловых процессов / [Смит Р., Товажнянский Л.Л., Клемеш Й. Капустенко П.А., Ульянов Л.М.]. – Х.: ХГПУ. 2000. – 457 с.
12. Linnhoff B., Townsend D.W., Boland D., et. al., User Guide on PROCESS INTEGRATION for the EFFICIENT USE OF ENERGY. – Rugby.: IChemE. 1982, last edition 1994. P. 247.
13. П. Паскаль Название: Производство серной кислоты, соляной кислоты и хлора: ГОНТИ, 1938-251с.
14. Справочник серноокислотчика, под ред. Малина К. М., 2 изд., М., 1971.
15. Капустенко П.А., Арсеньева О.П., Гарев А.О., Захаров Д.С. / Тепловая интеграция установки кристаллизации гидролизной серной кислоты // Вісник НТУ «ХП». 2013. № 55 (1028).– С. 131–138.

16. Нубарян С.М. Контрольно-измерительные приборы в теплотехнических измерениях. Курс лекций. – Харьков: ХНАГХ, 2006 – 283 с.

17. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Применение методов интеграции процессов и современного теплообменного оборудования при реконструкции тепловых систем / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. КАПУСТЕНКО, Л.М. УЛЬЕВ, А.Ю. ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО, Г.Л. ХАВИН, О.П. АРСЕНЬЕВА // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. XII конференция стран СНГ с международным участием. Труды конференции. Севастополь. 24–28 июля 2002 г. Киев. – 2002. – С. 111–113.

18. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Интеграция тепловых процессов для развития энергосберегающего потенциала промышленности / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. КАПУСТЕНКО, Л.М. УЛЬЕВ, А.Ю. ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО, О.Б. АНИПКО // Інтегровані технології та енергозбереження. 2002. – № 2. – С. 3–5.

19. 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.

#### Bibliography (transliterated)

1. Klemes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., 2015, Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

2. Law R., Harvey A., Reay D. 2013. Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry. Applied Thermal Engineering 53: 188–196.

3. Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P. 2013. Process Integration for Energy Saving in Buildings and Building Complexes. Chapter 31 in Handbook of Process Integration (PI), Edited by Klemeš J.J., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK: 938-965. ASHRAE. 2013., Handbook Fundamentals. [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org). (Accessed 10th April 2014).

4. Cipolla S.S., Maglionico M. 2014. Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy. Energy Procedia 45: 288–297.

5. Frijns, J., Hofman, J., Nederlof, M. 2013. The potential of (waste) water as energy carrier. Energy Conversion and Management 65: 357–363.

6. Schmid F. 2009, Sewage water: interesting heat source for heat pumps and chillers, Energy-engineer FH, Swiss Energy Agency for Infrastructure Plants. Zürich, Switzerland. 10p.

7. Energy Saver. 2019. Whole house ventilation systems. USDE. <https://www.energy.gov/energysaver/weatherize/ventilation/whole-house-ventilation> (Accessed 27<sup>th</sup> November 2019).

8. ASHRAE Handbook Fundamentals, 2017, <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook> (accessed 30 November 2019).

9. Kilkovsky B., Stehlik P., Jegla Z., Tovazhnyansky L.L., Arsenyeva O., Kapustenko P. O. 2014. Heat exchangers for energy recovery in waste and biomass to energy technologies–Energy recovery from flue gas. Applied Thermal Engineering 64(1): 213–223.

10. Doty S., Turner W. C. 2009. Energy management handbook. The Fairmont Press, Inc., Lilburn, GA, USA.

11. Osnovni integratsii teplovyih protsessov / [Smit R., Tovazhnyansky L.L., Klemes Y. Kapustenko P.A., Ulev L.M.]. – H.: HGPU. 2000. – 457 з.

12. Linnhoff B., Townsend D.W., Boland D., et. al., User Guide on PROCESS INTEGRATION for the EFFICIENT USE OF ENERGY. – Rugby.: IChemE. 1982, last edition 1994. P. 247.
13. P. Paskal Nazvanie: Proizvodstvo sernoy kislotyi, solyanoy kislotyi i hlora: GONTI, 1938-251c.
14. Spravochnik sernokislotchika, pod red. Malina K. M., 2 izd., M., 1971.
15. Kapustenko P.A., Arseneva O.P., Garev A.O., Zaharov D.S. / Teplovaya integratsiya ustanovki kristallizatsii gidroliznoy sernoy kislotyi // Visnik NTU «HPI». 2013. # 55 (1028).– P. 131–138.
16. Nubaryan S.M. Kontrolno-izmeritelnyie priboryi v teplotehnicheskikh izmereniyah. Kurs lektsiy. – Harkov: HNAGH, 2006 – 283 p.
17. Tovazhnyansky L.L. Primenenie metodov integratsii protsessov i sovremennogo teploobmennogo oborudovaniya pri rekonstruktsii teplovyih sistem / L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, L.M. Ulev, A.Yu. Perevertaylenko, G.L. Havin, O.P. Arseneva // Problemyi ekologii i ekspluatatsii ob'ektov energetiki. XII konferentsiya stran SNG s mezhdunarodnyim uchastiem. Trudyi konferentsii. Sevastopol. 24–28 iyulya 2002 g. Kiev. – 2002. – P. 111–113.
18. Tovazhnyansky L.L. Integratsiya teplovyih protsessov dlya razvitiya energosberegayushchego potentsiala promyshlennosti / L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, L.M. Ulev, A.Yu. Perevertaylenko, O.B. Anipko // Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. 2002. – # 2. – P. 3–5.
19. Tovazhnyansky L.L. Problemyi energosberezheniya i pinch-analiz kak metod ih resheniya / L.L. Tovazhnyansky, L.M. Ulev // Oborudovanie i instrument dlya professionalov. 2006. – # 2. – P. 82–88.

УДК 658.28:665.63:338

Горбунов К.О., Селіхов Ю.А., Коцаренко В.О., Пономаренко Г.В., Горбунова О.В.

### **ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ УСТАНОВКИ ВИПАРЮВАННЯ СІРЧАНОЇ КИСЛОТИ**

В даний час в Україні гостро стоїть питання енергозбереження. Вже не викликає сумнівів, що безперервний зріст вартості енергоносіїв вимагає створення енергоефективних виробництв.

У роботі досліджуються процеси, що протікають при випаровуванні сірчаної кислоти в чотирікорпусній випарній установці.

Збір даних, необхідних для розрахунку матеріального і теплового балансів, здійснювався шляхом прямих вимірювань температур і витрат потоків на обладнанні за допомогою витратомірів, стаціонарних і переносних термометрів.

Для економічної оптимізації використовується графік залежності загальної річної вартості експлуатації проекту від найменшого температурного напору на теплообмінному обладнанні. Вартість енергії, що витрачається зростає за рахунок недорекуперації теплоти, а вартість самого обладнання зменшується за рахунок зменшення поверхні теплообміну, що і призводить до немонотонної залежності сумарною річною варто-



сті зовнішніх теплоносіїв і устаткування, що, в свою чергу, дозволяє визначити оптимальне мінімальне значення різниці температур.

Температура пінча для гарячих потоків склала 114 °С, а температура пінча для холодних потоків становить 94 °С.

Використовуючи отримані дані, в роботі побудовано нову сіткову діаграму.

За результатами розрахунків був запропонований проект реконструкції системи теплообміну процесу випарювання сірчаної кислоти у багатокорпусній випарній установці, який дозволяє знизити затрати енергії. Після проведення інтеграції та розрахунків, було отримано економічні показники. Таким чином, потенціал енергозбереження складає близько 30 тис. грн на рік. Строк окупності запропонованого проекту реконструкції складе величину близько 4 місяців.

Горбунов К.А., Селихов Ю.А., Коцаренко В.А., Пономаренко А.В., Горбунова О.В.

### **ТЕПЛОВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ УСТАНОВКИ ВЫПАРИВАНИЯ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ**

В настоящее время в Украине остро стоит вопрос энергосбережения. Уже не вызывает сомнений, что непрерывный рост стоимости энергоносителей требует создания энергоэффективных производств.

В работе исследуются процессы, протекающие при выпаривании серной кислоты в четырехкорпусной выпарной установке.

Сбор данных, необходимых для расчета материального и теплового балансов, осуществлялся путем прямых измерений температур и расходов потоков на оборудовании с помощью расходомеров, стационарных и переносных термометров.

Для экономической оптимизации используется график зависимости общей годовой стоимости эксплуатации проекта от минимального температурного напора на теплообменном оборудовании. Стоимость расходуемой энергии растет за счет недорекупации теплоты, а стоимость самого оборудования уменьшается за счет уменьшения поверхности теплообмена, что и приводит к немонотонной зависимости суммарной годовой стоимости внешних теплоносителей и оборудования, что, в свою очередь, позволяет определить оптимальное минимальное значение разности температур.

Температура пинча для горячих потоков составила 114 °С, а температура пинча для холодных потоков составляет 94 °С.

Используя полученные данные, в работе построена новая сеточная диаграмма.

По результатам расчетов был предложен проект реконструкции системы теплообмена процесса выпаривания серной кислоты в четырехкорпусной выпарной установке, который позволяет снизить затраты энергии. После проведения интеграции и расчетов, было получено экономические показатели. Таким образом, потенциал энергосбережения составляет около 30 тыс. грн в год. Срок окупаемости предложенного проекта реконструкции составит величину около 4 месяцев.

Gorbunov K., Selikhov Yu., Kotsarenko V., Ponomarenko H., Gorbunova O.

## **THERMAL ACID INTEGRATION OF SULFURIC ACID VAPORIZATION**

Currently, Ukraine is an issue of energy conservation. There is no longer any doubt that the continuous increase in the cost of energy requires the creation of energy-efficient industries.

The work investigates the processes occurring during the evaporation of sulfuric acid in a four-shell evaporator.

The collection of data necessary for calculating material and thermal balances was carried out by direct measurements of temperatures and flow rates of the equipment using flowmeters, stationary and portable thermometers.

For economic optimization, we use a graph of the dependence of the total annual cost of operation of the project on the minimum temperature head on heat exchange equipment. The cost of energy consumed increases due to under-recovery of heat, and the cost of the equipment itself decreases due to a decrease in the heat exchange surface, which leads to a nonmonotonic dependence of the total annual cost of external heat carriers and equipment, which, in turn, allows us to determine the optimal minimum value of the temperature difference.

The pinch temperature for hot streams was 114 °C, and the pinch temperature for cold streams was 94 °C.

Using the data obtained, a new grid diagram is constructed in the work.

Based on the results of the calculations, a project was proposed for the reconstruction of the heat exchange system for the evaporation of sulfuric acid in a four-shell evaporator, which reduces energy costs. After integration and calculations, economic indicators were obtained. Thus, the potential for energy saving is about 30 thousand UAH per year. The payback period of the proposed reconstruction project will be about 4 months.