

*Хімія і технологія виробництва основної хімічної промисловості Т. 79. 2019*

УДК 681.51:621.574.3:661.53

**Я. О. КРАВЧЕНКО**

**ЗАКОНОМІРНОСТІ КЕРУЮЧОЇ ДІЇ ВИТРАТИ ФЛЕГМИ НА  
ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ВИПАРНИКА  
АБСОРБЦІЙНО-ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК ВИРОБНИЦТВА  
АМІАКУ**

*Проведено аналіз випарників абсорбційно-холодильних установок блоку вторинної конденсації виробництв аміаку, як об'єктів керування. Обґрунтована необхідність мінімізації температури охолодження циркуляційного газу, зниження якої підвищує енергоефективність виробництва аміаку за рахунок зниження витрати природного газу. Методом математичного моделювання встановлені закономірності впливу керуючої дії витрати флегми у випарниках на температуру охолодження циркуляційного газу. Розроблено алгоритмічне забезпечення для мінімізації температурного режиму випарників.*

**Ключові слова:** виробництво аміаку, абсорбційно-холодильна установка, випарник, витрата флегми, енергоефективність.

**Я. А. КРАВЧЕНКО**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПРАВЛЯЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ РАСХОДА  
ФЛЕГМЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА  
ИСПАРИТЕЛЯ АБСОРЦИОННО-ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК  
ПРОИЗВОДСТВА АММИАКА**

*Проведен анализ испарителей абсорбционно-холодильных установок блока вторичной конденсации производств аммиака, как объектов управления. Обоснована необходимость минимизации температуры охлаждения циркуляционного газа, снижение которой повышает энергоэффективность производства аммиака за счет снижения расхода природного газа. Методом математического моделирования установлены закономерности влияния управляющего воздействия расхода флегмы в испарителях на температуру охлаждения циркуляционного газа. Разработано алгоритмическое обеспечение для минимизации температурного режима испарителей.*

**Ключевые слова;** производство аммиака, абсорбционно-холодильная установка, испаритель, расход флегмы, энергоэффективность.

**Y.A. KRAVCHENKO**

**REGULARITIES OF PHLEGM TEMPERATURE MODE REGULATION  
INFLUENCE ON AMMONIA PROCESS ABSORPTION AND COOLING  
UNITS EVAPORATOR**

*Analysis of evaporators of absorption coolers at ammonia plant secondary condensation block as management objects. It has been substantiated that circulation gas temperature should be minimized in order to increase ammonia plant energy efficiency due to decrease of natural gas consumption. Mathematical modeling allowed to establish regularities of phlegm consumption control influence*

*in evaporators on circulation gas cooling temperature. Algorithm support for minimization of evaporators temperature mode has been developed.*

**Keywords:** ammonia production, absorption cooling unit, evaporator, phlegm consumption, energy efficiency

### Вступ

Сучасні агрегати синтезу аміаку становлять собою складні енерготехнологічні комплекси, експлуатація яких відбувається під впливом великої кількості збурень. Значна частина цих збурень обумовлена зміною зовнішнього теплового навантаження внаслідок застосування на різних стадіях виробництва апаратів повітряного і водяного охолодження, що за наявності великої кількості зворотних зв'язків поміж окремими технологічними процесами викликає залежність їх режимів роботи від сезонних та добових коливань температури атмосферного повітря. Враховуючи великотоннажність цих агрегатів такі відхилення у режимах роботи можуть призводити до суттєвого зниження їх економічної ефективності.

Однією з відповідальних стадій діючих в Україні агрегатів, зокрема серії АМ-1360, де власне і відбувається остаточне вилучення продукційного аміаку за рахунок охолодження циркуляційного газу (ЦГ) у низькотемпературних випарниках водо-аміачних абсорбційно-холодильних установок (АХУ), є блок вторинної конденсації. Робота цього достатньо складного блоку внаслідок вище згаданих збурень характеризується суттєвими змінами температурного режиму охолодження ЦГ в діапазоні від  $-7^{\circ}\text{C}$  до  $3^{\circ}\text{C}$  [1]. Підвищення ж цієї температури навіть на один градус за Цельсієм згідно існуючих досліджень [2] знижує енергоефективність агрегату синтезу за рахунок збільшення витрат природного газу і глибоко знесоленої води у додатковий паровий котел відповідно на  $307,3$  тис.м<sup>3</sup> і  $3$  тис.т/рік для отримання водяної пари високого тиску, необхідної для приводу парової турбіни відцентрового компресора стиску ЦГ і свіжої азотно-водневої суміші. Тому мінімізація температурного режиму охолодження ЦГ у випарниках блоку вторинної конденсації в умовах зміни зовнішнього теплового навантаження набуває особливої актуальності у загальному процесі підвищення енергоефективності виробництва аміаку.

### Аналіз літературних даних

Розв'язання задачі мінімізації температурного режиму роботи випарника АХУ блоку вторинної конденсації найбільш ефективно може бути виконано із застосуванням методу математичного моделювання. Цей метод є ключовим у системному підході в процесах створення як ефективних хіміко-технологічних комплексів так і автоматизованих систем оптимального керування об'єктами [3].

Аналіз отриманих в промислових умовах експериментальних даних [4] свідчить, що робота випарника АХУ внаслідок застосування в АХУ повітряних конденсаторів, водяного охолодження в абсорберах та повітряного охолодження ЦГ на стадії первинної конденсації відбувається в умовах значного впливу таких збурюючих факторів, як температура  $\Theta_{1Ц}$  і концентрація ЦГ на вході трубного простору  $a_{NH_3}^{BX}$ , тиск випаровування холодоагенту у міжтрубному просторі  $P_{МТР}$ , витрата  $M_X^{BX}$ , концентрація  $\xi_X^{BX}$  і температура  $\Theta_X^{BX}$  рідкого холодоагенту (аміаку) на вході міжтрубного простору. Такий доволі широкий діапазон змін обумовлений у підсумку суттєвою зміною температури атмосферного повітря від  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$ .

Своєрідність роботи випарника пов'язана з присутністю домішок води

у холодоагенті, що надходить до міжтрубного його простору. Тому з випарників АХУ необхідно здійснювати відвід (дренування) залишку води у вигляді флегми з деякою витратою [5]. Недостатнє або ж надмірне дренування флегми з випарника, як відомо [6], призводить до зниження холодопродуктивності, а іноді до повного зриву робочого процесу. Але інформація по кількісним та якісним залежностям впливу витрати флегми на ефективність режиму охолодження ЦГ у випарнику майже відсутня у літературі. В основному це пов'язано із застосуванням АХУ з невеликою холодопродуктивністю, що розповсюджені у побутовій сфері. У таких установках, як правило, застосовується періодичне дренування флегми і його вплив на холодопродуктивність є незначним. Але враховуючи потужність АХУ понад 3 МВт, що застосовані у великотонажних виробництвах аміаку, вплив цього процесу на ефективність теплообміну, особливо в умовах великої кількості вищенаведених збурень, може бути доволі вагомим. Тому задача визначення закономірностей керуючої дії витрати флегми на ефективність температурного режиму випарника АХУ блоку вторинної конденсації у виробництві аміаку за вищенаведених збурень набуває особливого значення.

#### **Мета досліджень**

Метою досліджень є визначення кількісних залежностей та встановлення закономірностей керуючої дії витрати флегми на ефективність температурного режиму випарника АХУ блоку вторинної конденсації у виробництві аміаку.

#### **Матеріали та методи досліджень**

Дослідження проводились методом математичного моделювання, для якого була використана раніше розроблена математична модель випарника АХУ [4].

Визначення кількісних залежностей щодо встановлення закономірностей впливу інтенсивності дренування флегми на ефективність процесів теплообміну випарника здійснювалось за допомогою спеціально розробленого алгоритму, програмна реалізація якого була виконана в пакеті МаїаБ.

У розробленому алгоритмі можна виділити два основні цикли збіжності. На першому розраховується температура охолодження ЦГ з оцінкою похибки обчислень. Ці розрахунки здійснюються за умови, коли витрати флегми та пари киплячого аміаку у міжтрубному просторі не перевищують кількості рідкого холодоагенту, який надходить з ресивера АХУ до випарника. На другому - визначається температура охолодження ЦГ з визначенням ефективної поверхні теплообміну за умов існуючого обмеження по витраті рідкого холодоагенту до випарника. В обох випадках виконуються умови дотримання загального енергетичного та матеріального балансів. Завдяки розробленому алгоритму з'являється можливість розрахунку ефективної поверхні теплообміну випарника в умовах дії зовнішніх збурень:

$$F_x = \frac{\Phi}{q}, \quad (1)$$

де  $\Phi$  – холодопродуктивність,  $q$  – питомий тепловий потік.

#### **Результати досліджень**

Математичне моделювання дозволяє встановити закономірності впливу як зовнішніх збурень, так і керуючих впливів на роботу випарника.

На рис. 1 представлено окремі результати досліджень щодо впливу керуючої дії витрати флегми  $M_\phi$  на ефективність процесу теплообміну випарника в умовах зміни зовнішніх збурень, які найбільш характерні та суттєві для блоку вторинної конденсації, зокрема і АХУ. При цьому були прийняті обмеження, що наведені в таблиці.

## Обмеження, прийняті при дослідженнях

Параметр	Значення	
Витрата ЦГ $V_{Ц}$ , $\text{нм}^3/\text{с}$	310798	
Температура ЦГ на вході у випарник $\Theta_{1Ц}$ , $^{\circ}\text{C}$	9,2	
Тиск ЦГ $P_{Ц}$ , МПа	23	
Витрата холодоагенту $M_X^{BX}$ , т/год	10	
Температура холодоагенту на вході $\Theta_X^{BX}$ , $^{\circ}\text{C}$	26	
Концентрація холодоагенту на вході $\xi_X^{BX}$ , кг/кг	0,998	
Об'ємна концентрація складових компонентів ЦГ на вході, % об.	аміаку $a_{\text{NH}_3}^{BX}$	0,103
	водню $a_{\text{H}_2}^{BX}$	0,544
	азоту $a_{\text{N}_2}^{BX}$	0,195
	метану $a_{\text{CH}_4}^{BX}$	0,082
	аргону $a_{\text{Ar}}^{BX}$	0,076
Тиск у міжтрубному просторі $P_{\text{МТР}}$ , МПа	0,29	

Слід відзначити, що за результатами створення нового апаратурно-технологічного оформлення підвищеної ефективності блоку вторинної конденсації [7] величина температури  $\Theta_{1Ц}$  є константою на рівні  $9,2^{\circ}\text{C}$  за максимальної витрати ЦГ  $V_{Ц}$  на вході.

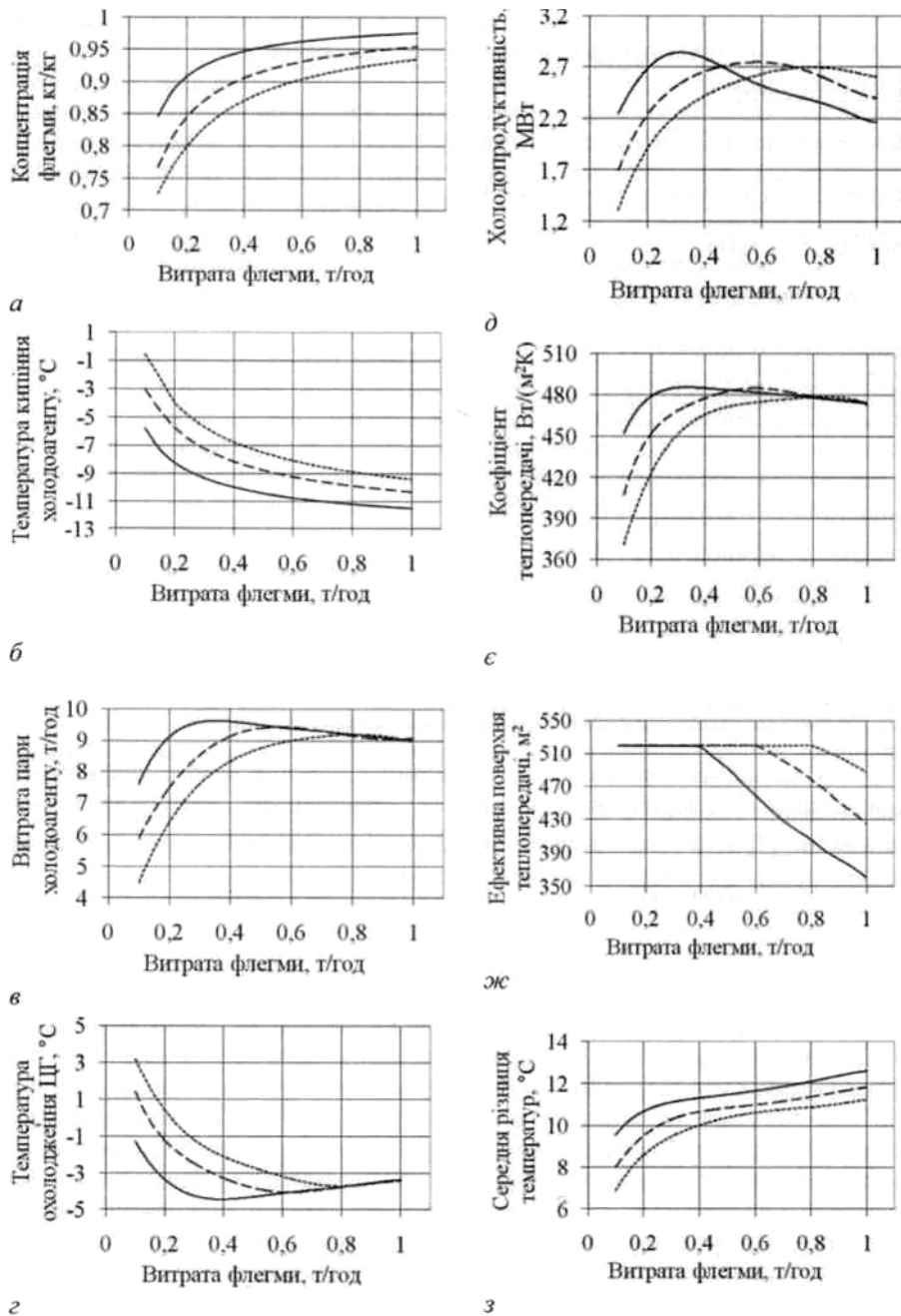


Рисунок 1 – Залежність показників ефективності роботи випарника АХУ від керуючої дії витрати флегми  $M_\phi$  за різних значень концентрації  $\xi_X^{BX}$  холодоагенту (—  $\xi_X^{BX} = 0,998$  кг/кг; - - -  $\xi_X^{BX} = 0,996$  кг/кг; ····  $\xi_X^{BX} = 0,994$  кг/кг) на вході: *a* – концентрація флегми, *б* – температура кипіння холодоагенту, *в* – витрата пари холодоагенту, *г* – температура ЦГ на виході, *д* – холодопродуктивність, *е* – коефіцієнт теплопередачі, *ж* – ефективна поверхня теплопередачі, *з* – середня різниця температур

Отримані результати досліджень (рис. 1-2) наочно ілюструють залежність цільових показників ефективності функціонування випарника від керуючої дії витрати флегми.

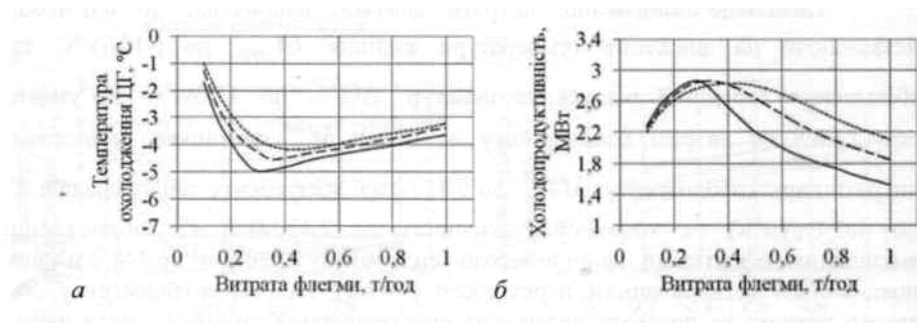
Так, слід виділити екстремальний характер від керуючої дії витрати флегми отриманих залежностей по температурі охолодження ЦГ  $\Theta_{2Ц}$  та по холодопродуктивності  $\Phi_0$ . Зниження температури кипіння рідкого холодоагенту  $\Theta_{МТР}$  спричинює зниження температури охолодження ЦГ  $\Theta_{2Ц}$  та підвищення холодопродуктивності  $\Phi_0$ , а також пояснює екстремальну залежність витрати пари холодоагенту  $M_Y^{ВІХ}$ .

Як видно з рис. 1, з підвищенням витрати  $M_\phi$  з 0,1 т/год до 0,35 т/год за незмінної величини концентрації рідкого холодоагенту на вході випарника  $\xi_X^{ВІХ} = 0,998$  кг/кг середня концентрація киплячого холодоагенту  $\xi_\phi$  збільшується з 0,8457 кг/кг до 0,9408 кг/кг. Це призводить до зниження температури кипіння холодоагенту  $\Theta_{МТР}$  з  $-5,81$  °С до  $-9,71$  °С. Як наслідок, збільшується середня різниця температур  $\Delta\Theta^{CP}$  з  $9,54$  °С до  $11,24$  °С та витрата пари холодоагенту  $M_Y^{ВІХ}$  з  $7,61$  т/год до максимального значення  $9,65$  т/год. За таких обставин температура охолодження ЦГ  $\Theta_{2Ц}$  знижується з  $-1,28$  °С до мінімальної  $-4,5$  °С, а значення холодопродуктивності  $\Phi_0$  та коефіцієнту теплопередачі  $K$  підвищуються до максимальних значень з  $2,24$  МВт до  $2,84$  МВт та з  $452,4$  Вт/(м<sup>2</sup>К) до  $485,5$  Вт/(м<sup>2</sup>К) відповідно. Це свідчить, як відомо [8], про досягнення критичного режиму бульбашкового кипіння холодоагенту. Зниження температури  $\Theta_{2Ц}$  на  $3,22$  °С шляхом керуючої дії по витраті флегми в результаті забезпечує зниження витрати природного газу майже на  $990$  тис.нм<sup>3</sup>/рік.

Подальше збільшення витрати флегми, наприклад, до  $0,6$  т/год, незважаючи на зниження температури кипіння  $\Theta_{МТР}$  до  $-10,7$  °С та збільшення середньої різниці температур  $\Delta\Theta^{CP}$  до  $11,69$  °С за умови обмеження по витраті холодоагенту на вході  $M_X^{ВІХ}$  викликає зменшення витрати пари холодоагенту  $M_Y^{ВІХ}$  до  $9,41$  т/год, коефіцієнту теплопередачі  $K$  до  $482$  Вт/(м<sup>2</sup>К) та холодопродуктивності до  $2,42$  МВт. Це обумовлено зменшенням ефективної поверхні теплообміну з  $520$  м<sup>2</sup> до  $448,2$  м<sup>2</sup>, що пояснюється встановленням перехідного режиму кипіння холодоагенту. За такого режиму на поверхні нагрівання спостерігається нестійка плівка пари, що хаотично пульсує та зростає зі збільшенням температурного напору. В окремих місцях поверхні виникають «сухі» плями, які немовби виключаються з теплообміну [8]. Тобто практично це рівнозначно зниженню рівня холодоагенту, а отже і ефективної поверхні теплообміну. Температура циркуляційного газу на виході випарника при встановленні перехідного режиму підвищиться на  $0,35$  °С, тобто до  $-4,15$  °С, що збільшить витрати природного газу майже на  $108$  тис.нм<sup>3</sup>/рік. Сезонна мінливість температури атмосферного повітря, що охолоджує конденсатор АХУ, призводить до коливання концентрації рідкого холодоагенту на вході випарника  $\xi_X^{ВІХ}$  в доволі широких межах. Як виходить з рис. 1 екстремальне (мінімальне) значення температури охолодження ЦГ  $\Theta_{2Ц}$

з підвищенням концентрації  $\xi_X^{BX}$  з 0,994 кг/кг до 0,996 кг/кг знижується з -3,8 °C до -4,1 °C за постійності тиску  $P_{MTP}=0,29$  МПа. При подальшому підвищенні концентрації до 0,998 кг/кг температура знижується ще на 0,4°C, тобто до -4,5 °C. При цьому відбувається зміщення у бік зменшення величини керуючої дії витрати флегми з 0,8 т/год до 0,6 т/год та подальше зменшення до 0,35 т/год, за якої забезпечується мінімальне значення  $\Theta_{2Ц} = -4,5$  °C. За такої умови холодопродуктивність збільшується з 2,69 МВт до 2,76 МВт та до 2,84 МВт відповідно, а річна витрата природного газу може бути знижена на 215 тис.нм<sup>3</sup> (за нормальних умов).

Найбільшими змінами характеризується концентрація аміаку у ЦГ  $a_{NH_3}^{BX}$  внаслідок застосування на стадії первинної конденсації повітряного охолодження. Підвищення ж цієї концентрації суттєво впливає на конденсаційний термічний опір [7], а отже і на температуру охолодження ЦГ. Зі зниженням концентрації  $a_{NH_3}^{BX}$  з 11 % об. до 10 % об. (рис. 2) відбувається зміщення екстремуму у бік зменшення керуючої дії витрати флегми, тобто з 0,4 т/год до 0,35 т/год. Це призводить до збільшення витрати пари холодоагенту з 9,6 т/год до 9,65 т/год. За таких умов спостерігаються екстремальні значення температури  $\Theta_{2Ц}$  відповідно на рівні -4,22 °C і -4,52 °C. При цьому холодопродуктивності досягають значень 2,8 МВт та 2,83 МВт. При подальшому зниженні концентрації ще на 1 %, тобто до 9 % об. керуюча дія витрати флегми зменшується та екстремум встановлюється на значенні 0,3 т/год. Витрата пари холодоагенту збільшується до 9,7 т/год, температура  $\Theta_{2Ц}$  опускається до мінімального значення -4,98 °C, а холодопродуктивність досягає максимуму на рівні 2,85 МВт. За такої умови річна витрата природного газу може бути знижена на 234 тис.нм<sup>3</sup> (за нормальних умов).



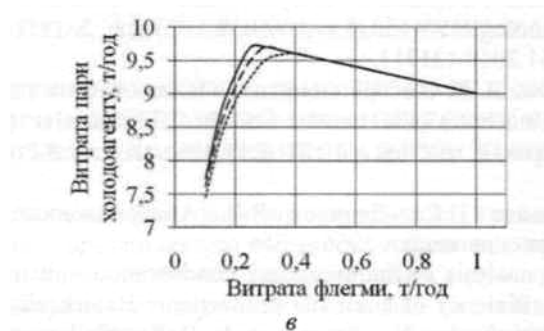


Рисунок 2 – Залежність показників ефективності роботи випарника АХУ від керуючої дії витрати флегми  $M_{\phi}$  за різних значень концентрації аміаку у ЦГ  $a_{NH_3}^{BX}$  на вході (—  $a_{NH_3}^{BX} = 9\%$  об.; - - -  $a_{NH_3}^{BX} = 10\%$  об., .....  $a_{NH_3}^{BX} = 11\%$  об.):  $a$  – температура охолодження ЦГ,  $\bar{b}$  – холодопродуктивність АХУ,  $\epsilon$  – витрата пари холодоагенту

За результатами досліджень доведена суттєвість впливу керуючої дії витрати флегми на роботу випарника блоку вторинної конденсації.

Встановлена закономірність екстремальної залежності від керуючої дії витрати флегми температури охолодження ЦГ, що свідчить про необхідність розробки системи оптимального програмного керування температурним режимом охолодження ЦГ.

Доведено, що застосуванням керуючої дії по витраті флегми можна досягти зниження витрати природного газу, а отже підвищити енергоефективність виробництва.

#### Висновки

За результатами математичного моделювання визначені закономірності керуючої дії витрати флегми на показники ефективності процесів теплообміну випарника АХУ блоку вторинної конденсації у виробництві аміаку.

Встановлено екстремальний характер залежності холодопродуктивності і температури охолодження ЦГ від витрати флегми.

Показано, що застосування керуючої дії по витраті флегми в умовах дії зовнішніх збурень забезпечить розв'язання задачі мінімізації температури охолодження ЦГ для підвищення енергоефективності виробництва.

#### Бібліографічний список

1. Бабиченко А.К. Повышение энергоэффективности блока вторичной конденсации агрегатов синтеза аммиака в условиях колебаний температуры атмосферного воздуха [Текст] / А.К. Бабиченко // Экология и промышленность. – 2012. – №1. – С.89-92.
2. Бабиченко А.К. Застосування математичного моделювання для діагностики показників ефективності процесів тепло- і масообміну в абсорберах тепловикористуючих холодильних установок агрегатів синтезу аміаку [Текст] / А.К. Бабиченко, В.І. Тошинський // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – №6. – С.107-111.
3. Сучасні методи автоматизації технологічних об'єктів [Текст] монографія / А.П. Ладанюк, О.А. Ладанюк, Р.О. Бойко, В.В. Івашук, Д.О. Кроніковський, Д.А. Шумигай. – К.: Інтер Логістик Україна, 2015 – 408 с.
4. Identification of heat exchange process in the evaporators of absorption refrigerating units under conditions of uncertainty / Babichenko A., Babichenko J.,

Velma S., Kravchenko Y., Krasnikov I., Lysachenko I. // Eastern–European Journal of Enterprise technologies. – 2018. – Vol. 1. – Issue 2 (91). P. 21-29. doi 10.15587/1729-4061.2018.121711.

5. Галимова Л. В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы: учебное пособие для специальности «Техника и физика низких температур» / Астрахан. гос. тех. ун-т. – Астрахань: Издательство АГТУ, 1997. – 226 с.

6. Бадилькес И.С., Данилов Р.Л. Абсорбционные холодильные машины. – М.: Пищепромиздат, 1966. – 356 с.

7. System analysis of the secondary condensation unit in the context of improving energy efficiency of ammonia production / Babichenko A., Velma V., Babichenko J., Kravchenko Y., Krasnikov I. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2. – Issue 6 (86). P. 18–26. doi: 10.15587/1729-4061.2017.96464.

8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

Рукопис надійшов до редакції 15.07.2018

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

**Кравченко Яна Олегівна** - аспірант кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; e-mail: [kravchenko\\_y\\_o@ukr.net](mailto:kravchenko_y_o@ukr.net); ORCID 0000-0002-6311-8060.

**Кравченко Яна Олегівна** - аспірант кафедри автоматизации технологических систем и экологического мониторинга Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; e-mail: [kravchenko\\_y\\_o@ukr.net](mailto:kravchenko_y_o@ukr.net); ORCID 0000-0002-6311-8060.

**Yana Kravchenko** - Post-graduate student, Department of Process Systems and Environmental Monitoring Automation, National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”; e-mail: [kravchenko\\_y\\_o@ukr.net](mailto:kravchenko_y_o@ukr.net); ORCID 0000-0002-6311-8060.

*Хімія і технологія виробництва основної хімічної промисловості Т. 79. 2019*

УДК 661.185:66.02

**М.О. ПОДУСТОВ, А.І. ДЗЕВОЧКО, А.П. ЗАКІН, О.М. ДЗЕВОЧКО**  
**РОЗРАХУНОК ТРУБЧАСТОГО ПЛІВКОВОГО РЕАКТОРА ДЛЯ**  
**СУЛЬФАТУВАННЯ СУМІШЕЙ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН,**  
**ЙОГО СТІЙКІСТЬ ТА ПАРАМЕТРИЧНА ЧУТЛИВІСТЬ**

*Стаття присвячена розрахунку плівкового трубчастого реактора сульфатування органічної сировини газоподібним триоксидом сірки. Проведено визначення основних конструктивних характеристик реактора, де критерієм оптимальності є ступінь сульфатування кінцевого продукту. Проведено аналіз параметричної чутливості та стійкості розрахованого реактора.*

**Ключові слова:** теплообмін, масообмін, сульфатування, органічна сировина, плівковий реактор, математична модель, стійкість, параметрична чутливість.