

Розробка інтелектуальної системи керування технологічним комплексом вторинної конденсації виробництва аміаку

А. К. Бабіченко, Я. О. Кравченко, Ю. А. Бабіченко, І. Г. Лисаченко,
І. Л. Красніков, В. І. Вельма

Проведено аналіз умов функціонування технологічного комплексу вторинної конденсації (ТКВК) типового агрегату синтезу аміаку серії АМ-1360 із застосуванням системно-керувального підходу. Визначені координати векторів керування та зовнішніх збурень. Розроблено алгоритм прогнозування координат вектора керування для підсистеми підтримки прийняття рішень в умовах дії зовнішніх збурень для такого складного інерційного об'єкта з великою теплоємністю як ТКВК.

Методом математичного моделювання за розробленим алгоритмом визначені закономірності та кількісні залежності впливу зовнішніх збурень, таких як температура первинної конденсації та витрата циркуляційного газу на ефективність процесів теплообміну ТКВК. Встановлена закономірність збільшення теплових потоків та координат вектора керування з підвищенням температури первинної конденсації. Визначена параметрична чутливість координат вектора керувань в умовах зміни температури первинної конденсації, яка у порівнянні із витратою циркуляційного газу перевищує її більш ніж у шість разів.

Виконана програмна реалізація алгоритму із застосуванням середовища MATLAB забезпечує завдяки вбудованій в нього клієнтської частини (ОРС-клієнт) вільний програмний доступ до поточних даних технологічного процесу. Розроблено функціональну структуру комп'ютерно-інтегрованої технології ТКВК із запропонованою підсистемою корекції в режимі супервізорного керування. Здійснена практична реалізація рішень щодо корекції додатковим апаратно-програмним забезпеченням на базі програмованого логічного контролера VIPA та SCADA-системи Zenon.

Впровадження розробленої системи забезпечує стабілізацію температури вторинної конденсації на регламентному рівні -5°C , що дозволяє знизити споживання природного газу майже на 1 млн.м³ на рік.

Ключові слова: виробництво аміаку, вторинна конденсація, енергоефективність, підсистема прийняття рішень, комп'ютерне керування.

1. Вступ

Сучасні виробництва аміаку становлять собою складні великотоннажні енерготехнологічні комплекси, які побудовані майже в усіх країнах за єдиною ідеологією фірми «M. W. Kellogg & Co» (США) [1, 2]. У відділенні синтезу цих виробництв найчастіше прийнята двохступенева система конденсації продукційного аміаку, яка відбувається за рахунок охолодження циркуляційного газу

(ЦГ). Для охолодження на стадії вторинної конденсації в агрегатах серії АМ-1360 застосовуються економічні тепловикористуючі абсорбційні (АХУ) та парожетторні (ПХУ) холодильні установки [3, 4]. Їх економічність забезпечується внаслідок можливості утилізації теплоти матеріальних потоків як низького (близько 140 °С) в АХУ, так і наднизького (до 90 °С) в ПХУ температурного потенціалу. Проте застосування на попередній стадії первинної конденсації апаратів повітряного охолодження обумовлює функціонування технологічного комплексу вторинної конденсації (ТКВК) під впливом постійних змін (сезонних і добових) зовнішнього теплового навантаження з ЦГ. Це призводить до значних коливань температурного режиму ТКВК та відхилень температури вторинної конденсації від регламентної норми -5 °С [5]. Підвищення ж цієї температури навіть на 1 °С в агрегатах синтезу АМ-1360 обумовлює зниження енергоефективності виробництва за рахунок збільшення річних витрат природного газу на 307,3 тис. нм^3 [6]. Тому необхідна стабілізація температурного режиму ТКВК на регламентному рівні.

Великотоннажність виробництва аміаку зумовлює і значну металоємність технологічного обладнання, а отже і надмірну інерційність теплообмінних процесів ТКВК. Все це суттєво ускладнює процес керування. Тому дослідження присвячені розробці високоякісної та надійної системи керування ТКВК в умовах дії зовнішніх збурень становлять актуальну проблему у загальному процесі підвищення енергоефективності виробництв аміаку.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [7] показано, що побудова високоякісної комп'ютерно-інтегрованої технології керування за існуючих умов функціонування ТКВК найбільш ефективно вирішується із застосуванням системного підходу. Один з основних аспектів цього підходу є системно-керувальний. Він має бути спрямований на вивчення ТКВК в умовах впливу зовнішніх і внутрішніх збурень для прийняття рішень щодо стабілізації температури вторинної конденсації на регламентному рівні не більше -5 °С.

Як відомо [8], основним елементом функціональної структури такої технології керування для прийняття рішень має бути ідентифікатор із закладеною математичною моделлю ТКВК. Комплекс ТКВК доволі складний і містить конденсаційну колону (КН), допоміжний теплообмінник (ТД), високотемпературний (ВВТ) з ПХУ та два низькотемпературні випарники (ВНТ) з водоаміачними АХУ [3]. Тому в процесі побудови математичної моделі, яка б могла передбачити результат або значення певних ситуацій (прогнозів) такого складного комплексу, виникають певні труднощі. Пов'язані вони з опрацюванням та виконанням багаторазових операцій із значним масивом поточної інформації [9]. Крім того, створення моделі додатково ускладнюється наявністю невизначеностей у функціонуванні ТКВК. Це обумовлено впливом зовнішнього теплового навантаження з ЦГ. Невизначеність, як встановлено в роботі [6], пов'язана з неможливістю безперервного автоматичного контролю концентрації аміаку у ЦГ, як на вході та і на виході ТКВК. Також відбувається зміна коефіцієнтів теплопередачі в апаратах комплексу. Як показано в роботі [10], це викликано змі-

ною конденсаційного термічного опору та в основному залежністю його від концентрації аміаку у ЦГ на вході [6].

Діапазон зміни на вході ТКВК температури ЦГ і концентрації аміаку у ЦГ складає відповідно $35 \div 45$ °С та $8,6 \div 13$ % об. За таких обставин буде змінюватись і температура ЦГ на вході ВВТ, що включений до схеми роботи аміачної ПХУ. Тому, як показано в роботі [11], необхідно застосування системи стабілізації температури ЦГ на рівні 30 °С з метою підтримання температури ЦГ на вході ВВТ на рівні 9 °С. Така система керування обумовить і стабілізацію температури вторинної конденсації (ЦГ на виході ВВТ) на регламентному рівні не більше – 5 °С незалежно від зміни зовнішнього теплового навантаження на вході ТКВК.

Суттєва металоємність обладнання та складність технологічного оформлення сприяє надмірній інерційності теплообмінних процесів. Особливо це стосується ТД і КН, загальна маса яких складає понад 400 тонн та характеризуються зворотним зв'язком по ЦГ. За таких обставин, ще в більшій мірі виникає необхідність у прогнозуванні режимних параметрів уставок регуляторів системи керування. Особливо це стосується ПХУ, у якій зміна холодопродуктивності, а отже і витрати холодоагенту до ВВТ здійснюється, як правило шляхом автонастроювання положення сопла та апаратів-конденсаторів повітряного охолодження (АПО) [12, 13]. Однак таке автонастроювання, що розглядається в цих роботах, занадто складна, трудомістка та дороговартісна в реалізації задача. До того ж, у таких великотоннажних виробництвах обов'язково має бути реалізоване резервування, тобто встановлення ще одного ежектора з автонастроюванням для підвищення надійності експлуатації. Тому доцільніше облаштування випарників ВВТ значно простішими ежекторами (наприклад, трьома) без автонастроювання. Це дозволить забезпечити вибіркоче включення їх в роботу за передбаченим значенням певної ситуації оператором в супервізорному режимі, що безумовно підвищить надійність технології керування. При цьому споживання одного з цих трьох АПО складає 200 кВт·год, який забезпечує конденсацію 10 т/год аміачної пари. Але питання, що пов'язані з розробкою особливо алгоритмічно-програмного забезпечення, залишилися невирішеними в сучасній літературі та у виробничих умовах. Тому задача підвищення надійності керування та можливості підготовки оператора до таких змін в режимі супервізорного керування вимагає розробки математичної моделі та алгоритмічно-програмного забезпечення для підсистеми підтримки прийняття рішень. Такий підхід дозволяє встановити як закономірності, так і кількісні залежності впливу зовнішнього теплового навантаження на ефективність процесів теплообміну ТКВК, інформація по яких практично відсутня в періодичних виданнях. За рахунок цих досліджень стане можливим завчасно здійснювати оцінку прогнозів можливих змін температури ЦГ на вході ВВТ в умовах існуючих невизначеностей, а отже і чисельних показників (уставок U) векторів керування.

Отже задача моделювання і прогнозування з метою автоматичного пошуку прихованих закономірностей та взаємозв'язків між змінними у великих масивах даних становлять собою складний багатоступеневий процес. Всі ці задачі, як відомо [14], мають всі ознаки інтелектуальної системи.

В агрегатах серії АМ-1360 застосовується інформаційно-керуючий комплекс (ІКК) TDC-3000 виробництва США [15]. Цей комплекс охоплює як польовий, так і технологічний рівень керування виробництвом. Проте, його апаратно-програмне забезпечення розроблялось для так званих систем «закритого» типу. Такі ІКК не передбачають можливості модернізації виробництва на основі новітніх технологій синтезу аміаку без додавання або інтегрування додаткових та допоміжних систем управління. Тобто, додавання нових алгоритмів та засобів автоматизації не передбачено. Як наслідок, модернізація таких ІКК суттєво ускладнена.

Таким чином задачі розробки алгоритмічно-програмного забезпечення підсистеми підтримки прийняття рішень системи керування та дообладнання її апаратними засобами набувають особливої актуальності у загальному процесі підвищення економічності виробництва за рахунок стабілізації температури вторинної конденсації. Крім того, постає завдання комплексування існуючої системи керування зі вказаною підсистемою.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою досліджень є створення алгоритмічного та апаратно-програмного забезпечення підсистеми підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності комп'ютерно-інтегрованої технології керування ТКВК стосовно агрегатів синтезу серії АМ-1360. Це забезпечить підвищення надійності та якості керування процесом в умовах невизначеності. За рахунок цього підвищиться енергоефективність виробництва внаслідок стабілізації температури вторинної конденсації на регламентному рівні не більше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ незалежно від діючих на ТКВК зовнішніх збурень.

Для виконання поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити алгоритмічно-програмне забезпечення для підсистеми підтримки прийняття рішень за існуючих невизначеностей щодо ТКВК;
- визначити параметричну чутливість та координати вектора керування на базі розробленого алгоритмічно-програмного забезпечення за реально діючих змін зовнішнього теплового навантаження на вході ТКВК;
- визначити функціональну та розробити програмно-технічну структуру комп'ютерної технології керування контурами витрати холодоагенту до ВВТ та МЕА розчину до парогенератора ПХУ;
- розробити структурно-логічну схему інформаційних потоків комп'ютерно-інтегрованої технології керування ТКВК «відкритого» типу.

4. Матеріали та методи досліджень

Дослідження проводились методом математичного моделювання. Для цього були використані рівняння математичного опису теплообмінника ТД, випарника ВВТ, підпрограми розрахунку коефіцієнтів теплопередачі та концентрації аміаку у ЦГ на вході $a_{\text{NH}_3}^{\text{BX}}$ та виході $a_{\text{NH}_3}^{\text{BIX}}$ ТКВК за розробленими та перевіреними на адекватність алгоритмами. Алгоритми розташовані у файлах STAB, STOCH і DANI та отримані за результатами попередніх досліджень [6, 16].

Визначення кількісних залежностей показників уставок регуляторів витрати холодоагенту до ВВТ та МЕА розчину до парогенератора ПХУ від діючих зовнішніх збурень на вході ТКВК здійснювалось за допомогою спеціально розробленого алгоритму. Програмна реалізація алгоритму становить основу підсистеми підтримки прийняття рішень.

5. Результати досліджень впливу зовнішніх збурень на координати вектора керування та розробки системи керування

5.1. Розробка алгоритмічно-програмного забезпечення для підсистеми підтримки прийняття рішень

Узагальнена блок-схема розробленого алгоритму наведена на рис. 1, програмна реалізація якого була виконана в пакеті MATLAB R2014a (The MathWorks, USA).

Позначення, що наведені на рис. 1, відповідають наступним фізичним величинам: K_E^D , K_P^D – коефіцієнти теплопередачі для ТД відповідно дійсний та розрахований за формулами прийнятими при проектуванні, Вт/(м²·К); $M_{СК}^{TD}$ – витрата сконденсованого аміаку у потоці ЦГ міжтрубного простору ТД, кг/с; $M_{ТР}^D$, $M_{ТР}^{DG}$, $M_{Ж}^{DVX}$ – витрата відповідно загальна ЦГ, газової суміші ЦГ на виході та рідкого аміаку на вході трубного простору ТД, кг/с; $C_{ТР}^{DG}$ – середня теплоємність газової суміші ЦГ, кДж/(кг·К); $i_{Ж}^{DVX}$, $i_{П}^{DVIX}$ – відповідно ентальпії рідкого аміаку на вході та пари аміаку на виході трубного простору ТД, кДж/кг; $\Theta_{ТР}^K = 17,5$ °С – температура ЦГ на вході трубного простору ТД, яка забезпечується температурою ЦГ на вході КН на рівні $\Theta_{2Ц}^{BT} = 30$ °С і температурою ЦГ на виході ВНТ $\Theta_{ТР}^{BHT} = -5$ °С; $\Delta\Theta$ – крок наближення, °С; $a_{NH_3}^{DTP}$ – об'ємна концентрація аміаку у ЦГ на виході трубного простору ТД, об. дол.; $\Theta_{ТР}^D$ – температура ЦГ на виході трубного простору ТД, °С; $\Phi_{ТР}^D$, $\Phi_{МТР}^D$ – відповідно тепловий потік з боку трубного та міжтрубного простору ТД, МВт; $\Theta_{МТР}^D$, $\Theta_{1Ц}^{BT}$ – відповідно температури ЦГ на вході та виході міжтрубного простору ТД, °С; $M_{МТР}^{DG}$, $M_{Ж}^D$, $M_{СК}$ – відповідно кількість газової суміші на виході міжтрубного простору ТД, сконденсованого та рідкого аміаку у міжтрубному просторі ТД, кг/с; $C_{МТР}^{DC}$, $C_{Ж}^D$ – відповідно середня теплоємність газової суміші ЦГ міжтрубного простору ТД та рідкого аміаку, кДж/(кг·К); $r_{МТР}^D$ – питома теплота конденсації аміаку у міжтрубному просторі ТД, кДж/кг; $\Delta\Theta_{CP}^D$ – середньологарифмічна різниця температур ТД, °С; $\alpha_{ТР}^D$, $\alpha_{МТР}^D$ – коефіцієнти тепловіддачі відповідно з боку трубного і міжтрубного простору ТД, що розраховані за рівняннями Краусольда, прийнятими при проектуванні, Вт/(м²·К); Φ_T^D – тепловий потік за рахунок теплообміну у ТД, МВт; M_{BT}^{BX} , $M_{МЕА}$, $M_{П}$ – витрата відповідно холодоагенту на вході міжтрубного простору ВВТ, МЕА розчину до парогенератора ПХУ та робочої пари на ежектори ПХУ, кг/с; $M_{3Г}$ – загальна кількість аміачної пари на повітряні кон-

денсатори ПХУ (робоча пара та пара холодоагенту), кг/с; Φ_{BT} – тепловий потік (холодопродуктивність) ВВТ, МВт, N – споживча потужність електроенергії на привод вентиляторів АПО для конденсації робочої пари та пари холодоагенту в ПХУ, кВт·год.

Алгоритм містить цикли збіжності, які забезпечують вимірювання теплових потоків з боку трубного Φ_{TP}^D та міжтрубного Φ_{MTP}^D простору і в процесі теплообміну Φ_T^D апарату ТД для визначення температури ЦГ на виході його міжтрубного простору Θ_{IC}^{BT} . При цьому алгоритм підпрограми СТАВ дозволяє сформувати стабільний інформаційний масив поточних даних та відокремити перехідні режими. Це забезпечує можливість розрахунку дійсного коефіцієнта теплопередачі K_E^D . Далі за допомогою підпрограми стохастичної апроксимації STOCH здійснюється перевірка умов стаціонарності, відтворюваності процесу та гіпотези про нормальність емпіричного розподілу. За результатами такої перевірки встановлюються функціональні залежності для чисельної оцінки невизначеностей об'ємних концентрацій аміаку у ЦГ на вході $a_{NH_3}^{BX}$ та виході $a_{NH_3}^{DTP}$ ТКВК. При цьому чисельна оцінка невизначеності загального коефіцієнту термічного опору R_T^{ED} з урахуванням конденсаційного здійснювалась за отриманим масивом експериментальних даних. В процесі апробації алгоритму використовувались наступні функціональні залежності для чисельної оцінки цих невизначеностей, що отримані за експериментальними даними промислової експлуатації ТКВК в попередніх роботах [3, 6], а саме:

$$a_{NH_3}^{BX} = 22,068 - 0,6272 P_{PK} + 0,05245 \Theta_{PK}; \quad (1)$$

$$a_{NH_3}^{DTP} = -7,78 + 0,0244 V_{ABC} + 0,01176 V_{MTP}^{II} + 0,0327 (\Theta_{TP}^{BHT} + 273) + 0,085 a_{NH_3}^{BX} - 0,0635 P_{IC}; \quad (2)$$

$$R_T^{ED} = \left[\begin{array}{c} 76,64 - 9,40232 M_{CK}^{TD} + \\ +1,66742 (M_{CK}^{TD})^2 \end{array} \right] \cdot 10^{-5}, \quad (3)$$

де V_{ABC} , V_{MTP}^{II} – витрата відповідно азотно-водневої суміші та ЦГ на вході ТКВК, $\text{м}^3/\text{с}$; P_{IC} – тиск ЦГ на вході ТКВК, МПа; M_{CK}^{TD} – витрата сконденсованого аміаку, т/год.

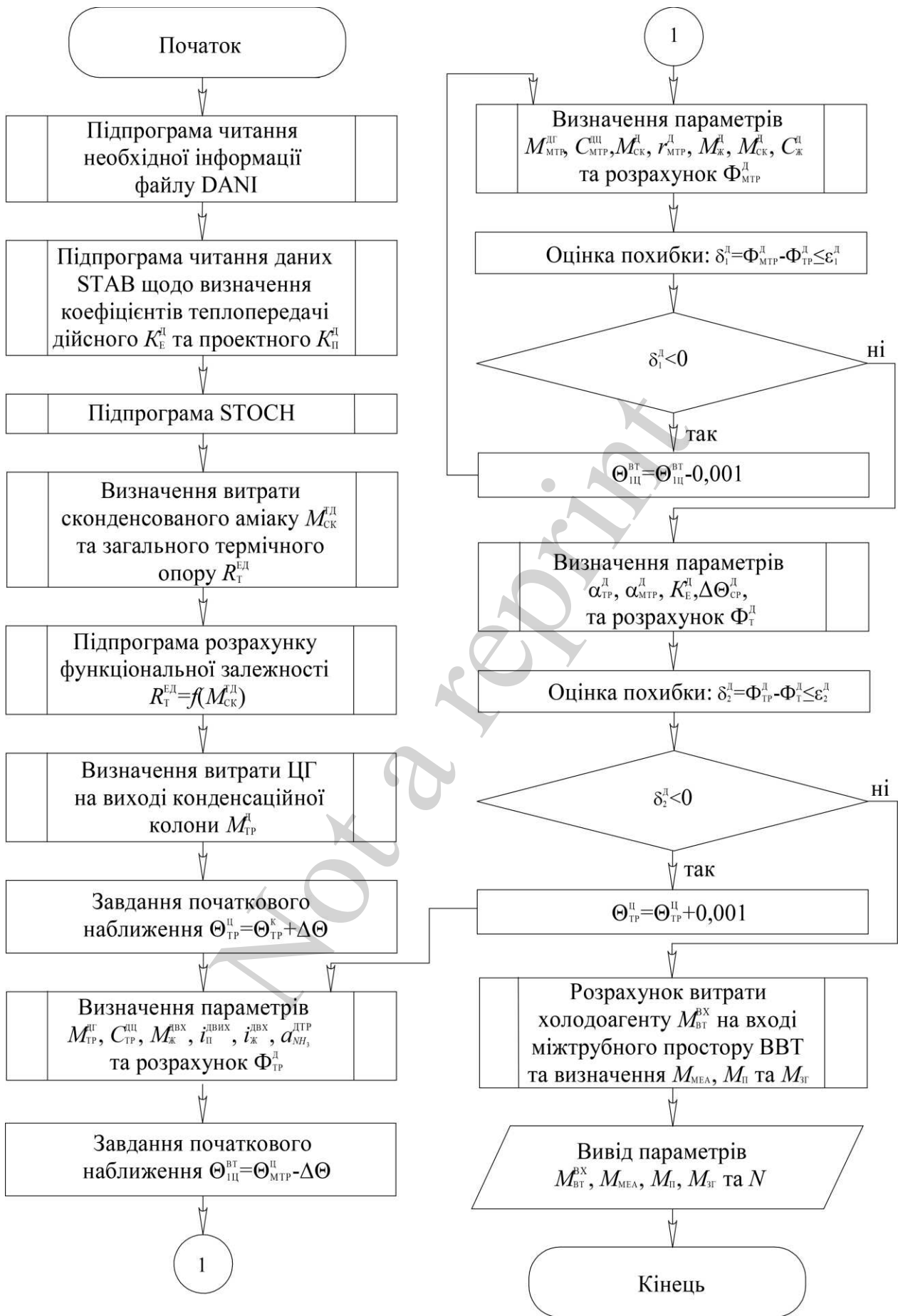


Рис. 1. Блок-схема алгоритму досліджень щодо чисельної оцінки показників уставок регуляторів витрати

Наприкінці за встановленою температурою $\Theta_{1Ц}^{BT}$ визначаються послідовно уставки регуляторів. Серед них слід виділити наступні: витрати холодоагенту M_{BX}^{BT} (кг/с) на вході міжтрубного простору ВВТ; робочої аміачної пари $M_{П}$ (кг/с) до ежекторів ПХУ; МЕА розчину $M_{МЕА}$ (кг/с) для отримання цієї пари; загального навантаження по аміачній парі $M_{ЗГ}$ (кг/с) на повітряні конденсатори ПХУ. Визначення цих витрат здійснюється за наступними формулами:

$$M_{BX}^{BT} = \frac{M_{TP}^{BT} C_{TP}^{ГЦ} (\Theta_{1Ц}^{BT} - \Theta_{2Ц}^{BT}) + M_{СК}^{BT} r_{СК} + (M_{Ж}^{BT} - 0,5 M_{СК}^{BT}) C_{Ж}^{BT} (\Theta_{1Ц}^{BT} - \Theta_{2Ц}^{BT})}{r_{X} - (\Theta_{X1} - \Theta_{X2}) C_{NH_3}^{Ж}}; \quad (4)$$

$$M_{МЕА} = \frac{M_{П} r_{П}}{C_{МЕА} (\Theta_{МЕА1} - \Theta_{МЕА2})}; \quad (5)$$

$$M_{П} = \frac{M_{BX}^{BT}}{u}; \quad (6)$$

$$M_{ЗГ} = M_{П} + M_{BX}^{BT}, \quad (7)$$

де $C_{TP}^{ГЦ}$, $C_{Ж}^{BT}$ – відповідно середня теплоємність газової суміші ЦГ та рідкого аміаку трубного простору ВВТ, кДж/(кг·К); $r_{СК}$, r_{X} – теплота конденсації та пароутворення аміаку у трубному та міжтрубному просторі ВВТ, кДж/кг; $M_{СК}^{BT}$ – витрата сконденсованого аміаку у трубному просторі ВВТ, кг/с; $\Theta_{X1}=35$ °С, $\Theta_{X2}=24$ °С, $\Theta_{МЕА1}=85$ °С, $\Theta_{МЕА2}=75$ °С – температура відповідно холодоагенту (аміаку) на вході ВВТ, кипіння холодоагенту у міжтрубному просторі ВВТ, вхідна та вихідна температура МЕА розчину [3]; $u=0,4$ – коефіцієнт інжекції [3]; $r_{П}$ – питома теплота пароутворення аміаку при температурі 65 °С і тиску 3 Мпа, кДж/кг; $C_{МЕА}$ – питома теплоємність МЕА розчину, кДж/(кг·К); $C_{NH_3}^{Ж}$ – питома теплоємність рідкого аміаку, кДж/(кг·К).

На завершальному етапі алгоритму здійснюється формування масиву поточних даних PSPR алгоритму підтримки прийняття рішень, зокрема щодо $M_{П}$, $M_{МЕА}$, M_{BX}^{BT} , $M_{ЗГ}$ і N .

5. 2. Визначення параметричної чутливості та координат вектора керування за реально діючих зовнішніх збурень

Оцінка параметричної чутливості щодо впливу таких збурюючих факторів як температура первинної конденсації та витрата ЦГ на параметри уставок регуляторів здійснювалась з використанням безрозмірного коефіцієнту K_{Zi} , який визначається наступною формулою:

$$K_{Z_i} = \frac{(M_{i1} - M_{i2})}{M_{i1}} \cdot \frac{Z_{i1}}{(Z_{i1} - Z_{i2})}, \quad (8)$$

де M_{i1}, M_{i2} – координата вектора керування відповідно за збурюючого фактору Z_{i1} та Z_{i2} .

Математичне моделювання за розробленим алгоритмом дозволяє дослідити закономірності впливу найбільш характерних для промислових умов змінних вектора зовнішніх збурень $Z(t)$ на вектор керувань $Y(t)$ з метою стабілізації температури вторинної конденсації на регламентному рівні -5 °С. Переходячи до простору змінних, ці вектори будуть мати наступний вигляд:

$$Z(t) = \begin{bmatrix} \Theta_{\text{ПК}} \\ V_{\text{МТР}}^{\text{Ц}} \end{bmatrix}; \quad Y(t) = \begin{bmatrix} M_{\text{ВХ}}^{\text{ВТ}} \\ M_{\text{МЕА}} \\ M_{\text{П}} \\ N \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Слід відзначити, що обмеження при дослідженнях обумовлені діапазоном зміни координат в процесі розробки математичної моделі ТКВК. На рис. 2 представлені окремі результати досліджень щодо впливу температури первинної конденсації $\Theta_{\text{ПК}}$ на ефективність процесу теплообміну ТКВК на показники координат вектора керувань за наступних обмежень: $V_{\text{МТР}}^{\text{Ц}} = 639,23 \cdot 10^3$ нм³/год; $P_{\text{ПК}} = 22$ МПа – тиск ЦГ; $a_{\text{H}_2}^{\text{МТР}} = 55,7$ % об; $a_{\text{CH}_4}^{\text{МТР}} = 8,4$ % об; $a_{\text{N}_2}^{\text{МТР}} = 18,9$ % об; $a_{\text{Ar}}^{\text{МТР}} = 6,9$ % об; $a_{\text{NH}_3}^{\text{МТР}} = 10,16$ % об; $V_{\text{АВС}} = 174 \cdot 10^3$ нм³/год; $\Theta_{\text{АВС}} = 35$ °С; $\Theta_{\text{ТР}}^{\text{К}} = 17,5$ °С, $\Theta_{\text{2Ц}}^{\text{ВТ}} = 30$ °С, $\Theta_{\text{ТР}}^{\text{ВНТ}} = -5$ °С, $\Theta_{\text{МТР}}^{\text{КН}} = 9,2$ °С – відповідно температура ЦГ на вході трубного простору ТД, на вході КН, на виході ВНТ та на виході міжтрубного простору КН [3].

На рис. 3 наведені результати досліджень щодо впливу витрати ЦГ на вході ТД $V_{\text{МТР}}^{\text{Ц}}$ на ефективність процесу теплообміну ТКВК та показники координат вектора керувань. Результати цих досліджень виконані за перелічених вище обмежень, температури $\Theta_{\text{ПК}} = 36$ °С та тиску $P_{\text{ПК}} = 22$ МПа.

В табл. 1 наведені результати оцінки параметричної чутливості координат вектора керувань до зміни збурюючих факторів, виконаних за (8).

Таблиця 1

Параметрична чутливість координат вектора керування M_i до зміни координат вектора збурень Z_i

Коефіцієнт параметричної чутливості	Межі зміни координат вектора керування за відповідних координат вектора збурень Z_i		
	$\Delta M_{\text{ВХ}}^{\text{ВТ}}$ (2,96÷8,41) т/год,	$\Delta M_{\text{ВХ}}^{\text{ВТ}}$ (7,25÷8,45) т/год,	ΔN (200÷600) кВт·год
	$\Delta M_{\text{МЕА}}$ (191÷541,3) т/год	$\Delta M_{\text{МЕА}}$ (467,5÷543,1) т/год	
	$\Delta \Theta_{\text{ПК}}$ (32÷36) °С	$\Delta V_{\text{МТР}}^{\text{Ц}}$ (600÷640) · 10 ³ нм ³ /год	$\Delta \Theta_{\text{ПК}}$ (32÷36) °С
K_{Z_i}	14,7	2,43	16

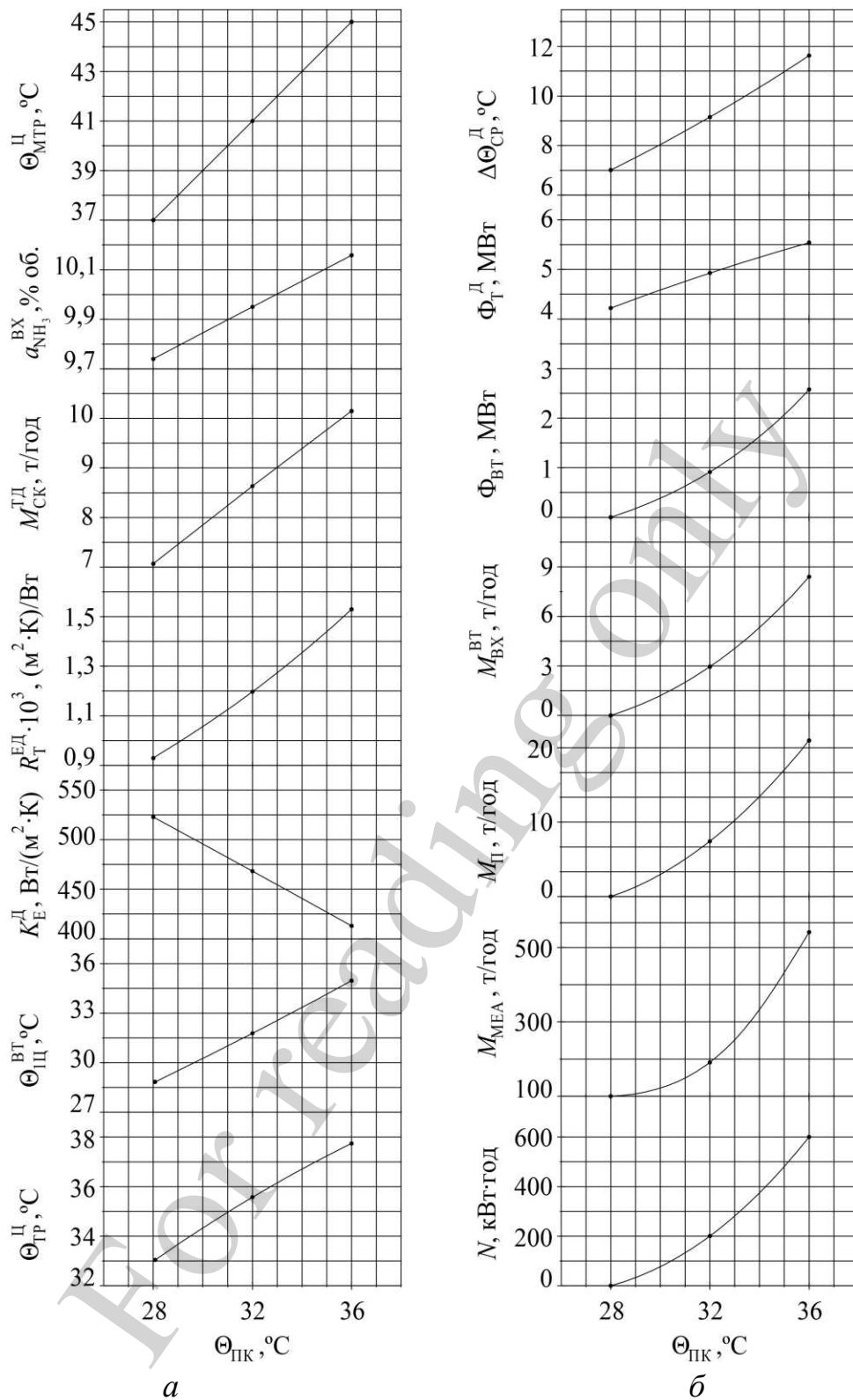


Рис. 2. Залежність показників ефективності теплообміну технологічного комплексу вторинної конденсації та координат вектора керувань від зміни температури $\Theta_{ПК}$: *a* – температури $\Theta_{МТР}^{Ц}$ циркуляційного газу на вході міжтрубного простору додаткового теплообмінника, концентрації аміаку $a_{NH_3}^{BX}$ у циркуляційному газі на вході комплексу, витрати сконденсованого аміаку $M_{СК}^{ТД}$ у потоці циркуляційного газу міжтрубного простору додаткового теплообмінника, зага-

льного коефіцієнту термічного опору R_T^{ED} , дійсного коефіцієнта теплопередачі K_E^D , температури циркуляційного газу на виході міжтрубного простору додаткового теплообмінника, температури циркуляційного газу на виході трубного простору додаткового теплообмінника Θ_{TP}^D ; b – середньологарифмічної різниці температур $\Delta \Theta_{CP}^D$ додаткового теплообмінника, теплового потоку Φ_T^D за рахунок теплообміну у додатковому теплообміннику, теплового потоку (холодопродуктивності) Φ_{BT} високотемпературного випарника, витрати холодоагенту на вході міжтрубного простору M_{BT}^{BX} високотемпературного випарника, витрати робочої пари M_{II} на ежектори пароежекторної холодильної установки, витрати моноетаноламінового розчину M_{MEA} до парогенератора пароежекторної холодильної установки, споживчої потужності електроенергії N на привод вентиляторів апаратів повітряного охолодження для конденсації робочої пари та пари холодоагенту в пароежекторній холодильній установці

При цьому межі зміни координат вектора збурень обирались на рівні, що найбільш притаманні для літнього і зимового сезонів експлуатації ТКВК.

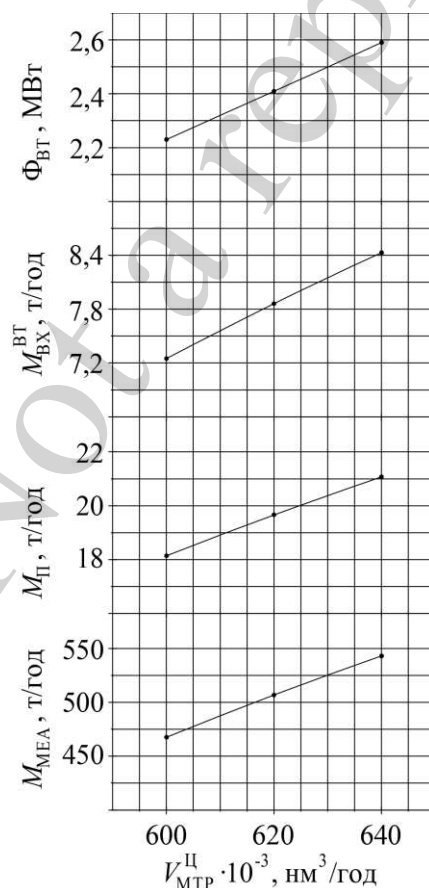


Рис. 3. Залежність необхідної холодопродуктивності та координат вектора керувань від зміни витрати циркуляційного газу на вході V_{MTP}^D за постійної температури первинної конденсації $\Theta_{ПК}=36$ °С, що характеризує найважчий літній сезон теплового навантаження

5.3. Розроблення функціональної та програмно-технічної структури системи керування технологічним комплексом

Реалізація комп'ютерної технології керування ТКВК виконана на основі трирівневої ієрархічної структури. Загальна структура системи управління контуром витрати матеріальних потоків та електроенергії представлена на рис. 4.



Рис. 4. Загальна структура системи управління контуром витрати матеріальних потоків $M_{ВХ}^{ВТ}$, $M_{МЕА}$, $M_{П}$ та електроенергії N

Ієрархічна будова системи управління контуром витрати матеріальних потоків та електроенергії зумовлює використання на першому та другому рівнях існуючих апаратно-програмних засобів. На третьому рівні блок людино-машинного інтерфейсу складається з трьох модулів. Ці модулі забезпечують корегування та моделювання процесів та з'єднані з базою даних реального часу.

На рис. 5 зображена програмно-технічна структура автоматизованої системи керування ТКВК з підсистемою корекції.

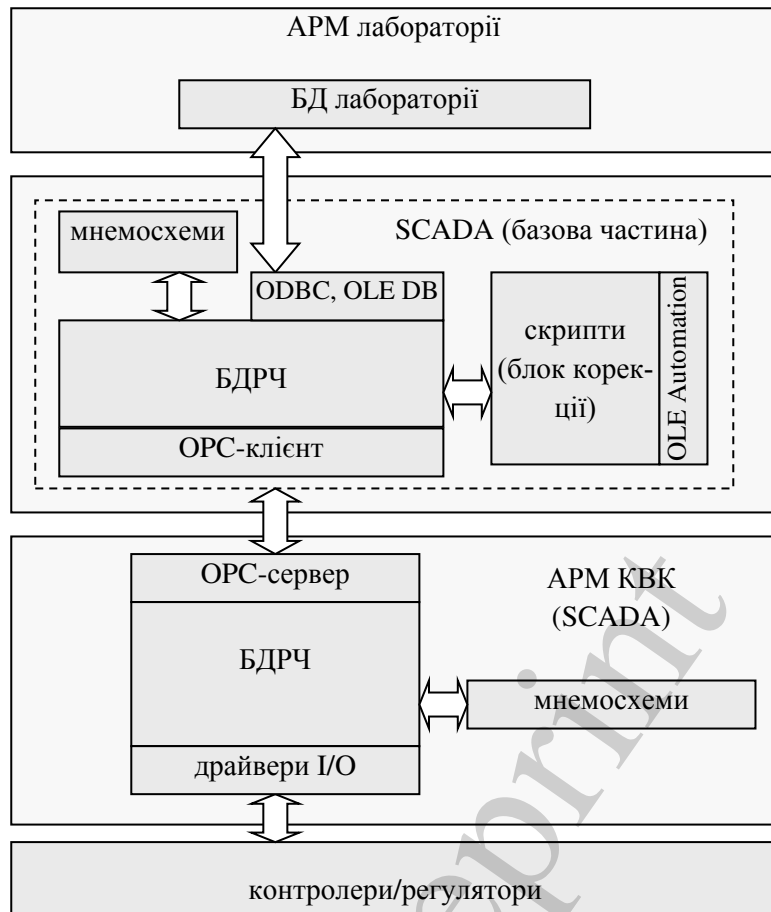


Рис. 5. Програмно-технічна структура автоматизованої системи керування технологічного комплексу вторинної конденсації із підсистемою корекції

Обмін даними забезпечується за допомогою використання «відкритих» інформаційних технологій OPC та ODBC. Це надає можливість створення підсистеми корекції режимів функціонування та інтегрування її в єдину інформаційно-керуючу систему.

Таким чином, програмно-технічна структура типової автоматизованої системи керування ТКВК з підсистемою корекції має вигляд, як це зображено на рис. 5.

5.4. Розробка структурно-логічної схеми інформаційних потоків комп'ютерної системи керування «відкритого» типу

Функціонування інформаційної взаємодії між основними вузлами, які забезпечують якість продукту, показано на рис. 6 у вигляді схеми мережних інформаційних потоків фрагменту комп'ютерно-інтегрованої технології ТКВК. Будова схеми, яка представлена на рис. 6 надає можливість наглядно продемонструвати обмін даними між вузлами в мережі, а також механізми і технології, які використовуються при його реалізації.

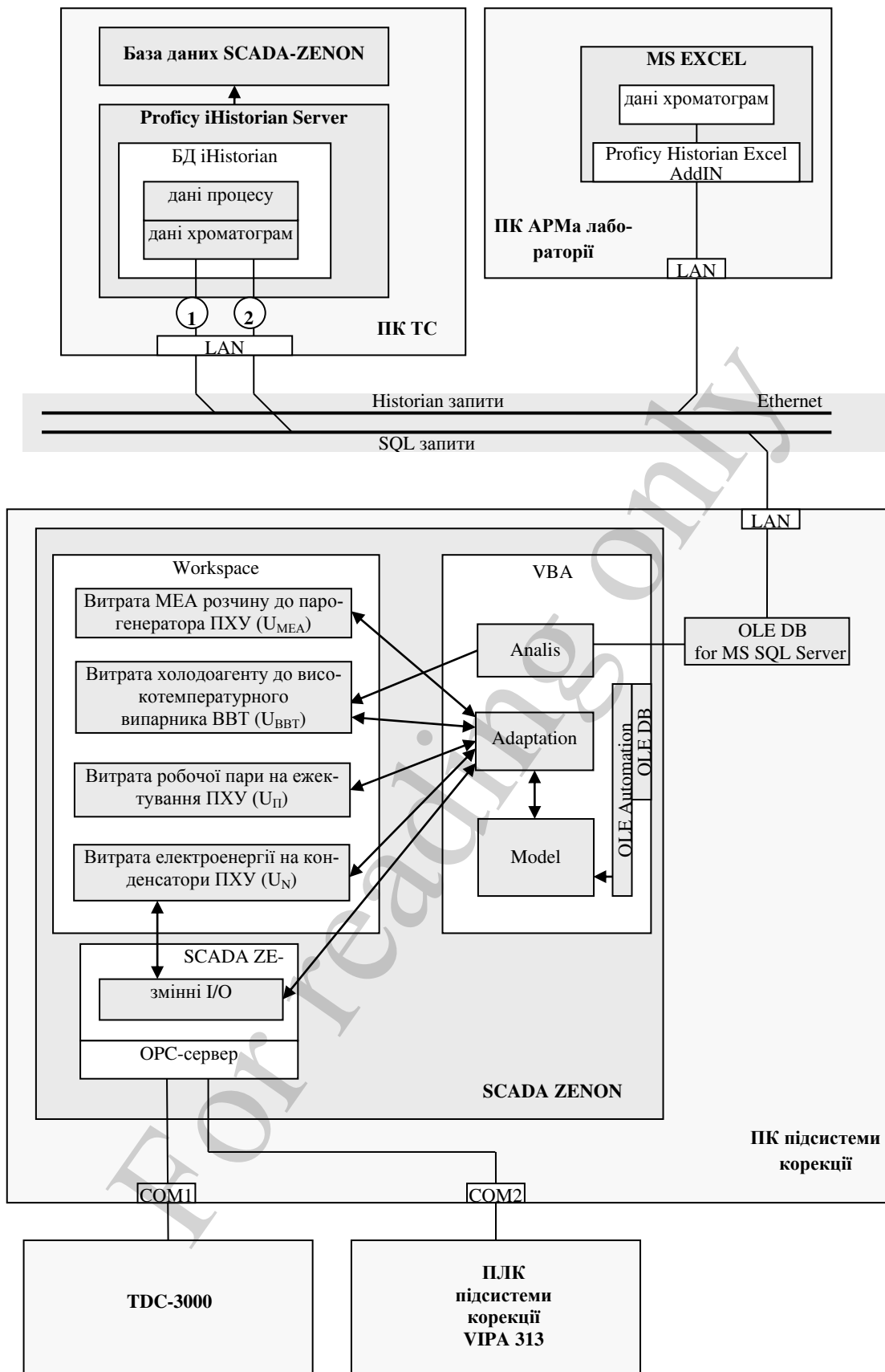


Рис. 6. Схема мережних інформаційних потоків фрагменту комп'ютерно-інтегрованої технології комплексу вторинної конденсації

Відповідно до рис. 6 інформаційні потоки з'єднують вузли підсистеми корекції, бази даних та лабораторії на верхньому рівні за допомогою локальної мережі Ethernet. При цьому первинні дані від системи керування TDC-3000 та додаткового контролера VIPA підсистема отримує послідовним інтерфейсом RS-485 за допомогою спеціального мережного обладнання.

6. Обговорення результатів досліджень щодо впливу координат вектора збурень на координати вектора керувань

За результатами досліджень методом математичного моделювання за розробленим алгоритмом (рис. 1) отримані залежності, які наведені на рис. 2, характеризують вплив температури первинної конденсації $\Theta_{ПК}$ на теплове навантаження ТКВК. При цьому збільшення $\Theta_{ПК}$ одночасно впливає як на підвищення концентрації аміаку $a_{NH_3}^{BX}$ у ЦГ згідно рівняння (1), так і температури ЦГ на вході $\Theta_{МТР}^H$. Крім того остання ще в більшій мірі збільшується внаслідок стиску ЦГ компресором, що розташований поміж стадіями первинної та вторинної конденсації.

Так, наприклад, з підвищенням температури $\Theta_{ПК}$ з 32 °С до 36 °С температура $\Theta_{МТР}^H$ збільшується з 41 °С до 45 °С, а концентрація аміаку у ЦГ $a_{NH_3}^{BX}$ – з 9,95 % об. до 10,16 % об. Збільшення останньої обумовлює згідно рівняння (2) і підвищення концентрації $a_{NH_3}^{ДТР}$ на виході трубного простору ТД з 3,69 % об. до 3,71 % об. В свою чергу збільшення $a_{NH_3}^{BX}$ призводить до підвищення кількості сконденсованого аміаку $m_{СК}^{ТД}$ у потоці ЦГ, що проходить міжтрубний простір ТД, з 8,63 т/год до 10,15 т/год. Завдяки цьому відбувається згідно рівняння (3) збільшення загального термічного опору $R_T^{ЕД}$ з 0,001197 (м²·К)/Вт до 0,001531 (м²·К)/Вт, що обумовлює зниження коефіцієнту теплопередачі $K_E^Д$ з 468,13 Вт/(м²·К) до 413,11 Вт/(м²·К). За таких обставин підвищуються температури на виході міжтрубного простору ТД $\Theta_{1Ц}^{BT}$ та трубного простору $\Theta_{ТР}^H$ відповідно з 31,78 °С до 34,97 °С та з 35,58 °С до 37,74 °С, тобто на 3,19 °С і 2,13 °С. За такого розподілу температур незважаючи на зниження коефіцієнту теплопередачі суттєво збільшується середньологарифмічна різниця температур $\Theta_{СР}^Д$ з 9,15 °С до 11,63 °С, що забезпечує збільшення теплового потоку $\Phi_T^Д$ з 4,93 МВт до 5,54 МВт.

Підвищення температури ЦГ $\Theta_{1Ц}^{BT}$ на вході ВВТ для стабілізації температури ЦГ $\Theta_{2Ц}^{BT}$ на виході ВВТ на рівні 30 °С вимагає збільшення холодопродуктивності ВВТ з 0,91 МВт до 2,58 МВт. В свою чергу це викликає необхідність збільшення витрати холодоагенту $m_{ВХ}^{BT}$ до ВВТ з 2,96 т/год до 8,4 т/год. Для забезпечення такого збільшення $m_{ВХ}^{BT}$ має бути підвищена витрата робочої пари $M_{П}$ з 7,41 т/год до 21 т/год на ежектори, що вимагає збільшення витрати МЕА розчину $m_{МЕА}$ з 191 т/год до 541,34 т/год до парогенератора ПХУ. При цьому збільшиться загальне навантаження аміачної пари $M_{ЗГ}$ на повітряні конденсатори ПХУ з 10,37 т/год до 29,4 т/год, що обумовлює необхідність у збільшенні кільк-

кості працюючих вентиляторів АПО з одного до трьох. Внаслідок цього споживання електроенергії N має бути збільшено з 200 кВт·год до 600 кВт·год, тобто будуть включені в роботу усі три повітряні вентилятори АПО. У випадку зниження температури $\Theta_{\text{ПК}}$ до 28 °С, що спостерігається при температурі атмосферного повітря менше 5 °С, має бути взагалі зупинена робота ПХУ. За таких обставин охолодження ЦГ до регламентної температури $\Theta_{\text{ТР}}^{\text{ВНТ}} = -5$ °С буде забезпечуватись тільки у випарниках ВНТ з АХУ.

Витрата ЦГ на вході $V_{\text{МТР}}^{\text{Ц}}$ внаслідок можливих виробничих вимог зміни продуктивності агрегату синтезу аміаку також впливає на теплове навантаження ТКВК. Як виходить з рис. 3 в умовах підвищення витрати ЦГ $V_{\text{МТР}}^{\text{Ц}}$ з 600 тис.нм³/год до 640 тис.нм³/год координати вектора керувань витрати $M_{\text{МЕА}}$, $M_{\text{П}}$ і $M_{\text{ВХ}}^{\text{ВТ}}$ збільшуються відповідно на 75,57 т/год, 2,93 т/год і 1,18 т/год. Це обумовлено необхідністю незначного підвищення холодопродуктивності $\Phi_{\text{ВТ}}$ на 0,36 МВт випарника ВВТ внаслідок збільшення температури $\Theta_{\text{ЦЦ}}^{\text{ВТ}}$ на його вході лише на 0,4 °С. Такі незначні збільшення перелічених показників пов'язані з невеликим підвищенням кількості сконденсованого аміаку $M_{\text{СК}}^{\text{ТД}}$ на 0,25 т/год, збільшенням загального термічного опору $R_{\text{Т}}^{\text{ЕД}}$ на 0,00007 (м²·К)/Вт та зниженням коефіцієнту теплопередачі $K_{\text{Е}}^{\text{Д}}$ на 4,9 Вт/(м²·К). Характер впливу цих показників достатньо обґрунтовано попереднім поясненням, а тому на рис. 3 ці залежності не представлено. За таких обставин експлуатація ПХУ має здійснюватись з максимальним навантаженням і особливо це стосується вентиляторів з АПО.

Проведений аналіз результатів досліджень, наведених на рис. 2, 3 та представлених у табл. 1, пояснює надмірну величину параметричної чутливості вектора керування в умовах зміни температури первинної конденсації, яка у порівнянні з витратою ЦГ на вході ТКВК перевищує більш ніж у шість разів.

Розроблене для прогнозування режимів функціонування таких металоємних, а отже занадто інерційних об'єктів як ТКВК в умовах зміни координат вектора збурень дозволяє використати його у підсистемі підтримки прийняття рішень за існуючих невизначеностей. Ця підсистема є однією з основних складових у загальній технічній структурі комп'ютерної технології керування процесом вторинної конденсації виробництва аміаку [11]. Однак реалізація цієї структури вимагає удосконалення існуючої системи керування на базі TDC-3000 доступними апаратно-програмними засобами «відкритого» типу.

Блок (ЛМІ) (рис. 4) передбачає три модулі. Модуль введення нових даних дозволяє у зручному для оператора вигляді модифікувати таблиці з даними для нових компонентів. Модуль налаштування моделі призначений для ручного введення необхідних конструктивних даних по випарникам, конденсаційній колоні і теплообміннику та запуску процесу проведення перевірки повної адекватності моделей. Графічні екрани забезпечують більш детальний аналіз всієї інформації щодо процесу вторинної конденсації призначені лише для оператора підсистеми.

Відокремлення блоків корекції та блоків моделювання в структурі підсистеми корекції зроблене з урахуванням їх кінцевої реалізації, оскільки програмне забезпечення моделі розроблене у вигляді бібліотек користувача. Блок людино-машинного інтерфейсу повинен забезпечити налаштування підсистеми та аналіз її роботи, а також створення та супроводження бази даних процесу – збір, оброблення, зберігання та управління даними технологічного процесу.

Це дозволило розробити функціональну схему комп'ютерно-інтегрованої технології ТКВК, яка ідентична створеній і наведеній в роботі [6]. При цьому в середовищі MATLAB вбудовано модуль клієнтської частини (OPC-клієнт), який забезпечує вільний програмний доступ до даних процесу (рис. 5). Регулятори технологічних параметрів та класичні регулятори в каскадних контурах реалізовані як окрема підсистема керування. Значення уставок координат векторів керування формуються підсистемою корекції. Однак оператор може самостійно приймати рішення і змінювати їх через рівень supervisory керування. Такий режим є особливо важливим в процесі зміни витрати робочої пари M_{II} та електроенергії N шляхом зміни кількості працюючих ежекторів та вентиляторів АПО.

Запропонована підсистема корекції базується на функціональній структурі керування якістю та кількістю отриманого продукту. Її структура передбачає наявність таких складових:

- бази даних реального часу (функціонально це база даних процесу);
- алгоритмічної частини (функціонально це блок корекції та блок моделювання);
- людино-машинного інтерфейсу.

Вікна налаштування усіх складових, а також дисплейні мнемосхеми для роботи оператора змінюються в залежності від будови усього комплексу вторинної конденсації. При цьому перша та третя складова є основними елементами SCADA-системи, що дозволяє реалізувати підсистему на базі існуючого інструменту.

Таким чином, підсистема корекції може бути реалізована окремим мережним вузлом системи або інтегрованим в вузол SCADA комплексу вторинної конденсації, як це зображено на рис. 6. Ця підсистема розроблена на базі SCADA-програми Zenon [17, 18]. Підключення джерел даних залежать від способу підключення БДРЧ (АСУ вторинної конденсації, АРМ лабораторії, тощо). У даному випадку використані OPC-технологія та технологія ODBC [19].

Враховуючи вимоги до відкритості системи запропоновано використати найбільш поширені відкриті комунікаційні технології. Це так звані OPC-технології.

В результаті застосування розробленої комп'ютерної технології керування ТКВК забезпечує зниження і стабілізацію температури вторинної конденсації до -5 °C. Таке зниження обумовлює зменшення споживання природного газу, як вже відзначалось, у додатковий паровий котел майже на 1 млн. nm^3 на рік. Наступні дослідження будуть проводитись у напрямку подальшого вдосконалення технології керування процесами конденсації з метою зниження навантаження на компресорну систему відділення синтезу аміаку.

7. Висновки

1. Розроблено алгоритм для підсистеми підтримки прийняття рішень комп'ютерної технології керування ТКВК в умовах невизначеності, програмна реалізація якого була виконана за допомогою спеціального середовища MATLAB. Такий підхід завдяки вбудованій у середовище MATLAB клієнтської частини (OPC-клієнт) забезпечує вільний програмний доступ до поточних даних технологічного процесу.

2. Методом математичного моделювання на базі створеного алгоритмічного програмного забезпечення визначенні закономірності та кількісні залежності впливу зовнішнього теплового навантаження на показники ефективності процесів теплообміну ТКВК за встановлених обмежень. Ці кількісні показники дозволяють здійснювати прогнозування координат вектора керування з метою стабілізації температури вторинної конденсації на регламентному рівні. Серед цих показників слід виділити такі як теплові потоки, коефіцієнт теплопередачі та координати вектора керування. Встановлено закономірність збільшення теплових потоків с підвищенням температури первинної конденсації. Внаслідок цього спостерігається суттєве зростання температурного напору та координат вектора керування, незважаючи на деяке збільшення аміаку у ЦГ на вході ТКВК та зниження при цьому коефіцієнту теплопередачі. Визначена параметрична чутливість координат вектора керування від зміни температури первинної конденсації, яка у порівнянні із зміною витрати ЦГ на вході ТКВК перевищує більш ніж у шість разів. Отримані залежності координат вектора керування від зміни зовнішнього теплового навантаження на вході ТКВК та встановлено граничне значення температури первинної конденсації на рівні 28 °С. За такої температури з'являється можливість для оператора прийняття рішення щодо зупинки роботи ПХУ у складі ТКВК.

3. Розроблена функціональна структура комп'ютерної технології керування контурами витрати холодоагенту до ВВТ та МЕА розчину до парогенератора ПХУ, яка використовує контролер вільного програмування VIPA та SCADA-систему Zenon.

4. На основі використання «відкритих» технологій розроблено апаратно-програмне забезпечення комп'ютерно-інтегрованої технології керування ТКВК. Такий підхід забезпечив можливість інтеграції його до структури існуючого комплексу керування TDC-3000 та реалізації у вигляді АРМ оператора підсистеми підтримки прийняття рішень.

Література

1. Liu, H. (2014). Ammonia synthesis catalyst 100 years: Practice, enlightenment and challenge. *Chinese Journal of Catalysis*, 35 (10), 1619–1640. doi: [https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(14\)60118-2](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(14)60118-2)
2. Malhotra, A., Gosnell, J. (2012). KBR PURIFIER™ Technology and Project Execution Options for Ammonia Plants. 25th AFA international fertilizers technology conference Sustainability Driving the Future. Dubai. URL: https://www.arabfertilizer.org/uploads/events/3/files/120717144118_proceeding.pdf

3. Babichenko, A., Velma, V., Babichenko, J., Kravchenko, Y., Krasnikov, I. (2017). System analysis of the secondary condensation unit in the context of improving energy efficiency of ammonia production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (6 (86)), 18–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96464>
4. Chen, Y., Han, W., Jin, H. (2016). Analysis of an absorption/absorption–compression refrigeration system for heat sources with large temperature change. *Energy Conversion and Management*, 113, 153–164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.063>
5. Галимова, Л. В., Кайль, В. Я., Веденева, А. И. (2015). Оценка степени термодинамического совершенства на основе анализа работы действующей абсорбционной холодильной установки системы синтеза аммиака. *Вестник международной академии холода*, 4, 55–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-stepeni-termodinamicheskogo-sovershenstva-na-osnove-analiza-raboty-deystvuyushey-absorbtsionnoy-holodilnoy-ustanovki>
6. Babichenko, A., Babichenko, J., Kravchenko, Y., Velma, S., Krasnikov, I., Lysachenko, I. (2018). Identification of heat exchange process in the evaporators of absorption refrigerating units under conditions of uncertainty. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (2 (91)), 21–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121711>
7. Zhang, S., Dai, L., Gao, Y., Xia, Y. (2020). Adaptive interpolating control for constrained systems with parametric uncertainty and disturbances. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 30 (16), 6838–6852. doi: <https://doi.org/10.1002/rnc.5140>
8. Wu, H., Wang, W., Ye, H. (2013). Robust state estimation for linear systems with parametric uncertainties and quantised measurements. *International Journal of Systems Science*, 46 (3), 526–534. doi: <https://doi.org/10.1080/00207721.2013.807387>
9. Larsen, K. R., Monarchi, D. E., Hovorka, D. S., Bailey, C. N. (2008). Analyzing unstructured text data: Using latent categorization to identify intellectual communities in information systems. *Decision Support Systems*, 45 (4), 884–896. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2008.02.009>
10. Fronk, B. M., Garimella, S. (2016). Condensation of ammonia and high-temperature-glide ammonia/water zeotropic mixtures in minichannels – Part I: Measurements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 1343–1356. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.049>
11. Бабіченко, А. К., Подустов, М. О., Кравченко, Я. О., Красніков, І. Л. (2020). Енергоефективна комп'ютерно-інтегрована технологія керування процесом вторинної конденсації виробництва аміаку. *Colloquium-journal*, 2 (54), 8–11. doi: <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2020-11285>
12. Wang, L., Liu, J., Zou, T., Du, J., Jia, F. (2018). Auto-tuning ejector for refrigeration system. *Energy*, 161, 536–543. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.110>
13. Wang, X., Zhang, Y., Tian, Y., Li, X., Yao, S., Wu, Z. (2021). Experimental investigation of a double-slider adjustable ejector under off-design conditions. *Applied Thermal Engineering*, 196, 117343. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117343>

14. Chrysostomou, K., Chen, S. Y., Liu, X. (2009). Investigation of users' preferences in interactive multimedia learning systems: a data mining approach. *Interactive Learning Environments*, 17 (2), 151–163. doi: <https://doi.org/10.1080/10494820801988315>
15. TDC 3000 Architecture. URL: <https://www.eeguide.com/tdc-3000-architecture/>
16. Бабіченко, А. К., Подустов, М. О., Кравченко, Я. О., Бабіченко, Ю. А. (2019). Формування інформаційного масиву ідентифікатора адаптивної системи управління блоку конденсації виробництва аміаку за невизначеностей. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання*, 13 (1338), 25–33. doi: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2019.13.03>
17. Бойко, О. А., Голинко, А. А., Проценко, С. Н. Возможности взаимодействия SCADA системы zenon с внешним программным обеспечением. URL: <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/8773.php>
18. Візуалізація. Диспетчерське керування. Збір та аналіз даних. Програмно-технічний комплекс ZENON. URL: https://www.copa-data.com.ua/files/pdf/zenon_raskladka_2016.pdf
19. Erciyes, K. (2019). *Distributed Real-Time Systems: Theory and Practice*. Springer, 359.