

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПУПЕНА ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 663.52-007.5

**АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНОЮ
УСТАНОВКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ ОПЕРАТИВНОЇ
КОРЕКЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ**

05.13.07 - Автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ-2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Ельперін Ігор Володимирович,
Національний університет харчових технологій,
м. Київ,
професор кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тодорцев Юрій Костянтинович,
Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри автоматизації
теплоенергетичних процесів

кандидат технічних наук, доцент
Ладієва Леся Ростиславівна,
Національний технічний університет України (КПІ)
Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри
автоматизації хімічних виробництв

Захист відбудеться “25” червня 2008 року о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за адресою: 01033, м.Київ-33, вул. Володимирська, 68, ауд. ____.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01033, м.Київ-33, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий “ ____ ” _____ 2008 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент

В.М.Філоненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Однією з найважливіших проблем у процесі виробництва харчового етилового спирту є одержання стабільно високої якості продукту за найменших витрат пари. Якість спирту перш за все визначається наявністю в ньому шкідливих домішок (метанол, альдегіди, ефіри, сивушні спирти та ін.), які в основному утворюються в процесі приготування бражки. У зв'язку з великою кількістю нерегульованих збурень, які виникають в процесі приготування бражки, забезпечити її стабільний склад практично неможливо. Задача очищення спирту вирішується на етапі концентрування етилового спирту та вилучення з нього домішок, які відбуваються в брагоректифікаційних установках (БРУ). При цьому основні процеси очистки відбуваються в епюраційній колоні.

Сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами БРУ базуються на управлінні за непрямыми показниками (температура, тиск, витрати основних потоків), що в певних межах забезпечує стабільний гідродинамічний режим у колонах, задану міцність спирту, стабільність основного потоку, необхідні теплові режими дефлегматорів та конденсаторів, а також аварійний захист. Проте температура і тиск практично не корелюють зі зміною якісного складу продуктів розділення, оскільки кількість домішок в бражці, бражному дистиляті та епюраті надзвичайно мала. Тому за зміни якості бражки існуючі системи не можуть забезпечити необхідну ступінь вилучення домішок без надмірних втрат.

Отже, необхідно розробити нові підходи до управління роботою БРУ. Пошук нових алгоритмів управління в системах автоматизації БРУ для забезпечення стабільно високої якості етилового спирту незалежно від якості бражки є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана згідно плану науково-дослідних робіт кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету харчових технологій «Наукові основи створення автоматизованих систем управління для комп'ютерно-інтегрованих виробництв харчової промисловості» та в рамках науково-дослідної роботи Міністерства освіти і науки України «Створити наукові основи управління біотехнологічними процесами харчових виробництв на основі принципів самоорганізації та адаптації» (№ державної реєстрації 0104U000849).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування БРУ для забезпечення стабільно високої якості харчового етилового спирту шляхом вдосконалення системи автоматизованого управління процесом епюрації з використанням алгоритмів оперативної корекції технологічного режиму.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- розробити узагальнені критерії управління якістю епюрату;
- розробити математичну модель процесу епюрації з метою використання її в алгоритмах оперативної корекції технологічного режиму;

- здійснити аналіз статичних і динамічних характеристик епіюраційної колони за основними каналами управління;
- розробити методи та алгоритми управління епіюраційною колоною для забезпечення заданої якості епіурату при змінній якості бражного дистиляту;
- розробити функціональну структуру підсистеми управління епіюраційною колоною в складі автоматизованої системи управління БРУ для реалізації поставлених задач;
- створити підсистему оперативної корекції технологічного режиму у складі системи управління епіюраційною колоною та вибрати шляхи її інтеграції в єдину АСУ БРУ з використанням відкритих технологій інформаційної та програмної взаємодії.

Об'єктом дослідження є процеси концентрування етилового спирту та вилучення з нього шкідливих домішок, які відбуваються у брагоректифікаційних установках спиртових заводів.

Предметом дослідження є математичні моделі, методи та алгоритми управління епіюраційною колоною в АСУ БРУ, що забезпечують стабільно високу якість харчового етилового спирту.

Наукова новизна. При вирішенні поставлених задач одержані нові наукові результати:

- вперше запропоновано підхід до автоматизованого управління епіюраційною колоною з використанням алгоритмів оперативної корекції технологічного режиму за прямими показниками якості бражки на основі розробленої математичної моделі процесу епіюрації;
- знайшли подальший розвиток підходи до побудови математичних моделей процесів епіюрації в ректифікаційних колонах з кількома вводами живлення за умови трикомпонентності розділювальної суміші типу "етанол-вода-домішка" з використанням Модифікованого методу UNIFAC (Дортмунд);
- одержані нові результати моделювання розподілу домішок по висоті колони за різних витрат пари, бражного дистиляту та води на гідроселекцію за яких отримані статичні та динамічні характеристики епіюраційної колони як об'єкту управління та визначена допустима область застосування моделі в системі управління БРУ;
- вперше визначено області спостережності та керованості епіюраційної колони, як об'єкта управління за різних структур АСУ БРУ;
- запропоновані нові алгоритми та структура контурів управління епіюраційною колоною, а також функціональна структура управління БРУ з новою підсистемою управління ЕК;

Практичне значення та реалізація одержаних результатів. Одержані результати можуть бути використані в процесі проектування, розробки та впровадження нових та модернізації існуючих систем автоматизації БРУ, а також при проектуванні ректифікаційних колон у спиртовій промисловості. Запропоновані методики побудови математичної моделі епіюраційної колони з використанням Модифікованого методу UNIFAC (Дортмунд) для розрахунку

фазової рівноваги можуть бути використані в процесі моделювання інших колон БРУ.

Результати роботи пройшли досліdну перевірку на Червонослобідському спиртовому заводі та передані для подальшого впровадження.

Результати досліджень використовуються у навчальному процесі при підготовці фахівців з напрямку «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології».

Особистий внесок у розробку наукових результатів. Дисертація є самостійною роботою автора. Автором проаналізовано наукову літературу з даної проблеми, зроблено висновки, сформульовано задачі досліджень. Автором запропоновано принципово новий підхід до автоматизованого управління епюраційною колоною з використанням алгоритмів оперативної корекції технологічного режиму за прямими показниками якості бражки на основі математичної моделі процесу епюрації. Автором самостійно розроблено математичні моделі статистики і динаміки процесу епюрації, властивості яких досліджені за допомогою спеціально розробленої імітаційної моделі, проведено перевірку їх адекватності, розроблено нові методи та алгоритми управління епюраційною колоною, запропоновано функціональну структуру та шляхи реалізації підсистеми оперативної корекції технологічного режиму у складі системи управління епюраційною колоною, проведено експериментальну перевірку запропонованих рішень у виробничих умовах. Планування основних напрямків роботи, обговорення результатів та підготовка публікацій проходило за участю наукового керівника І.В.Ельперіна. Обговорення результатів визначення області спостережності та керованості епюраційної колони та наліз шляхів інтеграції в АСУ БРУ проходили сумісно з д.т.н. А.П.Ладанюком та В.М.Кушковым.

Апробація роботи. Основні результати досліджень доповідались і обговорювались на наукових конференціях Національного університету харчових технологій у 2002-2007 рр.; міжнародних конференціях з автоматичного управління, "Автоматика-2004" (Київ, 2004) та "Автоматика-2007" (Севастополь, 2007);

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 друкованих праць, в яких викладено основний зміст виконаних досліджень, з них 6 статей в фахових виданнях, тези доповідей на наукових конференціях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, списку літератури з 116 найменувань і додатків. Повний обсяг дисертації 210 стор., з яких зміст викладено на 147 стор. друкованого тексту, містить 84 рисунки, 34 таблиці та 13 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Показана актуальність роботи з точки зору важливості розробки принципово нових алгоритмів управління брагоректифікаційними установками для забезпечення стабільно високої якості спирту. Сформульована мета та задачі

дослідження. Визначені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

Перший розділ присвячено аналізу технологічного процесу одержання ректифікованого спирту з метою визначення основних факторів, які впливають на його якість, визначення критерію управління та задач дослідження.

Якість харчового етилового спирту визначається наявністю в ньому домішок, які негативно впливають на його фізико-хімічні та органолептичні показники. Аналіз технологічного процесу виробництва спирту показав, що основна маса домішок формуються на етапі приготування бражки, а на стадії брагоректифікації відбувається їх вилучення. У зв'язку з великою кількістю неконтрольованих факторів, які виникають на етапах приготування бражки, практично неможливо забезпечити стабільний склад домішок у зрілій бражці. Отже вилучення домішок у брагоректифікаційних установках (БРУ) відбувається за різної якості бражки. Показано, що зміна технологічного обладнання або технології процесу може покращити якість спирту проте не може забезпечити її стабільність без надмірних втрат, тому проблема може бути вирішена шляхом вдосконалення процесів управління.

Проведений аналіз існуючих АСУ БРУ показав, що контури управління цих систем базуються на непрямих показниках вимірювання, що не може забезпечити стабільно високу якість спирту за умови змінної якості бражки. Для забезпечення необхідного вилучення домішок запропоновано принципово новий підхід до управління, який передбачає корегування технологічного режиму на основі інформації про якісні показники продуктів розділення.

Оскільки в брагоректифікаційних установках якість спирту значною мірою визначається роботою епюраційної колони (ЕК), основна увага в роботі приділена вдосконаленню процесу управління даною колоною. Визначена цільова функція роботи колони:

$$x_{EPj} \leq x_{EPj}^{здн}, \forall j \in M_D, \quad (1)$$

де: x_{EPj} - концентрація j -ї домішки в епюраті, $x_{EPj}^{здн}$ - задана допустима концентрація j -ї домішки в епюраті, M_D – множина ключових (найважливіших) домішок.

Визначено, що необхідною умовою досягнення (1) є забезпечення для колони потрібних матеріальних балансів за різної якості бражного дистилату, яка суттєво змінюється під час переходу на живлення з наступного бражного чану.

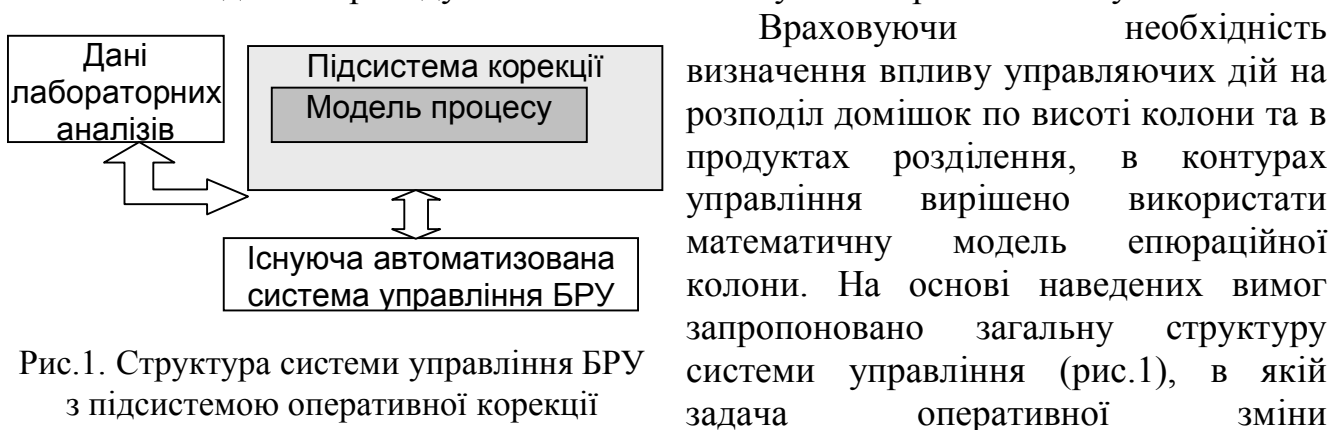


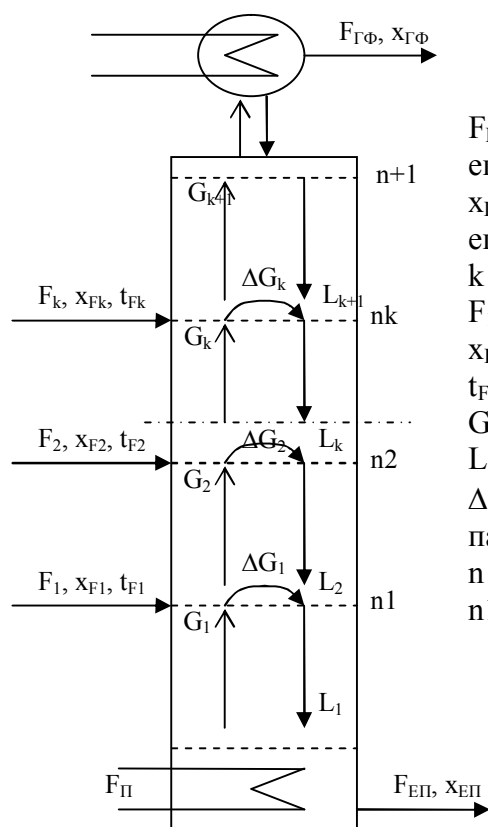
Рис.1. Структура системи управління БРУ з підсистемою оперативної корекції

технологічного режиму покладена на підсистему корекції, яка використовує технологічні дані, дані лабораторних аналізів та модель процесу. Додатковою вимогою до підсистеми корекції є можливість її інтеграції у більшість існуючих АСУ БРУ.

Сформульовано мету роботи та задачі досліджень.

У другому розділі побудовано математичну модель статички та динаміки епюраційної колони за умови багатокомпонентності розділювальної суміші, кількох вводів рідинного живлення та з урахуванням роботи колони під різними тисками. Визначені алгоритми розрахунку моделей, алгоритми моделювання фазової рівноваги, а також способи приведення до адекватності моделі реальному об'єкту управління.

Статична модель колони побудована на основі методу теоретичних тарілок (рис.2), складається з двох частин і призначена для розрахунку розподілу етанолу та домішок по висоті колони.



$F_{ГФ}$, $F_{П}$, $F_{ЕП}$ – витрати відповідно дистиляту (ГФ), пари, епюрату;
 $x_{ГФ}$, $x_{ЕП}$ – концентрації етанолу відповідно в дистиляті та епюраті;
 k – кількість вводів рідкого живлення;
 $F_1 \dots F_k$ – витрати потоків живлень;
 $x_{F1} \dots x_{Fk}$ – концентрації етанолу в живленнях;
 $t_{F2} \dots t_{Fk}$ – температура живлень;
 $G_1 \dots G_{k+1}$ – парові потоки під k -тим вводом живлення;
 $L_1 \dots L_{k+1}$ – рідинні потоки під k -тим вводом живлення;
 $\Delta G_1 \dots \Delta G_k$ – рідинний потік, утворюваний при конденсації пари при догріванні живлення до температури кипіння;
 n – кількість тарілок;
 $n1 \dots nk$ – номери тарілок вводів живлення

Рис.2. Схема матеріальних потоків.

У моделі враховується кілька вводів живлень, а розрахунок рівноваги та коефіцієнту корисної дії (ККД) тарілок здійснюється окремо (рис.3).

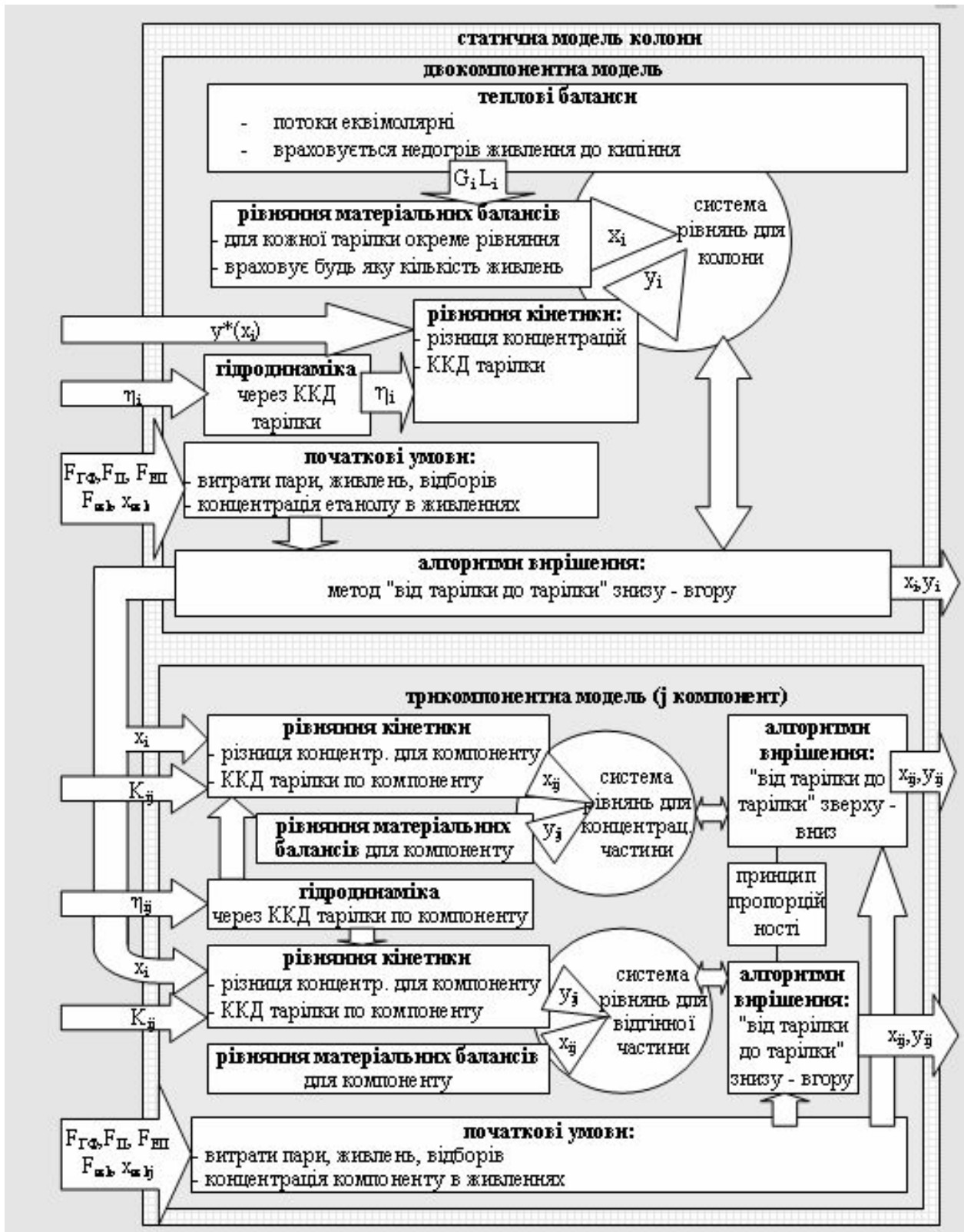


Рис.3. Структура моделі епіюраційної колони

Математична модель для розрахунку двокомпонентної суміші з урахуванням кількох введів живлення має вигляд:

$$x_i = \begin{cases} \frac{y_{i-1}G_1}{L_1} + \frac{F_{\Gamma\Phi}}{L_1}, i \leq n_1 \\ \frac{y_{i-1}G_2}{L_2} + \frac{\sum_{j=2}^k F_j x_{Fj}}{L_2} - \frac{F_{E\Pi}}{L_2}, n_1 < i \leq n_2 \\ \\ \frac{y_{i-1}G_k}{L_k} + \frac{F_k x_{Fk}}{L_k} - \frac{F_{E\Pi} x_{E\Pi}}{L_k}, nk - 1 < i \leq nk \\ \frac{y_{i-1}G_{k+1}}{L_{k+1}} - \frac{F_{E\Pi} x_{E\Pi}}{L_{k+1}}, i \leq n + 1 \end{cases}$$

де: x_i, y_i – концентрація етанолу на i -тій тарілці відповідно в рідині та парі;
 η_i - ККД тарілки по етанолу.

Для моделювання багатокomпонентної суміші використаний "принцип пропорційності", який модифіковано в роботі для задач з кількома входами живлення. Виведені матеріальні баланси, та складено модель для відгінної (3) та концентраційної частини (4).

$$x_{ij} = \frac{y_{(i-1)j} G_1}{L_1} + \frac{F_{E\Gamma} x_{(i-1)j}}{L_1}, i \leq n1, \quad y_{ij} = \begin{cases} (1 - \eta_{ij}) \cdot K_{(i-1)j} \cdot x_{(i-1)j} + \eta_{ij} \cdot K_{ij} \cdot x_{ij}, & 0 < i \leq n1 \\ (1 - \eta_{0j}) \cdot x_{0j} + \eta_{0j} \cdot K_{0j} \cdot x_{0j}, & i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} (1 - \eta_{ij}) \cdot x_{(i+1)j} + \frac{\eta_{ij} \cdot y_{ij}}{K_{ij}}, & n1 < i \leq n \\ (1 - \eta_{(n+1)j}) \cdot x_{(n+1)j} + \frac{\eta_{(n+1)j} \cdot y_{(n+1)j}}{K_{(n+1)j}}, & i = n+1 \end{cases}, \quad y_{(i-1)j} = \begin{cases} \frac{x_{ij} L_2}{G_2} - \frac{\sum_{l=2}^k F_l x_{Flj}}{G_2} + \frac{F_{\Gamma\Phi} x_{\Gamma\Phi j}}{G_2}, & n1 < i \leq n2 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{x_{ij} L_k}{G_k} - \frac{F_k x_{Fkj}}{G_k} + \frac{F_{\Gamma\Phi} x_{\Gamma\Phi j}}{G_k}, & nk-1 < i \leq nk \\ \frac{x_{ij} L_{k+1}}{G_{k+1}} + \frac{F_{\Gamma\Phi} x_{\Gamma\Phi j}}{G_{k+1}}, & i \leq n+1 \end{cases} \quad (4)$$

де: x_{ij} , y_{ij} – концентрація j -ї домішки на i -тій тарілці відповідно в рідині та парі.
 η_{ij} - ККД i -ї тарілки по j -му елементу.

Адекватність моделі реальному об'єкту забезпечується зміною ККД тарілки для кожного компонента. Для цього використовується методика запропонована рядом вчених, яка базується на представленні ККД через коефіцієнти масовіддачі, що є функціями від витрати пари. За критерій адекватності обрано дисперсію розузгоджень концентрацій на найважливіших тарілках.

Особливу увагу в роботі приділено визначенню фазової рівноваги, оскільки точність її моделювання значною мірою визначає точність моделі в цілому. У зв'язку з необхідністю моделювання сумішей з великою кількістю компонентів при різних тисках вирішено використати емпірично-теоретичні моделі. Для

моделювання рідинної та парової суміші використані різні підходи, а їх зв'язок здійснюється через рівність фугітивностей компонентів:

$$P y_j \Phi_j = P_j^0 x_j \gamma_j \quad (5)$$

Неідеальність парової фази враховується через коефіцієнти Φ_j , розрахунок яких здійснюється в роботі через Віріальне рівняння з другим коефіцієнтом. Для розрахунку коефіцієнтів активності компонентів у рідкій фазі в процесі моделювання епюраційної колони вперше використано Модифікований метод ЮНІФАК (Дортмунд). Вибір методу зумовлений його універсальністю, точністю і перспективністю. Базування методу на групових внесках молекулярних груп дала можливість синтезувати модель для великої кількості компонентів, зокрема для етанолу, води та групи ключових домішок.

Для аналізу динамічних властивостей об'єкта, розроблено математичну модель динаміки епюраційної колони в координатах стану. Для розрахунку фазової рівноваги використано апроксимаційні залежності за експериментальними даними. Модель являє собою системи рівнянь тарілок, об'єднаних між собою змінними за матеріальними потоками. Виведено системи для 4-х типів тарілок: звичайна (6), живлення (7), куба та дефлегматора колони.

$$\left\{ \begin{array}{l} M_i \frac{dx_i}{dt} = L_{i+1}x_{i+1} - L_i x_i + F_{II}y_{i-1} - F_{II}y_i; \\ M_i \frac{d\bar{x}_{ij}}{dt} = L_{i+1}\bar{x}_{(i+1)j} - L_i \bar{x}_{ij} + F_{II}\bar{y}_{(i-1)j} - F_{II}\bar{y}_{ij}; \\ \tau_i \frac{dL_i}{dt} = L_{i+1} - L_i; \\ y_i = (1 - \eta_i)y_{i-1} + \eta_i f_y(x_i, P_i); \\ \bar{y}_{ij} = (1 - \bar{\eta}_{ij})\bar{y}_{(i-1)j} + \bar{\eta}_{ij} f_{y_j}(\bar{x}_{ij}, x_i, P_i); \\ \frac{dP_i}{dt} = f_P(P_i, P_{i-1}, P_{i+1}, t); \\ \frac{dT_i}{dt} = f_T(x_i, \bar{x}_{ij}, y_i, \bar{y}_{ij}, t); \end{array} \right. \quad (6) \quad \left\{ \begin{array}{l} M_i \frac{dx_i}{dt} = F_g x_g + L_{i+1}x_{i+1} - L_i x_i + F_{II}y_{i-1} - F_{II}y_i; \\ M_i \frac{d\bar{x}_{ij}}{dt} = F_g \bar{x}_{gj} + L_{i+1}\bar{x}_{(i+1)j} - L_i \bar{x}_{ij} + F_{II}\bar{y}_{(i-1)j} - F_{II}\bar{y}_{ij}; \\ \tau_i \frac{dL_i}{dt} = F_g + L_{i+1} - L_i; \\ y_i = (1 - \eta_i)y_{i-1} + \eta_i f_y(x_i, P_i); \\ \bar{y}_{ij} = (1 - \bar{\eta}_{ij})\bar{y}_{(i-1)j} + \bar{\eta}_{ij} f_{y_j}(\bar{x}_{ij}, x_i, P_i); \\ \frac{dP_i}{dt} = f_P(P_i, P_{i-1}, P_{i+1}, F_g, x_g, \bar{x}_{gj}, t); \\ \frac{dT_i}{dt} = f_T(x_i, \bar{x}_{ij}, y_i, \bar{y}_{ij}, t); \end{array} \right. \quad (7)$$

У третьому розділі проведений аналіз результатів моделювання та властивостей об'єкта управління.

Визначені межі застосування математичних моделей з використанням Модифікованого методу UNIFAC (Дортмунд) в системах управління та при аналізі статичних та динамічних характеристик об'єкта управління.

На імітаційній моделі статичні отримані статичні характеристики епюраційної колони по основним каналам управління. Показано, що збільшення витрати пари приводить до зменшення концентрації в епюраті всіх розглянутих домішок, а збільшення витрати води на гідроселекцію приводить до збільшення концентрації в головній фракції всіх розглянутих домішок окрім метанолу (рис.4). Виявлено, що при достатньому відборі домішок з головною фракцією, її витрата не впливає на концентрацію домішок в епюраті, що дозволяє будувати систему управління на основі двох незалежних контурів.

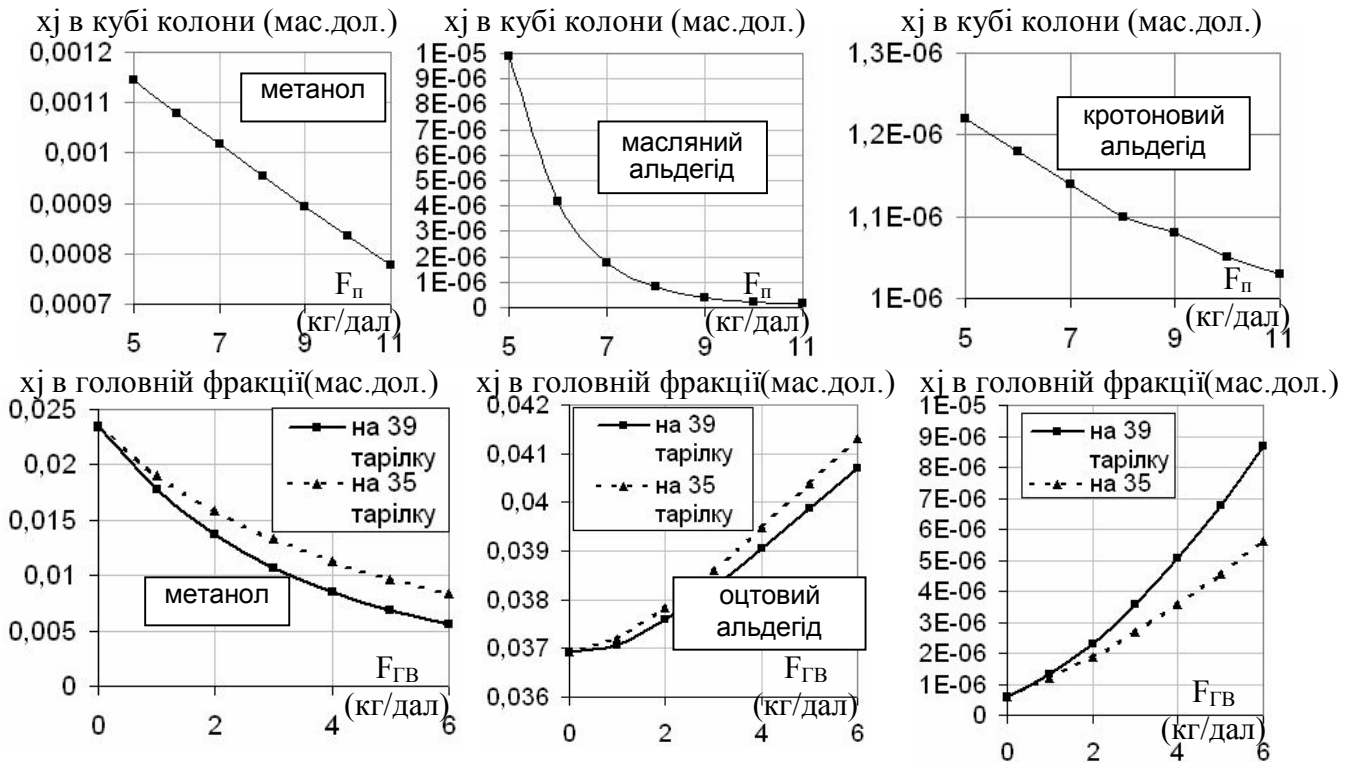


Рис.4. Статичні характеристики епіюраційної колони по основним каналам управління

Проведений структурний аналіз спостережності та керованості об'єкта на прикладі колони з 5-ма тарілками, що описується системою:

$$\begin{cases} \mathbf{X} = f(\mathbf{X}, u, w, t); \\ \mathbf{Y} = h(\mathbf{X}, u, w); \end{cases} \quad (8)$$

$$\mathbf{X} = (x_{EP} \ x_1 \dots x_4 \ x_{EPI} \ x_{11} \dots x_{41} \dots x_{EPII} \ x_{1l} \dots x_{4l} \ y_{00} \dots y_4 \ y_{01} \dots y_{41} \dots y_{0l} \dots y_{4l} \ L_1 \dots L_4 \ F_{EP} \ P_0 \dots P_4)^T \quad (9)$$

$$w = (F_1 \ F_2 \ x_{F1} \ x_{F2} \ x_{F11} \dots x_{F1l} \ x_{F21} \dots x_{F2j})^T \quad (10)$$

$$\mathbf{Y} = (P_0 \ P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ T_0 \ T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4)^T \quad (11)$$

$$u = (F_{II} \ F_{OV} \ F_{IF})^T \quad (12)$$

де: $\mathbf{X}$ - вектор координат стану, $\mathbf{Y}$ - вектор спостереження, u - вектор управління, w - вектор збурень.

Показано, що існуючі системи, які описані (8-12) працюють в умовах недостатньої спостережності. Визначена умова повної спостережності, яка можлива тільки при вимірюванні якісних параметрів бражного дистиляту та витрат продуктів розділення, тобто:

$$\mathbf{Y} = (P_0 \dots P_4 \ F_1 \ F_2 \ F_{IF} \ x_{F1} \ x_{F2} \ x_{F11} \dots x_{F1l} \ x_{F21} \dots x_{F2j})^T \Rightarrow M_{СП} = \{\mathbf{X}\} \quad (13)$$

Визначена область керованості колони та шляхи її розширення за рахунок додаткових управляючих дій, наприклад витрати води на гідроселекцію. Визначена умова існування досяжності критерію управління:

$$\{x_{EPIj}^{30H} \ \forall j \in M_D\} \subset M_{KEP} \quad (14)$$

На імітаційній моделі динаміки епіюраційної колони, побудованій в пакеті Simulink середовища Matlab, отримані криві розгону по основним каналам управління та збурення, на основі яких проведений аналіз динамічних характеристик об'єкту управління. Визначено, що об'єкт має суттєву інерційність

(рис.5) по всім розглянутим каналам, що не дає можливість стабілізувати якість епюрату за відхиленням, а контури слід будувати по принципу управління за збуренням по витраті та якісному складу бражного дистилляту, з корекцією по відхиленню якісного складу епюрату та головної фракції. Оскільки вимірювальні канали по тиску та температурі набагато менш інерційні, пропонується їх використання в складі контурів управління.

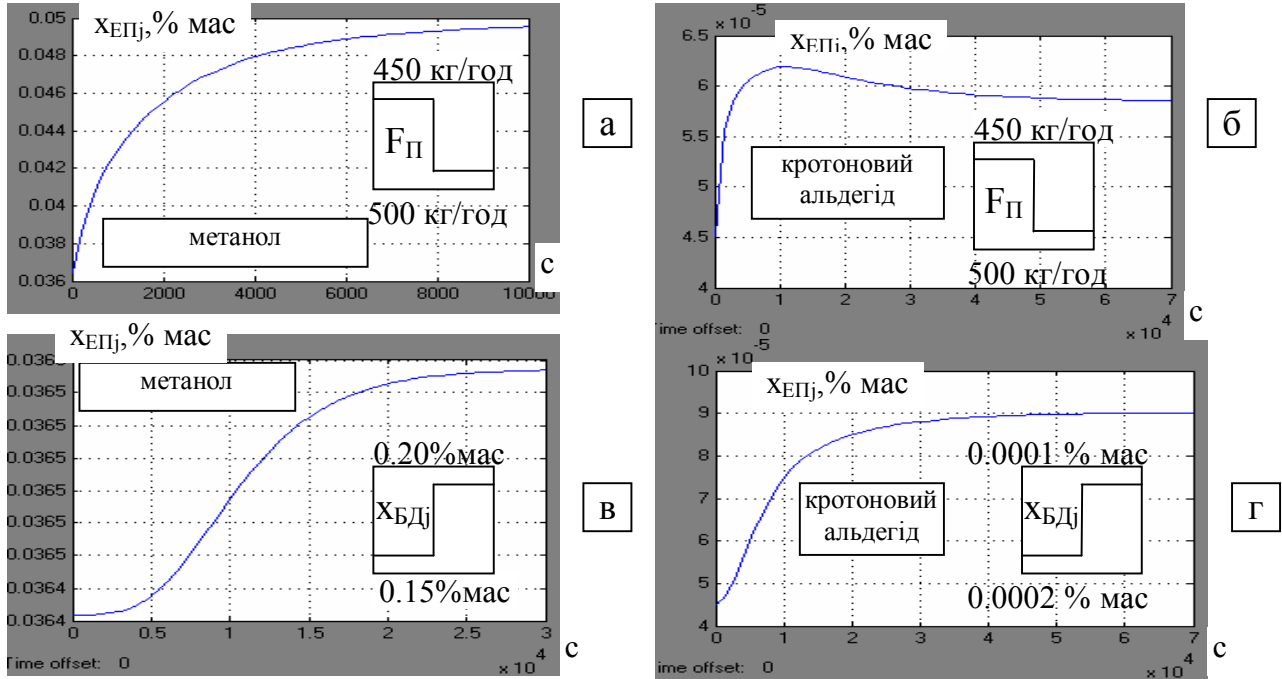


Рис.5. Криві розгону по каналам каналом: концентрація домішки в епюраті - витрата пари (а,б); концентрація домішки в епюраті – концентрація домішки в бражному дистилляті (в,г)

Четвертий розділ присвячений розробці структури та алгоритмів контурів управління випаровуванням домішок.

Виходячи з вимог до процесу епюрації та економічності роботи колони, уточнено цільову функцію управління епюраційною колоною (15):

$$E = \min_{(F_{ГФ}, F_{П}, F_{ГВ}) \in M_F} [\kappa_1 \cdot F_{П} + \kappa_2 \cdot F_{ГФ} \cdot x_{ГФ}] , \quad (15)$$

де: $M_F = \{(F_{ГФ}, F_{П}, F_{ГВ}) : (x_{ЕПj} \leq x_{ЕПj}^{здн}, \forall j \in M_D) \wedge (F_{ГФ} \in M_{ГФ}) \wedge (F_{П} \in M_{П}) \wedge (F_{ГВ} \in M_{ГВ}) \wedge (P_{ЕКниз} \in M_P)\}$,

$$M_{П} = F_{Пmin} \leq F_{П} < F_{Пmax}, M_{ГФ} = F_{ГФmin} \leq F_{ГФ} < F_{ГФmax}, M_{ГВ} = F_{ГВmin} \leq F_{ГВ} < F_{ГВmax}$$

Аналіз роботи епюраційної колони як об'єкту управління показав, що поставлену задачу можна розбити на дві частини: управління випаровуванням домішок (16) та управління вилученням домішок з головної фракцією (17). У разі можливості управління витратою води на гідроселекцію, друга підзадача має інший вигляд (18).

$$E_1 = \min_{F_{П} \in M_{П}} F_{П} , \quad (16)$$

де: $M_{П} = \{F_{П} : (x_{ЕПj} \leq x_{ЕПj}^{здн}, \forall j \in M_D) \wedge (P_{ЕКниз} \in M_P)\} \cap M_{П}$;

$$E_2 = \min_{F_{ГФ} \in M_{ГФ}} F_{ГФ} \cdot x_{ГФ} \quad (17)$$

$$M_{ГФ} = \{F_{ГФ} : F_{ГФ} \cdot x_{ГФj} \geq (F_{БД} \cdot x_{БДj} - F_{ЕП} \cdot x_{ЕПj}^{з\partial n}), \forall j \in M_D\} \cap M_{ГФ};$$

$$E_{2гс} = \min_{(F_{ГФ}, F_{ГВ}) \in M_{ГГС}} F_{ГФ} \cdot x_{ГФ} \quad (18)$$

$$\text{де: } M_{ГГС} = \{(F_{ГФ}, F_{ГВ}) : (F_{ГФ} \cdot x_{ГФj} \geq F_{БД} \cdot x_{БДj} - F_{ЕП} \cdot x_{ЕПj}^{з\partial n}, \forall j \in M_D) \wedge (F_{ГФ} \in M_{ГФ}) \wedge (F_{ГВ} \in M_{ГВ})\}$$

Управління випаровуванням домішок зводиться до пошуку мінімального значення витрати пари за умови вилучення всіх домішок до необхідної концентрації в епюраті. Отже це буде максимальне значення витрати, серед витрат, розрахованих для вилучення кожної домішки:

$$E_1 = \max_{F_{П} \in M'_{П}} F_{П} \quad (19)$$

$$\text{де: } M'_{П} = \{F_{П} : (x_{ЕПj} = x_{ЕПj}^{з\partial n}, \forall j \in M_D) \wedge (P_{ЕК\text{низ}} \in M_P)\} \cap M_{П}$$

Враховуючи дію витрат бражного дистилату та води на гідроселекцію, що для даного контуру приймаються як збурення, вибрано каскадну схему з наступною структурою (рис.6) .

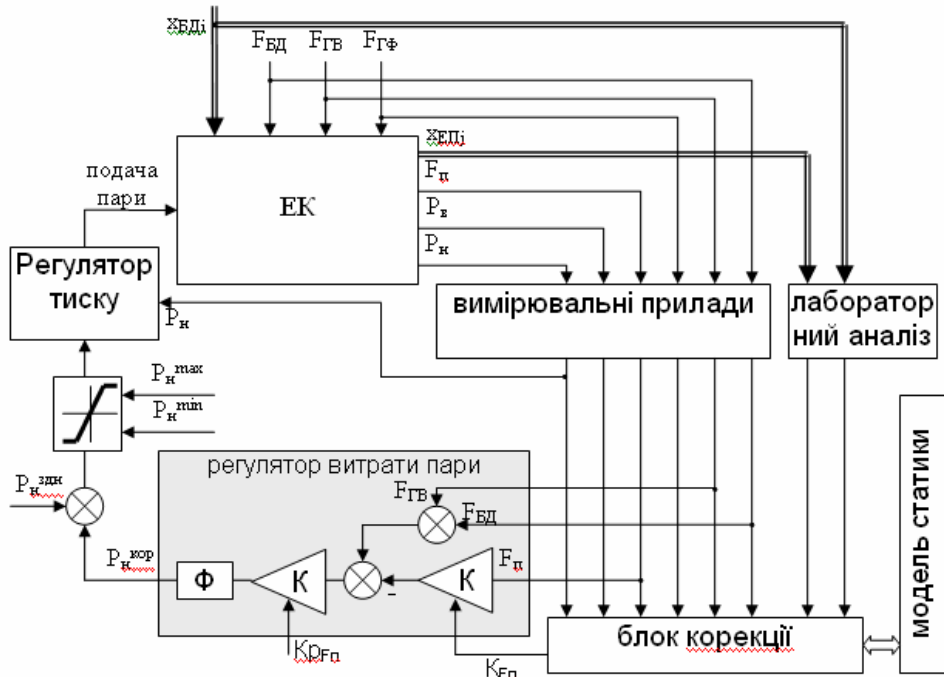


Рис.6. Схема контуру управління процесом випаровування домішок

Завдання на регулятор тиску коригується регулятором співвідношень витрат пари до рідинного потоку в колоні. Блок корекції розраховує коефіцієнт співвідношення витрат відповідно до сформованого критерію. Для надійності роботи контуру, завдання тиску в нижній частині колоні коригується в установлених регламентом межах, що передбачає роботу в нормальному гідродинамічному режимі. У роботі виведено формулу та алгоритм розрахунку коефіцієнта співвідношень витрат

Управління вилученням домішок зводиться до мінімізації витрат головної фракції за умови достатньо повного відбору всіх домішок. Отже, задача

вирішується пошуком максимальної витрати головної фракції серед розрахованих для повного вилучення кожної домішки.

$$E_2 = \max_{F_{ГФ} \in M'_{ГФ}} F_{ГФ} , \quad (20)$$

$$\text{де: } M'_{ГФ} = \{F_{ГФ} : F_{ГФ} = \frac{F_{БД} \cdot x_{БДj}}{x_{ГФj}}, \forall j \in M_D\} \cap M_{ГФ}$$

Враховуючи вплив витрати бражного дистилату на розподіл домішок, контур доречно будувати за співвідношенням витрат головної фракції до бражного дистилату, коефіцієнт для якого розраховується в блоці корекції згідно з наведеною формулою. Для надійної і стабільної роботи контуру, регулятор співвідношень витрат є головним у каскаді з регулятором тиску у верхній частині колони (рис.7).

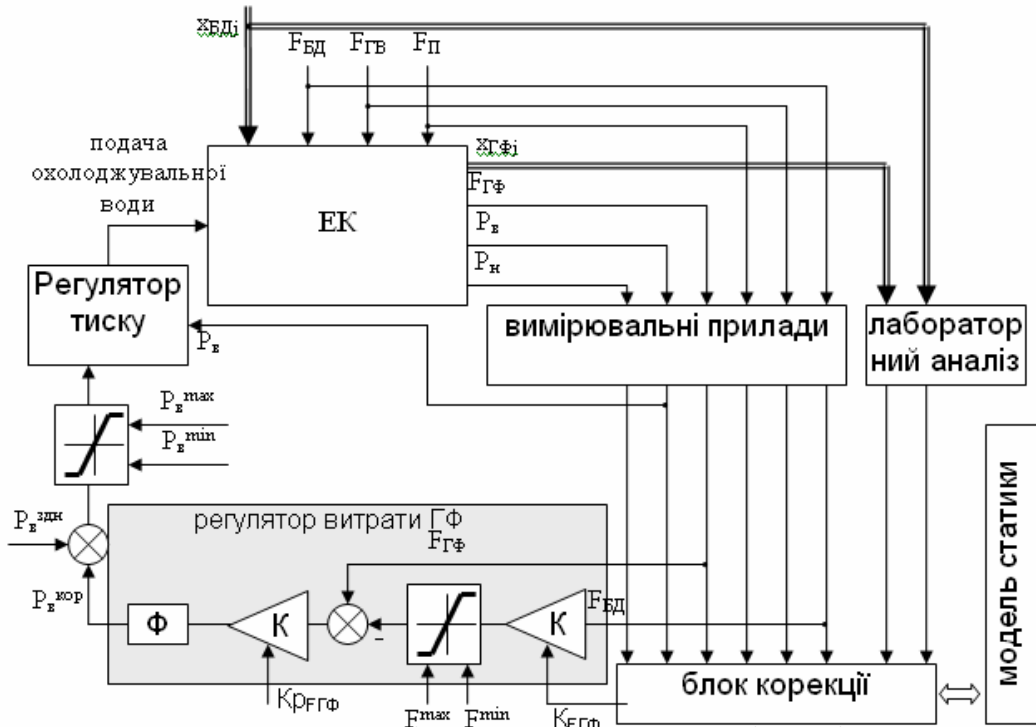


Рис.7. Схема контуру управління вилученням домішок із регулятором тиску у верхній частині колони

Для розрахунку коефіцієнта співвідношення витрат використовується концентрація компонента в головній фракції, яка змінюється до рівноважного за певний інтервал часу. Ця зміна передбачена в системі через експоненційну залежність.

За використання екстрактивної епіюрації можна використати додатковий управляючий сигнал – витрату води на гідроселекцію. У цьому разі, після декомпозиції критерію $E_{2гс}$ задача зводиться до пошуку такої витрати води на гідроселекцію, за якої витрата головної фракції буде мінімальною:

$$E_{2гс} = \min_{F_{ГВ} \in M_{ГВ}} \max_{F_{ГФ} \in M'_{ГФ}} F_{ГФ} \quad (21)$$

$$M'_{ГФ} = \{F_{ГФ} : F_{ГФ} = \frac{F_{БД} \cdot x_{БДj}}{x_{ГФj}}, \forall j \in M_D\} \cap M_{ГФ}$$

Аналогічно попереднім, даний контур реалізується за допомогою регулятора співвідношення витрат головної фракції до бражного дистилляту (рис.8). Коефіцієнт для регулятора розраховується у блоці корекції за наведеним алгоритмом.

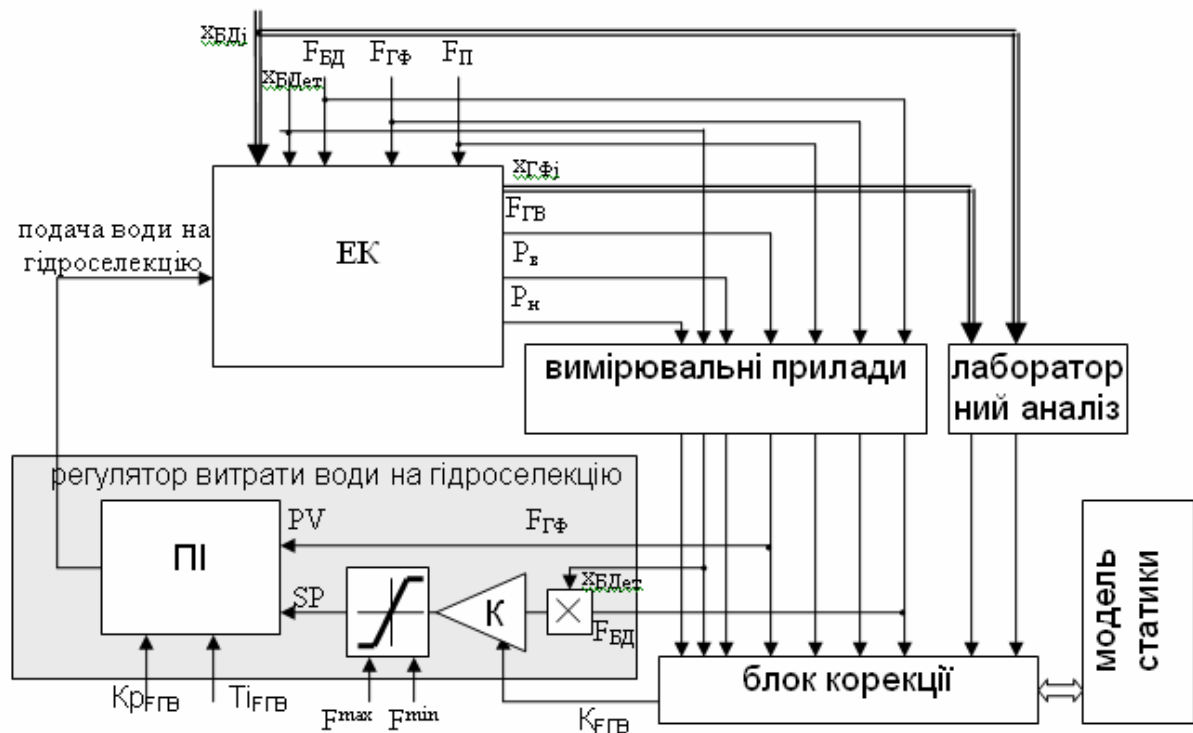


Рис.8. Схема контуру управління витратою води на гідро селекцію

Розроблено функціональну структуру управління епораційною колоною, яка складається з трьох рівнів (рис.9). Передбачається що існуюча автоматизована система управління модифікується додатковими регуляторами в підсистемі управління та інструментами їх настройки в підсистемі supervisory управління. Додатково існуюча система доповнюється підсистемою корекції, яка взаємодіє з рівнем управління через підсистему supervisory управління. Така структура робить систему живучою і гнучкою. За необхідності розроблені контури переключаються в інформаційний режим, коли оператор сам може налаштувати коефіцієнти для регуляторів співвідношень витрат або в розімкнутий режим, якщо сигнали корекції дорівнюють нулю.

В п'ятому розділі наведено практичну реалізацію розробленої системи, її інформаційну структуру та результати впровадження.

Розроблено інформаційну структуру для АСУ БРУ з підсистемою корекції (рис.10). Як інтегруючу ланку між підсистемою корекції і рівнем SCADA/HMI запропоновано технологію OPC, а з підсистемою АРМ лабораторії – інтерфейси OLEDB та ODBC.

На імітаційній моделі системи управління, розробленої за допомогою утиліти Simulink пакету Matlab, знято перехідні характеристики роботи розроблених контурів.

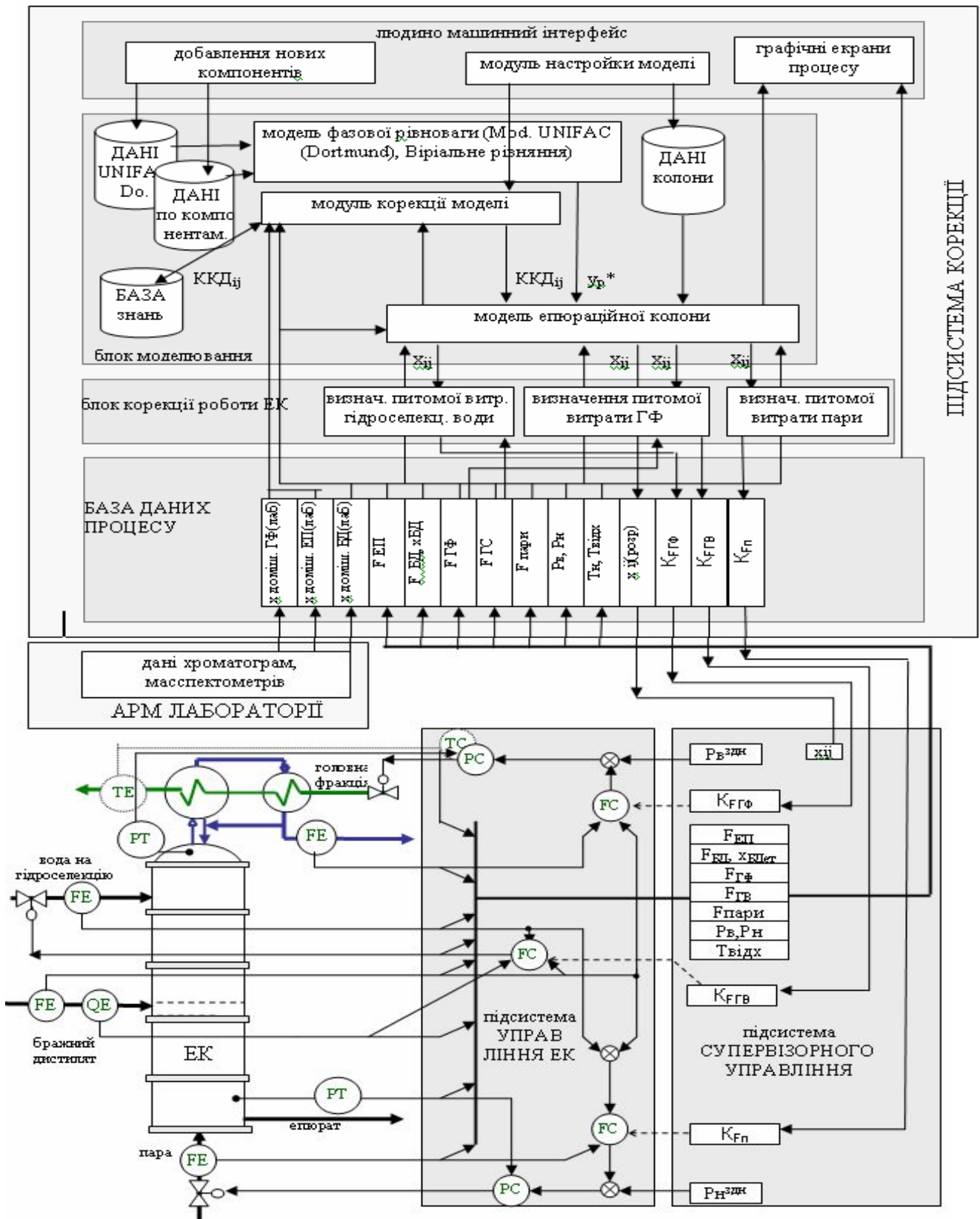


Рис.9. Функціональна схема управління елюційною колоною БРУ

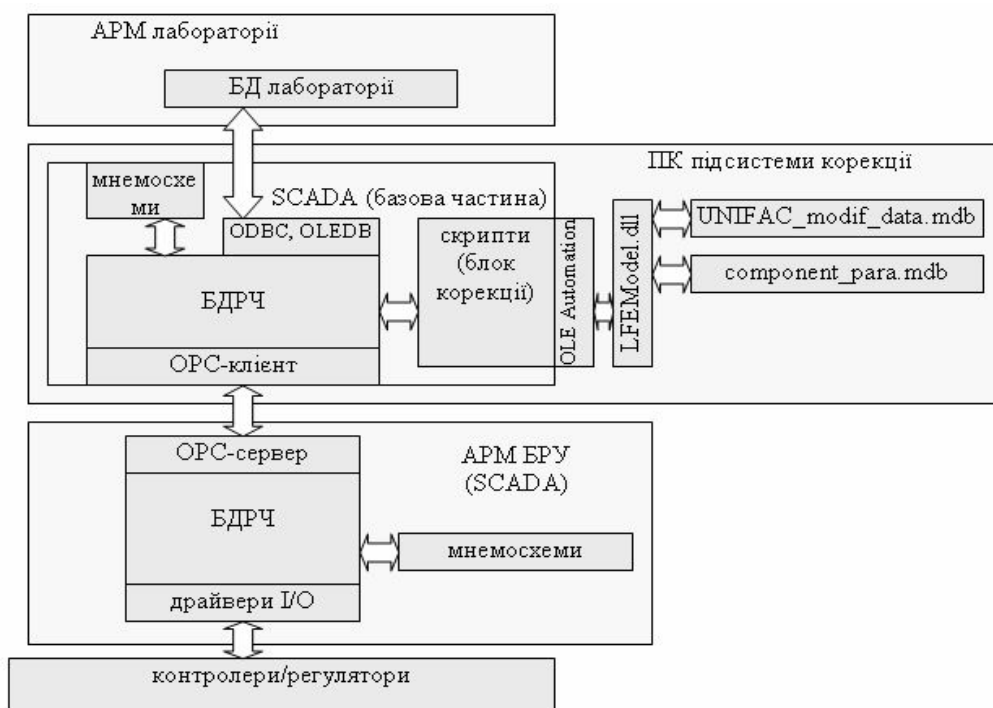


Рис.10. Інформаційна структура АСУ БРУ з підсистемою

Функціонування АСУ БРУ з підсистемою корекції апробовано на Червонослобідському спиртовому заводі в інформаційному режимі. Основні технологічні змінні, які характеризують роботу системи записувались в архів. Введення в роботу підсистеми корекції дало змогу підвищити процент виходу спирту класу "люкс" на 11% (86% проти 75%), зменшити втрату етанолу з головною фракцією на 0,55% (1,77% проти 2,32%), та зменшити витрату пари на 0,7 кг/дал (7,30кг/дал проти 8,07/дал) що складає 8,7%.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі запропоновано новий підхід до управління роботою БРУ шляхом розробки і реалізації алгоритмів оперативної корекції технологічного режиму за прямими показниками якості бражки на основі математичної моделі процесу епіюрації, що дає змогу підвищити ефективність функціонування БРУ та забезпечити стабільно високий рівень вилучення домішок.

1. Існуючі системи автоматизації БРУ базуються на стабілізації непрямих показників процесу, надійно підтримують заданий температурний і гідродинамічний режим колон, характеризуються достатньо високими динамічними властивостями та робастністю, проте не можуть забезпечити стабільно високий рівень вилучення домішок у разі зміни їх складу і концентрацій у бражці.

2. Запропоновано доповнити існуючі системи управління БРУ підсистемою оперативної корекції технологічного режиму за прямими показниками якості бражки на основі математичної моделі процесу епіюрації.

3. Побудовані математичні моделі статички та динаміки епіюраційної колони з будь-якою кількістю живлень для трикомпонентних розділювальних сумішей типу "етанол-вода-домішка" для їх використання в структурі системи управління та аналізу колони як об'єкту управління.

4. Результати імітаційного моделювання показали ефективність використання Модифікованого Методу ЮНІФАК (Дортмунд) для моделювання фазової рівноваги для абсолютної більшості характерних для процесу брагоректифікації компонентів.

5. Дослідження статичних характеристик епіюраційної колони показало, що як канали управління, роботу яких необхідно коригувати за зміни якісних показників бражки, доцільно обрати: «випаровування домішок з відгінної частини - витрата пари», «вилучення домішок з колони - витрата головної фракції» і «концентрація домішок у головній фракції - витрата води на гідроселекцію».

6. Аналіз динамічних характеристик епіюраційної колони показав доцільність використання каскадного регулювання, за якого завдання веденим регуляторам тисків коригується регуляторами співвідношень витрат, розрахованими на основі математичної моделі.

7. Аналіз спостережності та керованості епіюраційної колони як об'єкта управління показав, що необхідною умовою повної спостережності є доповнення вектору спостереження змінними якісних показників бражного дистиляту, а умовою розширення області керованості є доповнення вектору управління витратою води на гідроселекцію.

8. Розроблені структури та алгоритми контурів управління випаровуванням домішок та функціональну структуру системи управління процесом брагоректифікації, з урахуванням вимог до неї та її інтеграції в єдину комп'ютерно-інтегровану систему управління заводом.

Список праць, опублікованих за темою дисертації

1. Пупена О.М., Ельперін І.В. Інтеграція систем управління. // Харчова і переробна промисловість. – 2005. - №1. С. 9-11.
2. Пупена О.М., Ельперін І.В., Ладанюк А.П. Особливості проектування комп'ютерно-інтегрованих систем управління // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2005 - №2(16). – С.142-151.
3. Пупена О.М., Ельперін І.В., Ладанюк А.П. Використання концепції ОРС в сучасних системах автоматизації // Автоматизація виробничих процесів. - 2003. - №1, С.65-70.
4. Пупена О.М. Використання модифікованого методу UNIFAC (Дортмунд) для розрахунку паро-рідинної рівноваги при моделюванні процесів ректифікації у виробництві харчового етилового спирту // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2007. - №22 С.61-63.
5. Пупена О.М., Ельперін І.В., Вдосконалення системи автоматизації брагоректифікаційної установки // Харчова промисловість. -2008. - №6 С.119-122.

6. Пупена О.М., Ельперін І.В. Використання сучасних програмно-технічних засобів для вдосконалення роботи автоматизованих систем керування БРУ спиртового виробництва // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції "Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодення і перспективи", Ч. II – К.: НУХТ, 2005. – С. 45-46.
7. Пупена О.М., Луцька Н.М., Ельперін І.В. Проектування комп'ютерно-інтегрованих систем: курс лекцій для студ. спец. 7.092502 "Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва" напряму підготовки 0925 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навч. – К.: НУХТ, 2007. – 142 с.
8. Пупена О.М., Ладанюк А.П. Задача координації в багаторівневих ієрархічних комп'ютерно-інтегрованих системах управління // Програма і матеріали 66-ої студентської наукової конференції, Ч.ІІ- К.:УДУХТ, 2000,- 74с.
9. Пупена О.М., Ельперін І.В. Шляхи вдосконалення систем автоматизації БРУ // Матеріали 11-й міжнародної конференції по автоматичному управлінню «Автоматика-2004», м.Київ, 2004, Т. 2. – С. 51.
10. Пупена О.М., Ельперін І.В., Кушков В.М. Використання технології OPC в розподілених системах управління технологічними комплексами // Харчова промисловість. Додаток до журналу №3. - К.:НУХТ, 2004, - С.138-139.
11. Пупена О.М., Ладанюк А.П. Показники спостережності та керованості в системах управління технологічними процесами // Програма і матеріали 67-ої наукової конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. Ч.ІІ- К.:УДУХТ, 2001,- С.122.
12. Пупена О.М. Розробка підсистем адаптації в автоматизованих системах управління брагоректифікаційними установками // Матеріали XIV Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2007), м.Севастополь, 10-14 вересня 2007 року. - Ч.1. – Севастополь: СНУЯЄтаП, 2007. - С.181-182.

АНОТАЦІЯ

Пупена О.М. Автоматизоване управління брагоректифікаційною установкою з використанням алгоритмів оперативної корекції технологічного режиму. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2008.

Дисертація присвячена розробці нового підходу до підвищення ефективності системи управління брагоректифікаційною установкою за рахунок реалізації алгоритмів оперативної корекції технологічного режиму за прямими показниками якості бражки на основі математичної моделі процесу епіюрації, що дає змогу забезпечити стабільно високий рівень вилучення домішок. Розроблено математичну модель епіюраційної колони з декількома вводами живлення для трикомпонентних розділювальних сумішей типу "етанол-вода-домішка" з

використанням модифікованого методу UNIFAC (Дортмунд). Проведено аналіз статичних і динамічних характеристик об'єкту управління, визначено його спостережність та керованість. Розроблено алгоритми і структура контурів управління епіюраційною колоною з використанням алгоритмів оперативної корекції технологічного режиму. Розроблено функціональну, технічну та інформаційну структуру АСУ БРУ з підсистемою корекції.

Ключові слова: брагоректифікаційна установка, епіюраційна колона, вилучення домішок, математична модель, модифікований метод UNIFAC, статичні і динамічні характеристики, оперативна корекція технологічного режиму, спостережність, керованість, алгоритм управління, структура контуру управління

АННОТАЦИЯ

Пупена А.Н. Автоматизированное управление брагоректификационной установкой с использованием алгоритмов оперативной коррекции технологического режима. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2008.

Диссертация посвящена вопросу разработки нового подхода для повышения эффективности систем управления брагоректификационной установкой (БРУ) с целью повышения качества пищевого спирта. Качество спирта определяется наличием в нем вредных примесей, которые образуются, в основном, в процессе приготовления бражки. Из-за большого количества неконтролируемых возмущений, которые возникают в процессе приготовления бражки, невозможно добиться ее стабильного качества. Задача очистки спирта возлагается на процесс брагоректификации, значительную роль в котором играет эпіюрационная колона. Традиционные системы автоматизации БРУ основаны на непрямых показателях процесса (температура, давление, расход) и обеспечивают поддержание стабильных температурных и гидродинамических режимов. Однако эти параметры не коррелируют с количеством примесей, вследствие их малых концентраций, и поэтому не могут обеспечить стабильно высокое качество спирта в условиях изменения содержания и концентрации примесей в бражке.

Предложено дополнить существующие АСУ БРУ подсистемой оперативной коррекции технологического режима по прямым показателям качества бражки на основе математической модели процесса эпіюрации, что позволит обеспечить стабильно высокий уровень извлечения примесей.

Разработана математическая модель статики и динамики эпіюрационной колоны с несколькими вводами питания для трехкомпонентных смесей типа "этанол-вода-примесь" с учетом работы колоны под различными давлениями. Статическая модель для двухкомпонентной смеси получена с использованием метода теоретических тарелок, а для моделирования многокомпонентной смеси использован "принцип пропорциональности". Особое внимание уделено расчету фазового равновесия, так как точность его моделирования значительно влияет на точность процессов в колонне. В связи с необходимостью моделирования смесей с большим количеством компонентов под разными давлениями решено

использовать эмпирически-теоретические модели. Для моделирования фазового равновесия паровой фазы использовано вириальное уравнение со вторым вириальным коэффициентом. Для расчета коэффициентов активности компонентов в жидкой фазе при моделировании элюционной колоны впервые использован Модифицированный метод UNIFAC (Дортмунд), выбор которого обусловлен его высокой точностью при расчете свойств бесконечно разбавленных растворов, свойственных процессам элюции. Благодаря тому, что он основан на групповых вкладах молекулярных групп, в работе синтезированы структуры и созданы модели равновесия для этанола, воды и основных примесей, сопутствующих спирту. Для анализа динамических свойств объекта разработана математическая модель динамики элюционной колоны в координатах состояния.

Сравнение результатов моделирования фазового равновесия системы "этанол-вода-примесь" с экспериментальными данными подтвердили, что модель с достаточно высокой точностью отображает поведение этанола и примесей (кроме триэтиламина та триметиламина) при различных давлениях в системе.

С помощью разработанной имитационной модели статики получены результаты распределения этанола и примесей по всей высоте колоны при различных расходах пара, головной фракции и воды на гидроселекцию. На основе этих результатов проведен анализ статических характеристик объекта управления по выбранным каналам.

Проведен анализ наблюдаемости и управляемости объекта. Показано, что полная наблюдаемость объекта возможна при условии дополнения вектора измерения показателями качества бражного дистиллята и расходов продуктов разделения. Предложено расширить область управляемости объекта, дополнив вектор управления расходом воды на гидроселекцию.

На имитационной модели элюционной колоны, построенной в пакете Simulink среды Matlab, получены кривые разгона по основным каналам управления и возмущения, на основании которых проведен анализ динамических характеристик объекта управления.

Сформирован критерий управления элюционной колоны с учетом требований к качеству и экономическим показателям. Анализ полученных статических характеристик дал основание на проведение декомпозиции общей задачи управления элюционной колонной на две подзадачи: управление выпариванием примесей из концентрационной части колоны и извлечение примесей с головной фракцией. С учетом статических характеристик разработаны алгоритмы и структуры контуров управления: выпаривания примесей из отгонной части колоны, извлечением примесей с головной фракцией и извлечением примесей с головной фракцией при подаче воды на гидроселекцию.

Определено, что контур управления выпариванием примесей из отгонной части колоны необходимо реализовать в виде регулятора соотношения расходов пара и бражного дистиллята в каскаде с регулятором стабилизации давления в кубе колоны. Показано, что контур управления извлечением примесей с головной фракцией необходимо реализовать в виде регулятора соотношения расходов головной фракции и бражного дистиллята в каскаде с регулятором стабилизации

давления над верхней тарелкой колоны. Также определено, что контур управления извлечением примесей с головной фракцией при подаче воды на гидроселекцию необходимо реализовать в виде регулятора соотношения расходов воды на гидроселекцию и головной фракции.

Разработана функциональная структура системы управления процессом брагоректификации с учетом алгоритмов оперативной коррекции технологического режима и ее интеграции в единую компьютерно-интегрированную систему управления предприятием.

Ключевые слова: брагоректификационная установка, эспурационная колона, извлечение примесей, математическая модель, модифицированный метод UNIFAC, статические и динамические характеристики, оперативная коррекция технологического режима, алгоритм управления, структура контура управления.

SUMMARY

Pupena A.N. Automated control of beer-distillation plants used algorithms of operative correction of a technological regime. - the Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Cand.Tech.Sci. on a trade 05.13.07 - automation of control processes. - National university of food technologies, Kiev, 2008.

The dissertation is devoted to development of the new approach to raise of a system effectiveness of control beer-distillation plant by installation due to implementation of algorithms of operative correction of a technological regime on direct quality factors of a distillers' beer. The existing system is supplemented with a subsystem of correction with the built-in mathematical model of process of epuration. The mathematical model of epuration column with any quantity of feeding into of a feed is developed. For modelling vapor-liquid equilibria of "ethanol - water - admixture" used modified method UNIFAC (Dortmund). Made up analysis static and dynamic characteristics of control equipment, its controllability and supervising are determined. Algorithms and framework of control loops by a epuration column with use of algorithms of operative correction of a technological regime are developed. The functional, technical and information framework of control system beer-distillation plant with a subsystem of correction is developed.

Keywords: beer-distillation plant, epuration column, extraction of admixtures, the mathematical model, modified method UNIFAC (Dortmund), static and dynamic characteristics, operative correction of a technological regime, a control algorithm, framework of a control loop.