УДК 662.753.3+547.915
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.2/06

Бугаєва Л.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Абрамова А.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Билбас Д.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЦЕСУ АБСОРБЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗУ ВІД CO_2 РОЗЧИНОМ МЕТИЛДИЕТАНОЛАМІНУ

У статті проведено дослідження процесу очищення газів від діоксиду вуглецю з використанням метилдиетаноламіну (MDEA). Авторами проведено аналіз найбільш вживаних в світі методів очищення промислових газів від CO_2, розглянуто їх переваги та недоліки. В першу чергу розглянуто найпоширеніші методи – хемосорбційні методи, які передбачають використання хімічних реагентів для поглинання CO_2. Крім них розглянуто фізичні методи очищення газу, що базуються на розчиненні CO_2 у спеціальних фізичних абсорбентах або на його уловлюванні за допомогою мембранних технологій. Мембранна сепарація передбачає використання напівпроникних мембран, що селективно пропускають CO_2, і має переваги у вигляді компактності, простоти експлуатації та низького енергоспоживання. Хімічна абсорбція є найпоширенішим методом очищення газів від CO_2 і базується на хімічних реакціях між CO_2 та реагентами, що утворюють розчинні сполуки. Особливу увагу авторами приділено абсорбційному методу на основі використання метилдиетаноламіну. Як показує аналіз, MDEA забезпечує високу ступінь очищення газу за мінімальних енергетичних витрат. Авторами пропонується варіант схеми автоматизації процесу, що включає контури для контролю таких параметрів як тиск, температура, концентрація CO_2, рівень рідини. Цей варіант схеми автоматизації забезпечений системою дистанційного керування насосами, регулюючими клапанами та іншими технологічними апаратами. В роботі досліджено математичну модель процесу абсорбції CO_2 у розчині MDEA, реалізовану в програмному середовищі MATLAB. Крім того, запропоновано проводити налаштування регуляторів різними методами (ПІД-регулятори, методи оптимізації) та обрано оптимальні значення параметрів процесу, що забезпечують його стабільність. Отримані результати досліджень основних показників якості керування підтверджують ефективність запропонованої системи автоматизації та її відповідність сучасним вимогам енергоефективності та екологічної безпеки.

Ключові слова: *очищення газу, вуглекислий газ, метилдиетаноламін, автоматизація, контур контролю, математична модель, регулятор, оптимізація, MATLAB.*

Постановка проблеми. У світлі глобальних кліматичних викликів і посилення екологічного контролю, очищення технічних газів від вуглекислого газу (CO_2) набуває особливого значення. Це актуально як для хімічної, так і для енергетичної промисловості. Сучасні технології газоочищення відіграють важливу роль у промисловості, особливо у контексті зменшення викидів парникових газів та збереження навколишнього середовища. Очищення від вуглекислого газу (CO_2) є критично важливим процесом для хімічної, металургійної, енергетичної та інших галузей промисловості. Одним із найефективніших методів видалення CO_2 є хімічна абсорбція за допомогою розчину метилдиетаноламіну (MDEA), який широко використовується у промислових системах очищення газу. Метилдиетаноламін (MDEA) є третинним аміном, що має високу селективність до CO_2 при одночасному збереженні низької реакційної здатності до інших компонентів газової суміші, таких

© Бугаєва Л.М., Абрамова А.О., Билбас Д.О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

як сірководень. Це дозволяє ефективно видаляти CO_2, мінімізуючи втрати інших компонентів. Традиційно у промисловості використовують процес абсорбції CO_2 гарячим розчином поташу, який забезпечує високу ефективність очищення завдяки хімічним реакціям карбонатно-бікарбонатної рівноваги, що дозволяє уловлювати значну кількість CO_2. Однак за кордоном усе більше набуває переваги метод очищення газу за допомогою метилдиетаноламіну (MDEA), так як є одним із найефективніших способів хімічної абсорбції. MDEA має високу селективність до CO_2 за умови низької здатності реагувати з іншими компонентами газової суміші, що призводить до зменшення побічних витрат. Перевагами використання MDEA є низька енергоємність регенерації розчину, висока стійкість до термічного та хімічного розкладу, зменшення корозійного впливу на обладнання, а також економічна та екологічна доцільність у порівнянні з традиційними амінами, такими як моноетаноламін (MEA) або діетаноламін (DEA).

Для підвищення ефективності процесу очищення газу необхідно автоматизоване керування, яке забезпечить стабільність параметрів, знизить витрати енергії та реагентів, а також підвищить загальну продуктивність системи. Автоматизація дозволяє підтримувати оптимальну концентрацію MDEA, регулювати температуру, тиск та витрату абсорбенту, а також контролювати баланс між швидкістю абсорбції CO_2 та витратами на регенерацію розчину.

В дослідженні пропонується ефективний підхід до автоматизації процесу очищення газу на основі хімічної абсорбції CO_2 розчином метилдиетаноламіну, який забезпечує високу ефективність видалення забруднень при знижених енергетичних витратах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні існує кілька методів очищення газів від CO_2, які базуються на різних фізико-хімічних принципах. Найпоширенішими з них є хемосорбційні методи, які передбачають використання хімічних реагентів для поглинання CO_2. Загальноприйнятими для видалення CO_2 із технологічних газів у виробництві аміаку використовуються методи, зокрема з використанням розчину моноетаноламіну (MEA) або гарячого розчину поташу (K_2CO_3), активованого діетаноламіном. Ці методи базуються на хімічних реакціях між CO_2 та абсорбентами, що дозволяє ефективно видаляти домішки з газових потоків [1].

Фізичні методи очищення газу базуються на розчиненні CO_2 у спеціальних фізичних абсорбентах або на його уловлюванні за допомогою мембранних технологій. До таких методів належить фізична абсорбція, що передбачає розчинення CO_2 у рідких розчинниках, таких як метанол, пропіленкарбонат. Перевагами цього методу є низькі енергетичні витрати та можливість регенерації абсорбенту без високотемпературного нагріву, проте ефективність значно залежить від тиску газу, а також обмежена розчинність CO_2. Мембранна сепарація передбачає використання напівпроникних мембран, які селективно пропускають CO_2, і має переваги завдяки компактності, простоти експлуатації та низького енергоспоживання. Однак вона має високу вартість мембран та обмежений ступінь очищення при низьких концентраціях CO_2 [1].

Хімічна абсорбція є найпоширенішим методом очищення газів від CO_2 і базується на хімічних реакціях між CO_2 та реагентами, що утворюють розчинні сполуки. Одним із найбільш використовуваних реагентів є моноетаноламін (MEA), що характеризується високою швидкістю реакції та здатністю поглинати значну кількість CO_2. Однак цей метод має значні недоліки, серед яких висока енергоємність регенерації, корозійна активність та деградація розчину під час експлуатації. Альтернативою є гарячий розчин поташу (K_2CO_3), активований діетаноламіном, який потребує менше енергії для регенерації та є більш стабільним. Водночас цей метод є менш ефективним при низьких концентраціях CO_2 та потребує підвищених температур для забезпечення ефективної роботи [1].

У XXI столітті були запропоновані нові методи очищення газів від CO_2, зокрема з використанням розчину метилдиетаноламіну (МДЕА), активованого піперазином. Цей метод характеризується низькою енергомісткістю регенерації, меншою корозійною активністю та зниженою деградацією розчину порівняно з традиційними методами. Його основним недоліком є нижча швидкість реакції з CO_2 порівняно з MEA, через що для підвищення ефективності процесу застосовують активатори, наприклад, піперазин [2].

З метою підвищення ефективності очищення газу від CO_2 у деяких випадках застосовують комбіновані методи, такі як амінокарбонатні процеси, що поєднують використання амінів (наприклад, MDEA) та карбонатних розчинів для прискорення поглинання CO_2. Також активно використовуються гібридні мембранно-абсорбційні техноло-

гії, які передбачають попереднє мембранне відділення CO_2, а потім його доочищення хімічною абсорбцією [2].

Серед доступних методів очищення газів хімічна абсорбція виявилась найефективнішою, особливо у разі використання MDEA як абсорбенту. MDEA відзначається високою селективністю до CO_2, низьким споживанням пари на регенерацію, а також зниженою корозійною активністю, що значно продовжує термін служби обладнання. Процес полягає у поглинанні CO_2 в абсорбері та його подальшому виділенні у регенераторі з використанням теплової енергії.

На рис. 1 представлено один з варіантів технологічної схеми очищення газу від CO_2 за допомогою метилдиетаноламіну [3, 4]. Важливими вузлами системи є абсорбер, регенератор, теплообмінники, насоси, конденсатори та система циркуляції розчину. Конденсат із процесу збирається у сепараторі конденсату (102-F) та відводиться за допомогою насоса конденсату (106-J). Частина використаної пари конденсується і повертається у вигляді конденсату пари, а для підтримки балансу в систему додається необхідна кількість додаткової води. Оптимізація процесу включає використання добавок, таких як піперазин (Pz), що покращує кінетику абсорбції, а також оптимізацію складу розчинника (35–37% MDEA, 3–5% Pz, решта – вода) і вдосконалення теплообмінних апаратів для зменшення втрат тепла. Це забезпечує високу ефективність процесу очищення газу від CO_2 при низьких енергетичних витратах.

Постановка завдання. Метою статті є представити розроблену авторами автоматизовану систему керування процесом очищення газу від CO_2 за допомогою метилдиетаноламіну, яка дозволить підвищити ефективність процесу, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільність роботи установки.

У відповідності до поставленої мети авторами було вирішено такі задачі.

1. Дослідити технологічний процес очищення газу від CO_2 за допомогою MDEA та визначити його ключові параметри.

2. Проаналізувати існуючі методи автоматизації подібних процесів та обрати оптимальні підходи.

3. Розробити відповідні схеми автоматизації, а саме: технологічну, функціональну та принципову схеми. Забезпечити відповідне обладнання для автоматизації процесу.

4. Створити алгоритми автоматичного регулювання концентрації абсорбенту, температури та витрати газу.

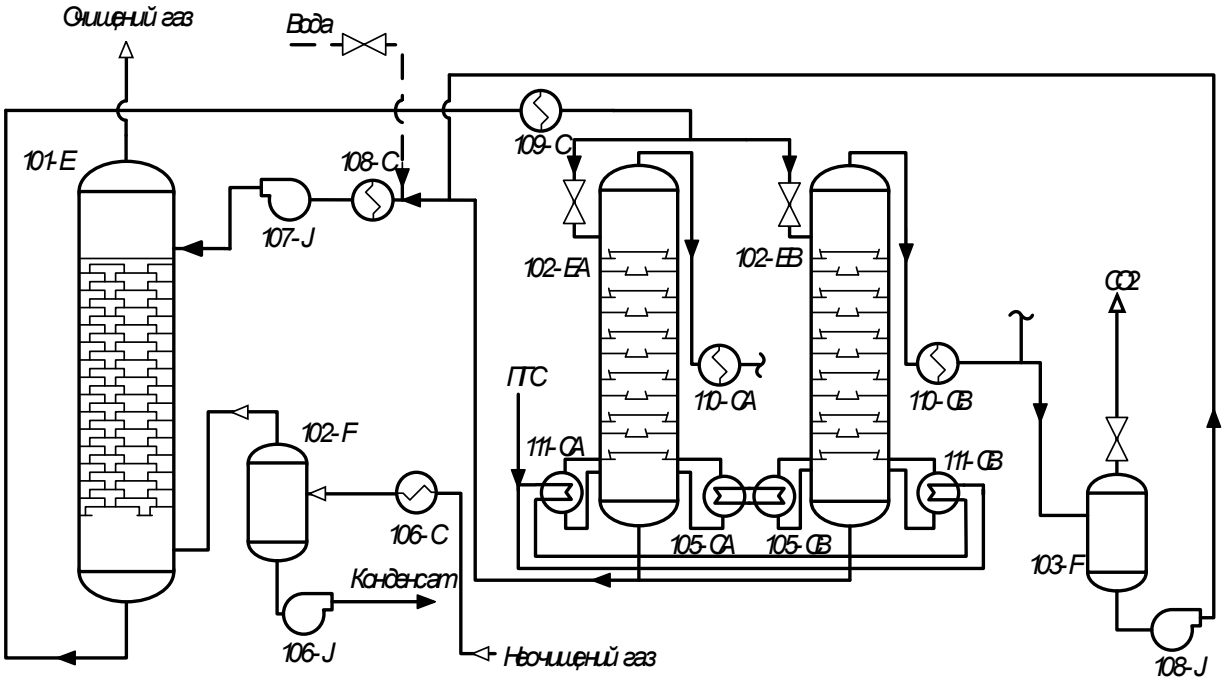

Рис. 1. Система видалення CO_2 на основі MDEA для аміачного заводу: 102-E – абсорбер, 102-F – сепаратор конденсату, 102-EA/102-EB – регенератор, 103-F – відстійник рефлюкс-конденсату, 105-CA/105-CB – нагрівник регенератора, 106-J – насос конденсату, 107-J – насос збідненого розчину, 108-C – охолоджувач збідненого розчину, 109-C – теплообмінник збагаченого розчину, 110-CA, 110-CB – конденсатор регенератора, 111-CA/111-CB – паровий нагрівач

5. Провести моделювання та аналіз ефективності впровадженої автоматизованої системи.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення максимальної ефективності процесу очищення в дослідженні було запропоновано оптимальну систему автоматизації [3]. На підставі аналізу технологічної схеми сформовано вимоги до контролю наступних параметрів:

– тиску та температури в апаратах;
– витрати розчину та газу;
– рівня рідини;
– концентрації CO_2 у газі на вході та виході з абсорбера.

Вибір технічних засобів базувався на надійності, точності та здатності інтегруватися з програмованими логічними контролерами Siemens S7-1200. Авторами пропонуються для промислового впровадження контури регулювання температури на базі тиристорних регуляторів, витрат на базі частотних перетворювачів Danfoss FC 301), а також контроль вмісту CO_2 у газі з використанням газоаналізаторів та програмо́ваних логі́чних контро́лерів (ПЛК).

Всі сигнали з датчиків мають передаватися на ПЛК, після чого оброблятися, відображатися на панелі оператора, і використовуватися для керування клапанами, насосами та обігрівачами. До того ж треба передбачити реалізацію системи аварійного захисту та сигналізації. Схема автоматизації процесу наведена на рис. 2.

У процесі дослідження також була розроблена принципова електрична схема керування електродвигунами насосів, які циркулюють розчин MDEA. Система передбачає живлення через

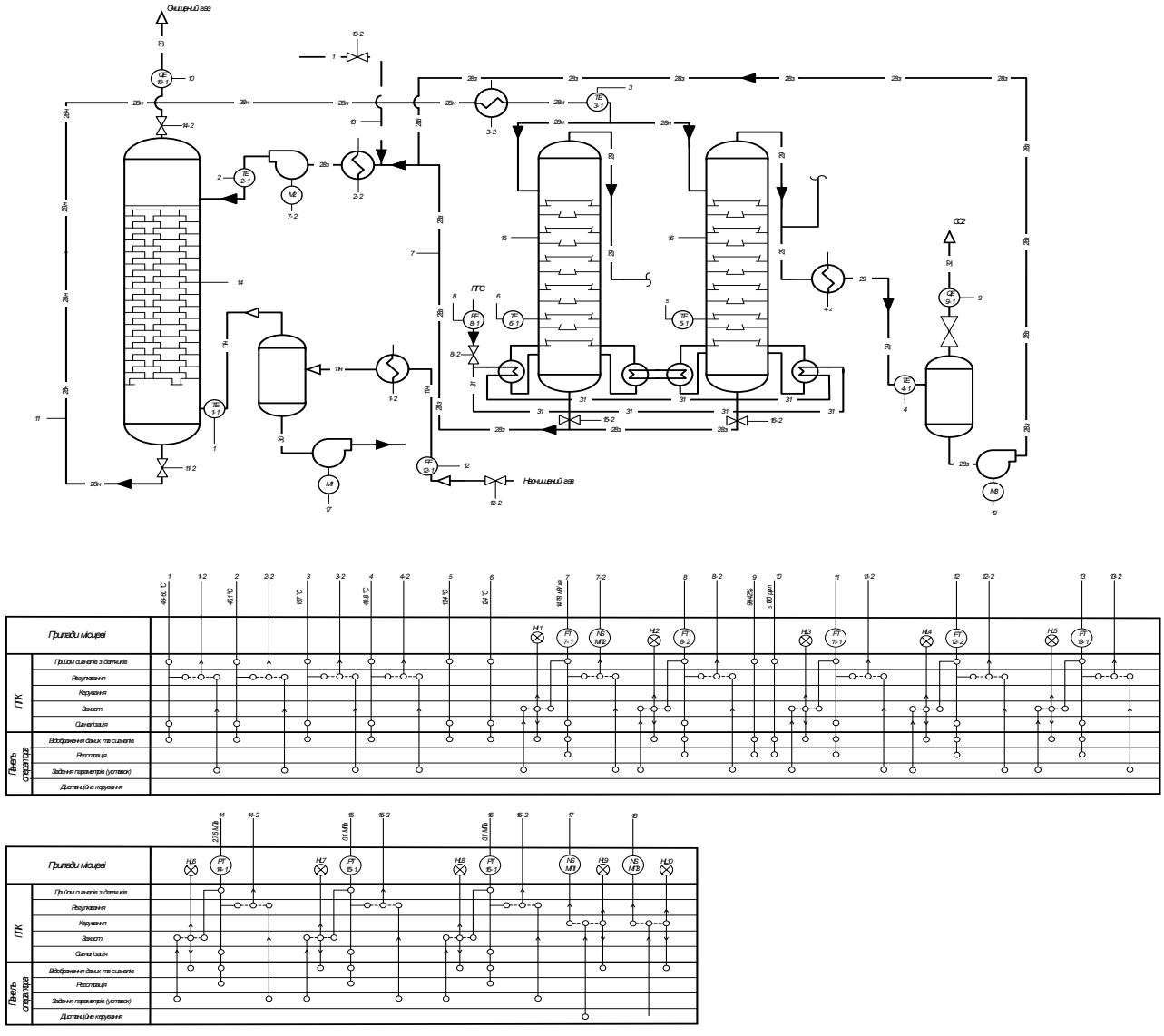

Рис. 2. Схема автоматизації процесу

частотні перетворювачі Danfoss з вбудованим захистом, а також релейну сигналізацію і аварійне відключення. Монтажно-комутаційну схему пропонується реалізувати з урахуванням клемних колодок і модулів аналогових/дискретних сигналів SM1234 та SM1223. Це дозволить оперативно підключати, змінювати або доповнювати конфігурацію схеми без суттєвих змін у програмному коді.

Для оцінки ефективності автоматизованої системи було створено математичну модель процесу абсорбції в середовищі MATLAB, яка враховує масо- та теплоперенесення, а також кінетику хімічної реакції [2]. Система рівнянь моделі набуває вигляду (1):

$$\begin{cases} \dfrac{dy}{dt} = \dfrac{G}{V_g}\left(Y_{CO2_{in}} - Y\right) - \dfrac{K_v S}{V_g}\left(Y - Y_{CO2_{out}}\right) \\ \dfrac{dx}{dt} = -\dfrac{L}{V_g}\left(X_{CO2_{in}} - X\right) - \dfrac{K_v S}{V_g}\left(X - X_{CO2_{out}}\right) \end{cases}. \quad (1)$$

Рівняння енергетичного балансу для зміни температури T рідкої фази по висоті абсорбера:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{K_T}{V_l}\left(T_{in} - T\right) - \frac{K_v S}{V_l * C_p}\left(Y - Y_{CO2_{out}}\right)\Delta H. \quad (2)$$

Для лінеаризації рівняння приймаємо стаціонарні значення для вхідних параметрів і вводимо відхилення від їхніх стаціонарних значень. Таким чином, замість значень, які змінюються, працюємо з відхиленнями від стану рівноваги. Рівняння після лінеаризації наведено нижче.

$$\frac{d\Delta X}{dt} = \frac{L_0}{V_L}\left(-\Delta X\right) + \frac{1}{V_L}\left(X_{in} - X_0\right)\Delta L + \frac{K_v S}{V_l}\left(\Delta Y - K_0 \Delta X\right), \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta Y}{dt} = \frac{G}{V_G}\left(-\Delta Y_{CO2_{in}} - \Delta Y\right) - \frac{K_v S}{V_G}\left(\Delta Y - K_0 \Delta X\right). \quad (4)$$

Рівняння у просторі станів:

$$\begin{cases} \Delta \dot{X} = a_{11}\Delta X + a_{12}\Delta Y + b_1 \Delta L \\ \Delta \dot{Y} = a_{21}\Delta X + a_{22}\Delta Y + b_2 \Delta Y_{CO2_{in}}. \end{cases} \quad (5)$$

Застосовуємо перетворення Лапласа для отриманого рівняння:

$$\left(sI - A\right)X\left(s\right) = B*U\left(s\right) \rightarrow Y\left(s\right) = C\left(sI - A\right)^{-1} B*U\left(s\right). \quad (6)$$

Далі отримаємо функцію за каналом «керування-вихід» яка має вигляд:

$$W\left(s\right) = \frac{0.0004021}{s^2 + 1.194e04s + 1.379e07}. \quad (7)$$

Побудована модель дозволила вивчити динаміку системи, а також провести ідентифікацію стійких і нестійких режимів. Додатково виконано синтез та налаштування ПІД-регуляторів температури, витрати та концентрації CO_2 за допомогою автоматичних методів (Tuner, частотний підхід).

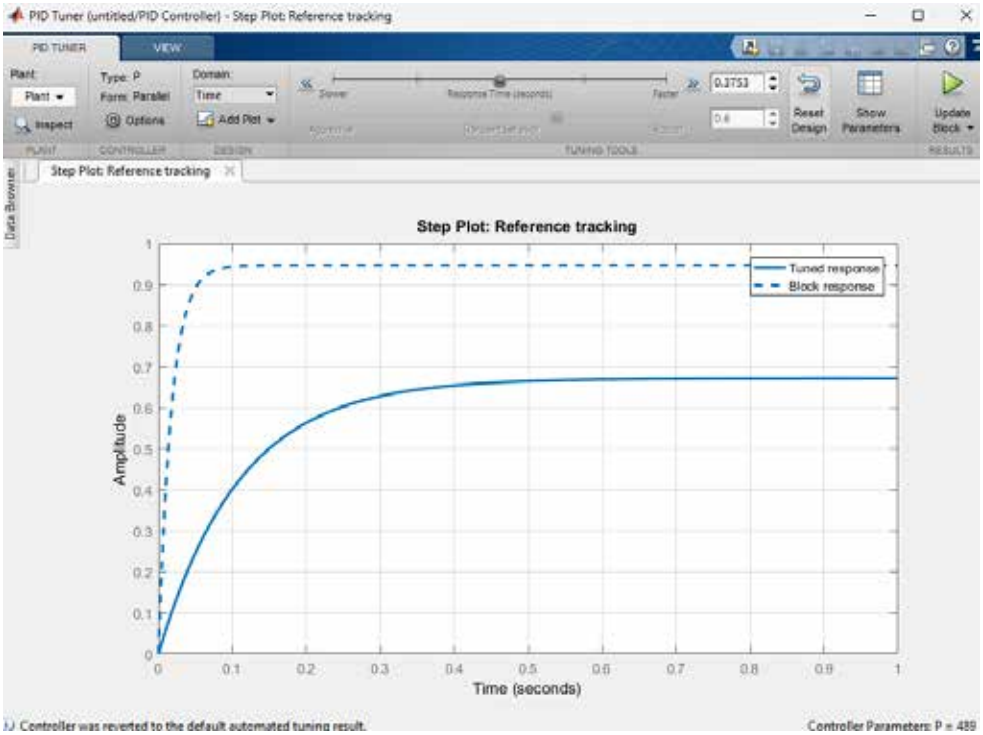

Рис. 3. Результати налаштування P-регулятора в середовищі MATLAB PID Tuner

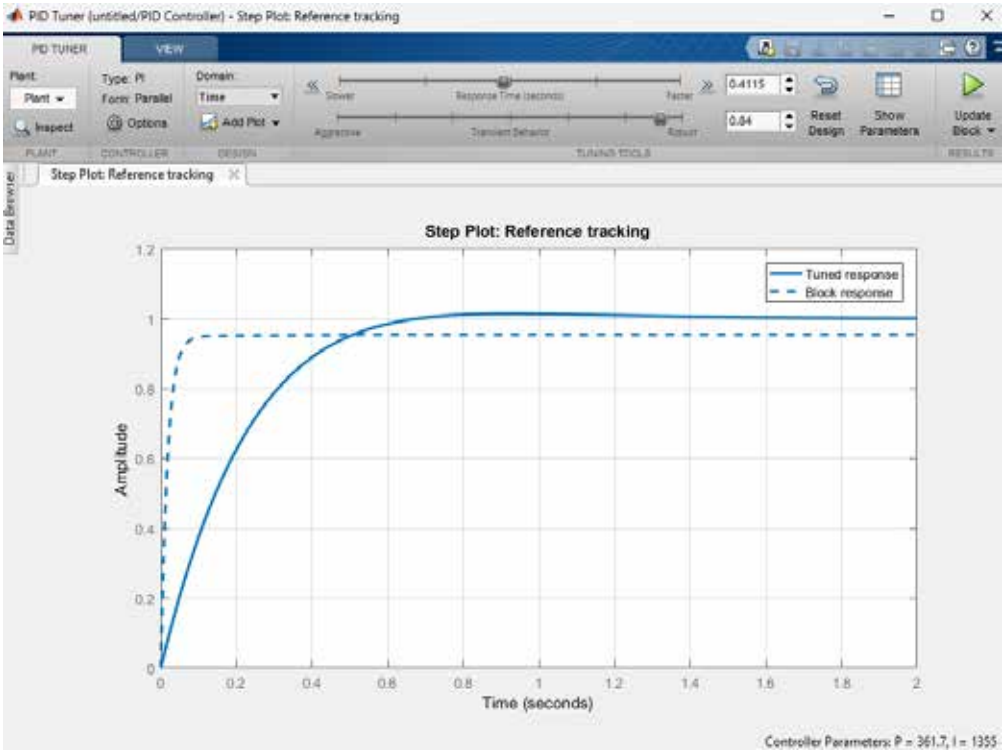

Рис. 4. Результати налаштування PI-регулятора в середовищі MATLAB PID Tuner

На основі побудованої моделі було вирішено задачу статичної оптимізації процесу очищення газу з метою мінімізації витрат MDEA без втрати ефективності вилучення CO_2. Розв'язання задачі з використанням методу штрафних функцій і SQP показало можливість зменшення споживання розчину при збереженні рівня очищення на 99% і вище. Це дозволить не лише знизити експлуатаційні витрати, а й покращити екологічні показники підприємства.

Висновки. У представленому дослідженні пропонується повний інженерний цикл: від аналізу та моделювання процесу очищення до розробки схем керування та оптимізації параметрів. Автоматизована система керування на базі ПЛК Siemens і частотних перетворювачів Danfoss дозволяє досягти стабільної, економічно ефективної та екологічно безпечної роботи установки. Запропоноване рішення застосовує інтеграцію сучасних підходів у галузі хімічної інженерії, автоматизації та системного моделювання, тому може бути основою для впровадження на реальних промислових об'єктах.

Список літератури:

1. Герасимов О. І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища. Одеса, ТЕС, 2018. – 227 с.

2. Технологія зв'язаного азоту: курс лекцій: навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», ОПП «Хімічні технології неорганічних речовин та водоочищення» / А.Л. Концевой, С.А. Концевой ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 8,28 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 293 с.

3. Бугаєва Л. М., Абрамова А. О., Билбас Д. О. Очищення технологічних газів від CO_2 на основі метилдіетаноламіну (MDEA) / Збірник наукових праць XI міжнародної конференції АКІТ-2025. Київ, 7 травня 2025 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2025. – С. 34–35. ISBN 978-966-990-144-6.

4. Combs, G. & McGuire, MDEA Based CO_2 Removal System Process Simulation. URL: https://www.chemengservices.com/co2-removal.html (дата звернення: 06.05.2025).

Bugaieva L.M., Abramova A.O., Bilbas D.O. DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED PROCESS FOR ABSORPTION PURIFICATION OF CO_2 GAS WITH METHYLDIETHANOLAMINE SOLUTION

The article studies the process of gas purification from carbon dioxide using methyldiethanolamine (MDEA). The authors analyze the most widely used methods of industrial gas purification from CO_2 in the world, consider their advantages and disadvantages. First of all, the most common methods are considered – chemisorption methods, which involve the use of chemical reagents for CO_2 absorption. In addition, physical methods of gas purification are considered, which are based on the dissolution of CO_2 in special physical absorbents or on its capture using membrane technologies. Membrane separation involves the use of semi-permeable membranes that selectively pass CO_2, and has the advantages of compactness, ease of operation and low energy consumption. Chemical absorption is the most common method of gas purification from CO_2 and is based on chemical reactions between CO_2 and reagents that form soluble compounds. The authors paid special attention to the absorption method based on the use of methyldiethanolamine. As the analysis shows, MDEA provides a high degree of gas purification with minimal energy costs. The authors propose a variant of the process automation scheme, which includes circuits for controlling such parameters as pressure, temperature, CO_2 concentration, liquid level. This variant of the automation scheme is equipped with a remote control system for pumps, control valves and other technological devices. The paper investigates a mathematical model of the CO_2 absorption process in MDEA solution, implemented in the MATLAB software environment. In addition, it is proposed to adjust the regulators using various methods (PID regulators, optimization methods) and select the optimal values of the process parameters that ensure its stability. The obtained results of studies of the main indicators of control quality confirm the effectiveness of the proposed automation system and its compliance with modern requirements for energy efficiency and environmental safety.

Key words: *gas purification, carbon dioxide, methyldiethanolamine, automation, control loop, mathematical model, regulator, optimization, MATLAB.*

Дата надходження статті: 07.06.2025
Дата прийняття статті: 17.06.2025
Опубліковано: 27.10.2025