

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ Й ІНЖЕНЕРНА БІОТЕХНОЛОГІЯ

УДК. 681.5

С.Є.Стець, к.т.н., О.О. Ганжа

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЦЕСУ ВИДАЛЕННЯ ВОДНЮ З ПРОДУВНИХ ГАЗІВ СИНТЕЗУ АМІАКУ

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

В роботі розглянуто спосіб підвищення ефективності процесу синтезу аміаку за рахунок видалення водню з продувних газів на мембранній газорозділювальній установці та розроблена, в середовищі *Mat Lab*, математична модель системи регулювання концентрації водню у вихідному потоці мембранного модуля.

Ключові слова: автоматизація, азотно-воднева суміш, синтез аміаку, мембранний метод розділення газів, імітаційна модель.

Вступ. Одним із найважливіших продуктів сучасної хімічної промисловості є аміак. Головне його застосування — виробництво нітратної кислоти і азотних добрив. Крім того, аміак використовують для виробництва багатьох інших хімічних продуктів. Останнім часом зріджений аміак і водний розчин аміаку стали широко застосовувати безпосередньо як азотне добриво.

У техніці головним способом добування аміаку є прямий синтез його з азоту і водню.

Схема технологічного процесу, за якою здійснюється синтезу аміаку на ПАТ «РівнеАЗОТ», представлена на рис. 1.

Азотно-воднева суміш (АВС) подається під тиском в колону синтезу аміаку двома потоками –

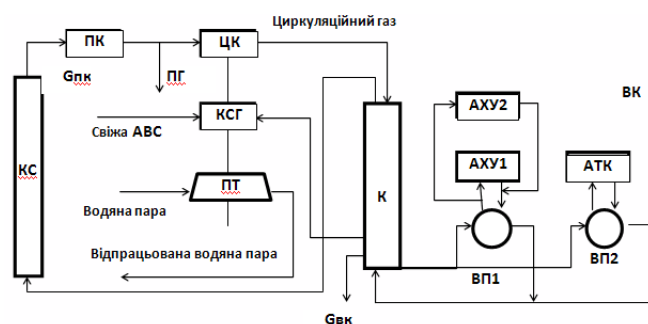


Рис. 1. Узагальнена блок-схема відділення синтезу аміаку:

КС - колона синтезу; ПК, ВК - блок первинної і вторинної конденсації; ЦК - циркуляційний компресор; КСГ - компресор свіжого газу; ПТ - парова турбіна для приводу компресорів; К - конденсаційна колона; ВП1, ВП2 - низькотемпературні аміачні випарники; АХУ1, АХУ2 - абсорбційно-холодильні установки; АТК - турбокомпресорний холодильний агрегат; ГПК, ГВК - продукційний аміак; ПГ - продувні газу

NH_3 , очищується від крапель мастила, що потрапляють у газовий потік під час його стиснення компресорами. Далі АВС надходить у верхню частину конденсаційної колони, з кожухоподібним теплообмінником. Проходячи міжтрубним простором, АВС охолоджується й подається в аміачний випарник, який є аміачним холодильником. Тут, внаслідок випаровування рідкого NH_3 , АВС охолоджується, що призводить до конденсації залишків аміаку. Глибоке очищення АВС від аміаку необхідне для зміщення рівноваги реакції синтезу NH_3 у колоні синтезу. Скраплений аміак відділяється від газового потоку у нижній – сепараційній частині конденсаційної колони. Холодна АВС, очищена від аміаку, проходить трубним простором кожухотрубоного теплообмінника і подається в колону синтезу.

Схема синтезу аміаку — циркуляційна, тобто частина АВС неперервно перетворюється в колоні синтезу в аміак, який виводиться з установки. В циркуляційних газах зростає вміст інертних домішок, що знижує швидкість реакції, а відповідно і техніко-економічні показники процесу. Тому частина циркуляційних, тобто продувних, газів безперервно виводиться з циклу.

Таким чином з продувними газами з циклу виводиться на 1 тону виробленого аміаку близько $110 \text{ м}^3 \text{ АВС}$, що для установки потужністю 1500 тон аміаку на добу еквівалентно втратам приблизно $19 \text{ млн м}^3/\text{год}$ природного газу.

Постановка задачі. Виділення водню з продувних газів замість спалювання їх в якості низькокалорійного джерела тепла дозволяє при тій же продуктивності скоротити енергозатрати на процес синтезу аміаку за рахунок зниження витрат природного і технологічного (синтез-газ) газів на $2...2,5\%$. При постійній витраті природного газу можливе 5% підвищення продуктивності системи.

Отже, враховуючи нинішні ціни на природний газ, а також тенденції до зростання його вартості, перспективними є підвищення ефективності процесу синтезу аміаку за рахунок скорочення затрат природного газу, а саме виділення необхідних для синтезу компонентів, зокрема водню з продувних газів, які містять несконденсований аміак, азот, водень і інші гази.

Процеси виділення водню з продувних газів — адсорбційний, абсорбційний і криогенний, мають ряд суттєвих недоліків (перш за все значні капітальні і експлуатаційні затрати) і, крім процесу низькотемпературної ректифікації не отримали широкого промислового застосування.

Зовсім інші перспективи має мембранний метод розділення газів, який і пропонується до використання на підприємстві.

Вирішення задачі. Розроблена установка виділення водню з продувних газів цеху аміаку, схема якої наведена на рис. 2, передбачає встановлення двох блоків: блоку підготовки Б1 і газорозділювального блоку Б2.

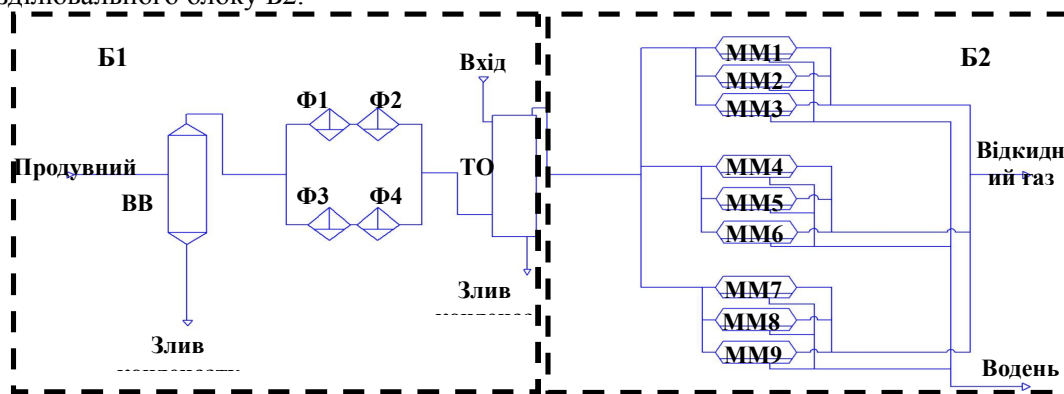


Рис. 2 Схема установки виділення водню з продувних газів:

Б1 - блок підготовки продувних газів; Б2 - газорозділювальний блок; ВВ - вологовідділювач; Ф1...Ф4 – газові фільтри; ТО- теплообмінник; ММ1...ММ9 - мембранні модулі

Продувні гази установки синтезу аміаку містять домішки, які негативно впливають на хід процесу, тому перед подачею в мембранні блоки вони проходять попередню підготовку.

Блок підготовки має каркас, в якому розташовані вологовідділювач, фільтри, теплообмінник, конденсаторівідвідники, арматура і трубопроводи.

Попередньо очищені від парів аміаку продувні гази поступають на вологовідділювач ВВ для видалення вологи, яка негативно впливає на розділення газів. На вході у вологовідділювач встановлений електромагнітний клапан для перекриття газу у випадку підвищення вмісту аміаку більше норми. На трубопроводі виходу газу з вологовідділювача проводиться відбір газу до газоаналізатора для аналізу. Подача газу в газоаналізатор проводиться через редуктор і дросель з метою зниження тиску газу. На трубопроводі виходу конденсату з вологовідділювача встановлений електромагнітний клапан для автоматичного відведення конденсату в ємність. На випадок припинення роботи установки в холодний період при мінусовій температурі навколишнього середовища передбачений обігрів вологовідділювача парою за допомогою змієвика.

Далі гази проходять крізь фільтри (Ф1...Ф4) для видалення дисперсних частинок. Кожен фільтр складається з корпусу, в який встановлений змінний картридж. З'єднання фільтрів виконане парно для створення можливості переключення потоку газу з перших двох фільтрів на другу пару фільтрів з метою заміни картриджів фільтрів, яка повинна проводитися через 4000 годин роботи. Після фільтрів газ надходить на теплообмінник ТО.

Теплообмінник представляє собою посудину, в якій розташовані змієвики. По внутрішньому змієвику подається газ, по зовнішньому – водяна пара з температурою $160...170 \text{ }^\circ\text{C}$. Змієвики знаходяться в розчині антифризу (38% розчин етиленгліколю) з метою забезпечення

рівномірного нагріву газу. Підтримання підвищеної температури продувних газів запобігає конденсації компонентів газу на поверхні мембрани, що призвело б до зниження її пропускної здатності. У теплообміннику продувні газу нагріваються до температури 500 °С. Паровий конденсат після теплообмінника видається в ємність. Після теплообмінника продувні газу поступають в газорозділювальний блок Б2.

Блок газорозділювальний призначений для виділення водню з очищених продувних газів. Блок складається з 3-х груп мембранних модулів, по 3 модуля в кожній групі. Всі три групи працюють на один колектор. На трубопроводах виходу водню і відкидних газів встановлені регулюючі клапани для регулювання потоків газу. На трубопроводах водню, після кожної групи модулів, встановлені датчики тиску, температури, точка відбору газу на аналіз, а також запірні клапани для скидання газу на факел в пусковий період.

Основою мембранних газоозділювальних апаратів є мембранний модуль, що представляє собою пакет однотипних мембранних елементів. Об'єднані в модулі мембранні елементи поміщені в загальний корпус апарату, мають спільні точки введення і виведення потоків газу; схеми руху потоків в каналах мембранних елементів модуля, як правило, ідентичні.

Проникність і селективність мембрани в загальному випадку залежать від типу мембран, температури, тиску і складу суміші в напірному і дренажному каналах. Рушійна сила процесу змінюється вздовж поверхні мембран і залежить від схеми організації і структури потоків в напірному і дренажному каналах.

В загальному на структуру вихідного потоку впливає не лише проникність і селективність мембрани а склад і параметри вхідного потоку. На концентрації компонентів вихідного потоку впливають концентрації цих компонентів у вхідному потоці, їх коефіцієнти проникності, витрата і тиск вхідного потоку. Витрата і тиск підлягають регулюванню і їх значення можна підлаштовувати під конкретні параметри потоку. Коефіцієнти проникності є сталими і тому не впливають на зміну характеристик потоку. Концентрації компонентів у вхідній суміші не підлягає регулюванню і часто може змінюватися у широких межах.

Газорозділювальний блок має систему обігріву мембранних модулів і трубопровід продувки мембранних модулів азотом під тиском 0,5...0,6 МПа. Для збору конденсату пари з теплообмінника, змієвиків вологовіддільвача і з обігріву блоку газорозділювального встановлена ємність, конденсатор і відцентрові насоси.

В результаті розділення отримуються непродифундовані газу і 95 %-й водень, який направляється на повторне використання у виробництві аміаку. Непродифундовані газу дроселюються клапаном з тиску 12,0...14,0 МПа до тиску 1,8...2,0 МПа і видаються через прилад обліку в лінію продувних газів цеху аміаку.

Встановлення описаної вище мембранної газорозділювальної установки потребує менших капітальних затрат ніж установки будь-якого іншого типу і тому саме вона рекомендована для використання в технологічному процесі синтезу аміаку на ПАТ «РівнеАЗОТ». Використання даної установки дозволить знизити затрати природного газу на виробництво аміаку, що, без сумніву, є дуже перспективним в умовах постійного зростання ціни на природний газ.

Рационально спроектована система автоматизації процесу виділення водню з продувних газів на мембранній газорозділювальній установці забезпечить зменшення собівартості завдяки

підвищенню продуктивності устаткування, більш суворому дотриманню заданого технологічного режиму, зниженню витрат сировини, матеріалів та енергії на виробництво, зменшенню кількості обслуговуючого персоналу і т.д.

Для оптимізації піддослідної системи необхідно провести її моделювання в пакеті Matlab Simulink. Це дозволить

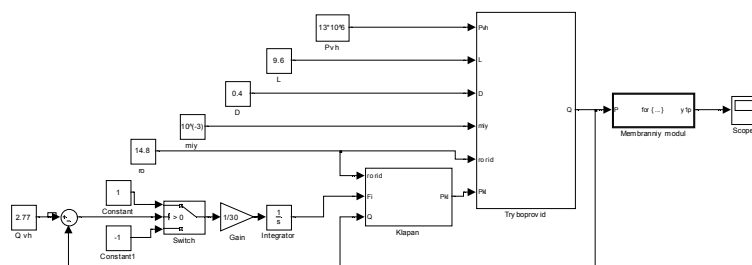


Рис. 3. Імітаційна схема системи регулювання концентрації водню в вихідному потоці мембранного модуля шляхом зміни витрати продувних газів

провести спостереження за системою і перевірити можливість її функціонування в заданих умовах.

Імітаційна схема системи регулювання концентрації водню вихідному потоці мембранного модуля шляхом зміни витрати продувних газів представлена на рис. 3.

Вхідними значеннями схеми є тиск продувних газів (P_{vh}), довжина трубопроводу (L), коефіцієнт динамічної в'язкості (m_{iy}), густина (ρ_0), і вхідна витрата (Q_{vh}). Система керування являє собою двопозиційний регулятор, який на основі розузгодження між заданою і поточною величиною витрати виробляє керуючий вплив для її стабілізації.

Субсистема Клапан є імітаційною моделлю клапана і представлена на рис. 4.

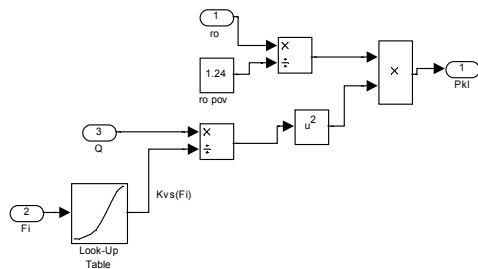


Рис. 4. Імітаційна модель клапана

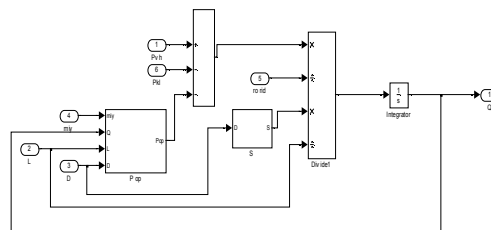


Рис. 5. Імітаційна модель трубопроводу

Дана модель представляє залежність тиску опору клапана в залежності від кута його повороту і поточної витрати при заданому значенні густини.

Субсистема Трубопровод – це імітаційна модель трубопроводу. Вона представлена на рис. 5.

Дана модель показує залежність витрати продувних газів від опору клапану і трубопроводу. Опір трубопроводу обчислюється **субсистемою Pop**, імітаційна схема якої представлена на рис. 6.

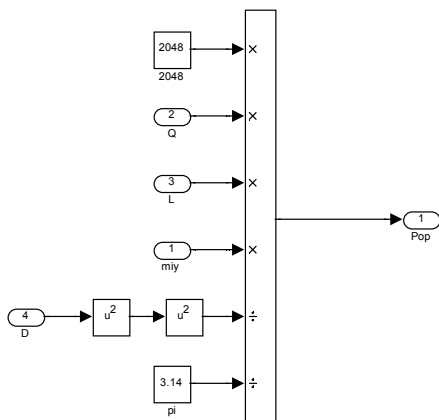


Рис. 6. Імітаційна модель опору трубопроводу

Субсистема Membrannyy modul є імітаційною моделлю мембранного модуля. При розрахунку мембранного модуля для поділу багатоконпонентних сумішей заданими величинами є витрата, склад, тиск і температура вихідного потоку. При проектній і технологічній постановці завдання розрахунку та її вирішенні система рівнянь, що описують процес поділу багатоконпонентної суміші на елементі площі dF , незалежно від гідродинамічних параметрів течії і структури потоків в елементі, має вигляд:

$$-d(y_{i0}q) = \frac{\Lambda_i P_i (y_{i0} - P_r y'_i) dF}{\delta}, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

де y_{i0} і y'_i - поточні концентрації i -го компонента біля поверхні мембрани з боку відповідно напірного і дренажного каналів, (моль); N - число компонентів в суміші; Λ_i - коефіцієнт газопроникності i -го компонента, (моль·м/(м²·с·Па)); q - локальна витрата газу в порожнині високого тиску, (моль/с).

Нехтуючи концентраційною поляризацією, прийнемо, що склад суміші по висоті напірного і дренажного каналів постійний і змінюється тільки по довжині L модуля. Тоді $y_i = y_{i0}$ і $y_{iA} = y'_i$, і

$$\text{рівняння (1) можна переписати у вигляді: } -d(y_i q) = \frac{\Lambda_i P_i (y_{i0} - P_r y_{iA}) dF}{\delta}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Крім того, будемо вважати, що тиски P_1 і P_2 в каналах модуля і коефіцієнти проникності компонентів суміші Λ_i постійні протягом всього процесу.

$$\text{Систему рівнянь (2) необхідно доповнити умовою: } \sum_{i=1}^N y_i = \sum_{i=1}^N y_{iA} = 1 \quad (3)$$

Систему рівнянь (2) з урахуванням (3) з (N-1) лінійно незалежними змінними можна представити у вигляді:

$$\frac{dq_1'}{dF} = \frac{P_1}{\delta q_f} \left(\sum_{j=1}^N y_j \Lambda_j - P_r \sum_{j=1}^N y_j \Lambda_j \right) = -f_1 \frac{P_1}{\delta q_f} \quad (4)$$

де $q_1' = \frac{q}{q_f}$ - безрозмірна величина.

Спільним рішенням рівнянь (4) і (2) отримаємо систему:

$$\frac{dy_j}{dq_1'} = -f_1 y_i - \Lambda_i (y_i - P_r y_{iA}) / (dq_1' f_1), \quad \frac{dF}{dq_1'} = -(1/f_1) \left(\frac{\delta q_f}{P_r} \right), \quad (5)$$

з граничними умовами: $F(q_1' = 1) = 0$; $y_i(q_1' = 1) = y_{if}$; $y_i(q_1' = 1 - \theta) = y_{ir}$; (6)

У загальному випадку для рішення системи рівнянь (5) необхідно знати (або задати) конкретний вид функції $y_{iA} = f(y_i)$ або, більш точно, з урахуванням реального (або заданого) профілю концентрацій (швидкостей) по висоті напірного і дренажного просторів модуля: $y_1' = f(y_{i0})$.

Концентрацію i-го компонента в дренажному просторі визначають зі співвідношення:

$$y_{iA} = d(y_i q_1') / \sum_{j=1}^N (y_j q_1') \quad (7)$$

В апараті з порожнистими волокнами при подачі вихідної суміші на міжтрубний простір модуля і відведення перміату з капілярного простору застосовується модель ідеального перемішування в напірному каналі. У цьому випадку у будь-якій точці порожнини високого тиску $y_i = y_{ir}$, а це, в свою чергу, призводить до того, що у будь-якому місці дренажного простору $y_{iA} = y_{ip}$. Тоді з системи (2) після її інтегрування отримаємо для i-го і j-го компонентів:

$$y_{ip} = y_{if} \Lambda_i / [P_r \Lambda_i + \sum_{i=1}^N [\Lambda_i (y_i - P_r y_{iA})]] \quad (8)$$

Після підстановки в (8) y_{ir} з (7) маємо:

$$y_{ip} = y_{if} \Lambda_i / (\Lambda_i [P_r + \theta(1 - P_r)] + \sum_{j=1}^N \Lambda_j \{y_{if} - y_{ip} [P_r(1 - \theta) + \theta]\}) \quad (9)$$

Систему рівнянь (9) і (7), необхідних для розрахунку мембранного поділу багатокомпонентних газових сумішей, розв'язують, як правило, ітераційними методами. Дана система є математичною моделлю мембранного модуля для розділення багатокомпонентних сумішей.

Модель мембранного модуля для розділення продувних газів з урахуванням числових значень параметрів має вигляд, представлений на рис. 7.

Вхідними параметрами даної моделі є: $y_1(y_{1f})$, $y_2(y_{2f})$, $y_3(y_{3f})$ - концентрації у вхідній суміші газів відповідно водню, азоту, і метану; $A_1(\Lambda_1)$, $A_2(\Lambda_2)$, $A_3(\Lambda_3)$, - відносна проникаюча здатність відповідно водню, азоту, і метану для заданої мембрани; Pr - відношення тисків в дренажному і

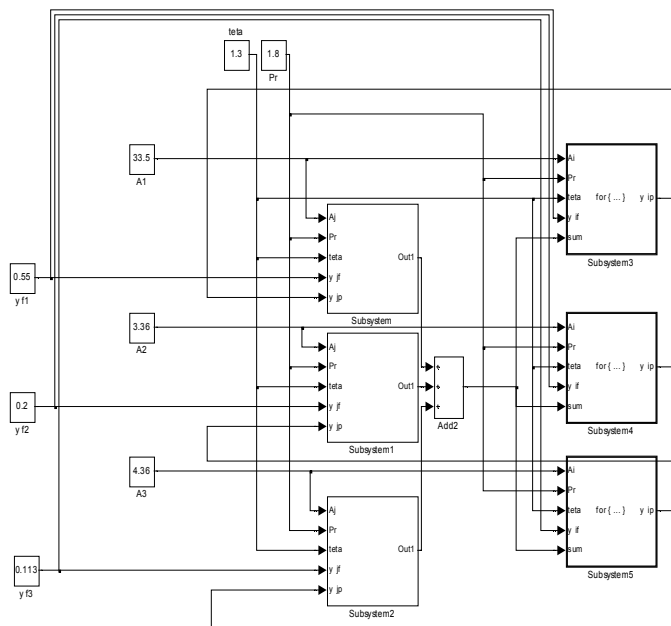


Рис. 7. Імітаційна модель мембранного модуля для розділення продувних газів цеху аміаку

напірному каналах; θ - коефіцієнт розділення потоку, рівний відношенню витрат газу в дренажному і напірному каналах.

Вихідними величинами є: y_{1p}, y_{2p}, y_{3p} - концентрації у вихідній суміші газів відповідно водню, азоту, і метану. Дана модель містить два типи субсистем.

Ітераційна субсистема (рис.8) забезпечує обчислення y_{ip} , з врахуванням значення sum . Використання ітераційної субсистеми зумовлене наявністю у математичній моделі арифметичної петлі, яка унеможливорює знаходження розв'язку звичайними методами.

Інший тип субсистеми (рис. 9) використовується для обчислення виразу $\sum_{j=1}^N \Lambda_i \{y_{if} - y_{ip} [P_r(1-\theta) + \theta]\}$.

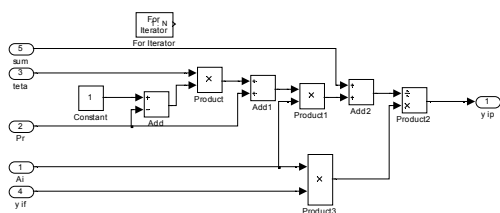


Рис. 8. Субсистема Subsystem

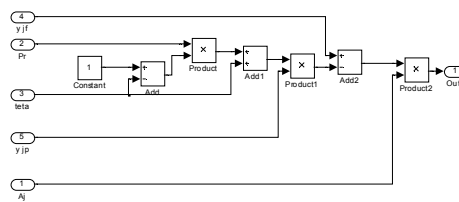


Рис.9. Субсистема Subsystem3

Результатом даної підсистеми є значення цього виразу для одного компонента суміші при поточному значенні y_{ip} .

Сумою результатів усіх таких підсистем є величина sum , що використовується в ітераційних субсистемах.

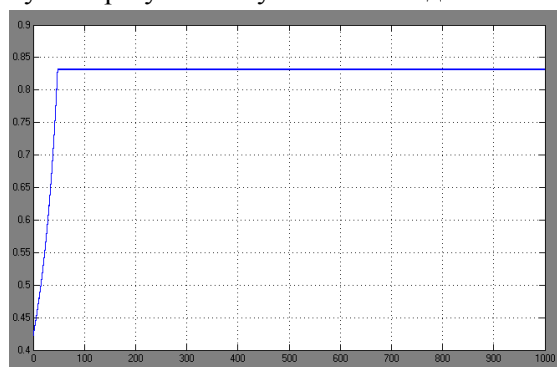


Рис. 10. Результати моделювання

В результаті моделювання отримана залежність, зображена на рис. 10.

Висновки. Шляхом моделювання досліджено і оптимізовано систему автоматичного керування процесом видалення водню з продувних газів синтезу аміаку на мембранній газорозділювальній установці.

Аналізуючи результати моделювання, наведені на рис. 10, можна зробити висновок, що дана система є адекватною, а перехідна характеристика відповідає теоретичній залежності.

Дану систему автоматичного керування процесом виділення водню на мембранній газорозділювальній установці доцільно використовувати, так як похибка становить 0,16%, що суттєво на якість процесу розділення не вплине.

Використання даного способу регулювання дозволить досягти необхідного значення концентрації водню у вихідному потоці мембранного модуля та, відповідно, досягти найвищої ефективності системи.

Список літературних джерел

1. Стенцель Й.І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Навч. посібник – К.: ІСДО.1995.-360с.
2. Документація ВАТ “РівнеАзот” цеху аміаку (А-2,): інструкції, регламент та ін.
3. “Справочник азотчика” под ред. Симунина Н.А., М. Химия, 1978, 456 с.
4. Шарков А.А. и др. Автоматическое регулирование и регуляторы в химической промышленности / Шарков А.А., Притыко Г.М., Палюх Б.М. - Химия, 1990. - 128 с.
5. Прилади для вимірювання та контролю рівня, тиску, витрати: <http://www.baltpribor.ru/product.php>.
6. «Мембранное разделение газов», Дытнерский Ю. И., Бриков В. П., Каграманов Г. Г.,- М., Химия, 1991.
7. «Вплив температури первинної конденсації на ефективність експлуатації великотонажних агрегатів синтезу аміаку.», Бабіченко А. К., Тошинський В. І. / WWW.CRYOGENMASH.RU.