

УДК 665.511(047)

Г.В. Кулінченко, П.В. Леонт'єв, О.О. Ляпощенко
Сумський державний університет

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ СЕПАРАЦІЇ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Кулінченко Г.В., Леонт'єв П.В., Ляпощенко О.О. Ідентифікація моделі процесу низькотемпературної сепарації природного газу. У статті аналізуються відомі моделі низькотемпературної сепарації газу. На основі сформованого критерію керування процесом ідентифікуються параметри моделі об'єкта. Проводиться візуалізація результатів моделювання в середовищах Flowvision і Matlab

Ключові слова: критерій керування, стала часу, математична модель, природний газ, сепарація
Форм. 7 Рис.7. Лит.10

Кулинченко Г.В., Леонтьев П.В., Ляпощенко А.А. Идентификация модели процесса низкотемпературной сепарации природного газа. В статье анализируются известные модели низкотемпературной сепарации газа. На основании сформированного критерия управления процессом идентифицируются параметры модели объекта. Проводится визуализация результатов моделирования в средах Flowvision и Matlab.

Ключевые слова: критерий управления, постоянная времени, математическая модель, природный газ, сепарация
Форм. 7 Рис.7. Лит.10

Kulinchenko G.V., Leontev P.V., Laposchenko A.A. Identification of the model low temperature separation process of natural gas. The paper analyzes the known models of low-temperature gas separation. Formed on the basis of criteria identified by the process control parameters of the model object. Visualization of simulation results carried out in environments Flowvision and Matlab.

Keywords: control criterion, the time constant, the mathematical model, natural gas, separation

Постановка проблеми. Розглядаючи завдання керування установкою комплексної переробки природного газу[1], можна констатувати, що найбільш відповідальними об'єктами автоматизації установки є процес теплообміну та низькотемпературної сепарації (НТС). В результаті НТС відбувається остаточна очистка газу від конденсату та вологи. Логікою розвитку енергетичних об'єктів - підготовки природного газу до транспортування є підвищення ефективності функціонування процесу НТС. Вирішення завдань підвищення ефективності зазвичай відбувається на базі автоматизованих систем керування, які дозволяють не тільки оптимізувати режими роботи системи, але й реалізувати завдання дистанційного керування об'єктом. Та розбудова будь якої системи керування передбачає наявність моделі об'єкту керування. Відомі на цей час моделі процесів НТС достатньо громіздкі та потребують багато програмно-апаратних ресурсів в разі їх використання. Тому такі моделі важко реалізувати в мікропроцесорному виконанні. Слід відзначити проплинність у часі параметрів процесу НТС, що викликає додаткові складнощі в проектуванні системи керування єдиного процесу підготовки природного газу до транспортування.

Таким чином актуальне завдання досліджень полягає в параметризації моделі процесу НТС, придатної для її мікропроцесорної реалізації.

Аналіз публікацій. Застосування технологічних моделюючих систем [2] для моделювання процесів промислової підготовки газових конденсатів (до складу якої входить НТС) дозволяє оцінювати оптимальні технологічні режими роботи і визначати кількість води і метанолу у всіх потоках промислової установки. Для цього використовуються модулі розрахунку процесів сепарації, краплеутворення, поділу рідин, дроселювання і теплообміну.

Зважаючи на технологічні проблеми процесу НТС, з метою забезпечення матеріального балансу рідкої і газової фаз в сепараторі, методом аналізу матеріальних потоків розроблена лінеаризована математична модель статички і динаміки процесу[3]. Завдання функціонування моделі полягає в підтримці матеріального балансу рідкої і газової фаз в сепараторі. У разі використання сучасних технологій модель НТС передбачає регулювання складу вихідної суміші газу при заданих температурі і тиску.

Подальшим розвитком процесів моделювання [2] є розробка інформаційно-моделюючої системи [4], яка адаптується до умов та особливостей роботи конкретної промислової установки. Розрахунки, на основі яких можуть бути обрані оптимальні технологічні режими установки, дозволяють оцінити показники товарної продукції, та виробити рекомендації відносно підвищення ефективності режимів роботи.

В процесі розвитку нових низькотемпературних газодинамічних технологій сепарації природного газу вдається застосувати математичні моделі [5], які дозволяють візуалізувати та оцінювати рух газокраплинних потоків в газосепараторах в режимі реального часу.

Та зважаючи на сформовані завдання досліджень, розглянуті підходи до моделювання процесів НТС не дають відповіді на питання про можливості розбудови каналів керування процесом. Аналіз сучасних класичних систем автоматизації газопромисловими об'єктами[6,7] дозволяє виробити стратегію розробки апаратно-програмного комплексу, який зможе забезпечити підвищити ефективність процесу НТС

Невирішені проблеми. Сучасний рівень автоматизації установок комплексної підготовки газу(УКПГ) обумовлює використання програмованих логічних контролерів(ПЛК), які на базі програмного комплексу, реалізованого на мовах МЕК 61131-3, (наприклад CoDeSys) забезпечують функціонування завдань керування польового рівня. ПЛК успішно забезпечують стабілізацію і програмне керування локальних регуляторів. Програмне забезпечення локальних систем регулювання складається відповідно до функціональних залежностей, які відпрацьовані спеціалістами на етапах моделювання об'єкту [2-4]. Проте, в разі зміни поточних некерованих параметрів процесу корекція його режимів здійснюється операторами верхнього рівня системи керування, в результаті чого на процес керування впливову складову накладає «людський фактор». Крім нестационарності параметрів цього процесу, певні труднощі в організації ефективного керування процесами НТС проявляються в нелінійному характері моделі. Останні складності традиційно долаються з допомогою лінеаризації моделі в вибраній точці[3], втім зрозуміло, що при зміні характеристик процесу, тобто відходу від цієї точки, необхідна корекція параметрів оптимального регулятора.

Тактика адаптації параметрів регулятора нелінійної моделі зазвичай залишалась невирішеною, оскільки вважалось, що автоматичний регулятор на базі нелінійної моделі виявляється складним для його реалізації. Дійсно, якщо формувати закон керування на основі многокритеріальної оптимізації, то труднощі реалізації виявляються ще на етапі ідентифікації моделі. Тому, приймаючи до уваги складність всього процесу НТС, на цьому етапі досліджень роботу розглянемо процес НТС без теплообмінника.

Якщо формувати критерій керування на базі одного з параметрів, то визначити ефективність роботи сепаратора достатньо складно. Це обумовлено суперечливим впливом параметрів процесу на показник вологості газу, що сепарується. Логічно створити критерій керування, спираючись на комплекс взаємопов'язаних параметрів, від яких залежить кількість відібраних продуктів. Враховуючи принципи визначення критерію керування та можливості впливу керуючих параметрів на досліджуваній об'єкт, можна констатувати, що математична модель процесу НТС повинна враховувати як вхідні параметри – витрати газу, тиск, температуру, так і змінні параметри (канали керування), які впливають на вихідні параметри - вологість газу і його температуру.

Труднощі в формалізації параметрів моделі сепарації пов'язані з характером течії газового потоку, оскільки на різних ділянках характер течії газу нерівномірно змінюється. Тому передумовою опису досліджуваного об'єкту є моделювання течії газу на різних ділянках установки сепарації.

Метою дослідження є вивчення характеристик течії газу на різних ділянках установки сепарації; визначення та ідентифікація параметрів моделі процесу сепарації; оцінка ступені впливу змінних параметрів на вихідні; отримання критерію керування, який дозволить синтезувати мікропроцесорний регулятор процесу НТС.

Основні результати дослідження. Для проведення аналізу характеристик течії газу в сепараторі скористаймось спрощеною схемою процесу НТС, яка представлена на Рис.1. Вхідним потоком сепараторної установки є газова суміш, що підлягає очищенню, а вихідні потоки складаються з очищеного газу, конденсату та сконденсованої води.

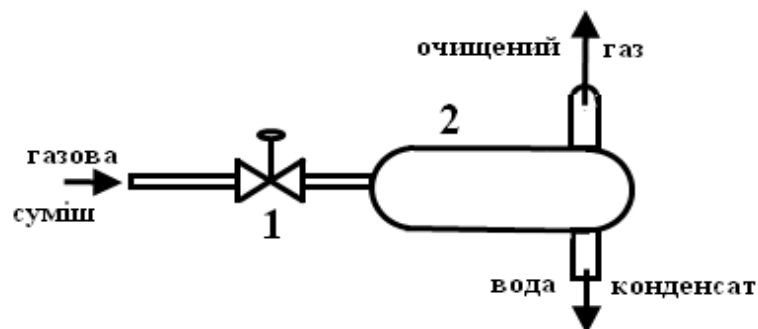


Рис. 1 Схеми процесу НТС

1- Дросель; 2-Сепаратор

Процес НТС відбувається завдяки ефекту дроселювання (ефект Джоуля - Томсона). В залежності від ступеня відкриття дросельного штуцера змінюється його гідравлічний опір, який і визначає глибину дросельного ефекту.

Опис процесів течії природного газу формується на базі системи рівнянь – нерозривності, руху та енергії:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V * \nabla) * V + \frac{1}{\rho} \nabla p = 0 \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + V * \nabla \right) * \left(c_v T + \frac{|V|^2}{2} \right) + \frac{1}{\rho} \nabla(pV) = 0 \quad (3)$$

де V - швидкість течії газу; ρ - питома щільність газу, p - тиск газу; c_v - теплоємність при постійній щільності; T – температура

Виходячи з системи рівнянь (1)...(3), для аналізу розподілу поля течій газу в процесі НТС можна скористатись програмним середовищем *FlowVision* [8], яка дозволяє чисельно розв'язати наведені рівняння.

Необхідною умовою моделювання є отримання та імпортування геометрії сепаратора та дроселя з допомогою системи автоматизованого проектування (САПР) *Autodesk Inventor*. В результаті створюється розрахункова область, в якій визначені рівняння (1)...(3) та межі об'єму, де сформовані граничні умови.

Достатньою умовою моделювання є створення початкової розрахункової сітки. В нашому випадку вибрана сітка, яка утворює 15x15x15 (3375) точок. Для точних розрахунків їх кількість збільшується, але при цьому значно зростає час розрахунків.

В моделі враховано, що природний газ має властивість повністю стискуватись. Початкові значення параметрів задаються для всієї розрахункової області: температура, концентрація, тиск та швидкість.

У постпроцесорі, що входить до системи моделювання, налаштовуються і задаються параметри візуалізації отриманих результатів, які стосуються необхідних прошарків моделі.

Необхідні початкові дані моделювання отримаємо з умови забезпечення необхідної продуктивності сепарації газу $Q=19,5 \text{ м}^3/\text{с}$ при значенні вхідного тиску $p_{вх}=9,0 \text{ МПа}$:

$$Q = \mu_d S \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

де μ_d - коефіцієнт витрат дроселя; S - площа прохідного отвору дроселя;

Δp – перепад тиску на дроселі.

Скориставшись довідковими даними про конструктивні параметри дроселя (S), $\mu_d=0,7$, отримуємо перепад тиску Δp для двох різних значень прохідного отвору дроселя: $\Delta p_a=2,0 \text{ МПа}$ і $\Delta p_b=4,0 \text{ МПа}$.

Додаткові параметри моделювання - швидкість всередині розрахункового простору $U=38 \text{ м/с}$ і початкова температура газу $T=283 \text{ К}$, дають змогу отримати розподіл поля тисків процесу НТС.

На Рис.2 представлені розподіл поля тисків в трубі з дроселем при $\Delta p_a=2,0 \text{ МПа}$ (Рис.2а) і $\Delta p_b=4,0 \text{ МПа}$ (Рис.2б)

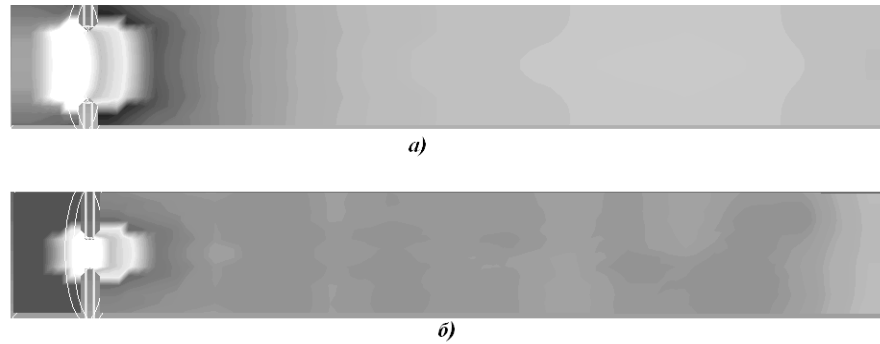


Рис.2. Розподіл поля тиску в трубі з дроселем

На Рис.3 відображено розподіл поля тисків в сепараторі при входному тиску $p_a=7,0$ МПа (Рис. 3а) і $p_a=5,0$ МПа (Рис. 3б) відповідно.

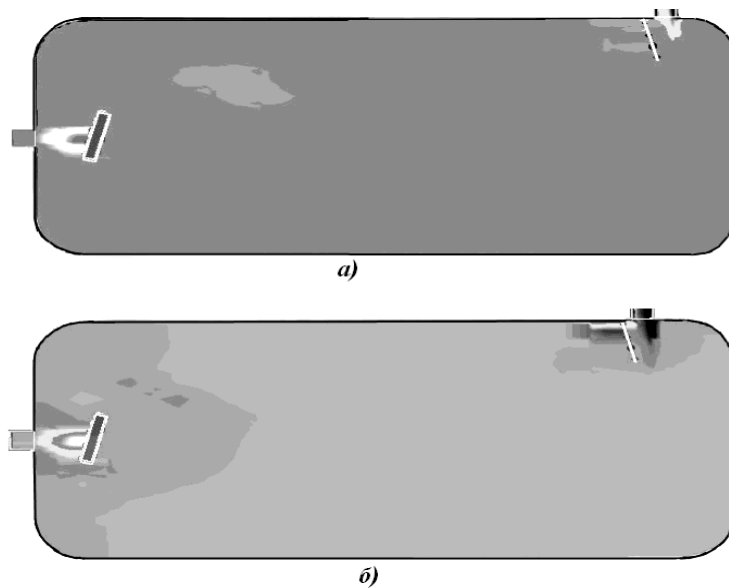


Рис.3. Розподіл поля тиску в низькотемпературному сепараторі

Взагалі практичний інтерес представляє розподіл поля «дросель-сепаратор», оскільки в сенсі керування об'єктом необхідно оцінювати вплив зміни керуючого параметру на поле течії газу. Проте процес розрахунків такою моделлю займає багато часу та ускладнює візуалізацію результатів. Тому модель процесу НТС була поділяється на функціональні частини, при цьому потік газу з труби приймається за вхідний потік для сепаратора.

Аналіз розподілу течії газу процесу НТС показує, що основні зміни процесу сепарації відбувається в дросельному пристрої, а поле тисків сепаратора характеризується достатньою рівномірністю.

Не меншої уваги з точки зору керування процесом заслуговує розподіл поля температур процесу НТС, оскільки місткість вологи в природному газі залежить від співвідношення значень його температури та температури точки роси (ТТР).

Моделювання температурного поля процесу дроселювання газу в середовищі *FlowVision* дозволяє отримати розподіл температур, наведений на Рис. 4.



Рис.4. Розподіл поля температур в трубі з дроселем

Характер розподілу поля температур при дроселюванні газу, що втікає з труби в сепаратор, дає підставу застосувати оцінку усередненої температури сепарації t_c [9], оскільки в подальшому температура суттєво не змінюється:

$$t_c = \frac{\sum_i G_i t_i}{G_c}$$

де G_i – витрати слою перетину; t_i – локальна температура слою;
 G_c – витрати через прохідний перетин

Таким чином результати оцінки вологомісткості газу ψ можна представити сукупністю двох параметрів – тиску і температури T °С [10]:

$$\psi(p, T) = \left[\frac{749}{p} + \exp(0.00007 T^2 - 0.0195 T) \right] * p_{np},$$

де $p_{np} = 10^{-6} * \exp(0.0735 T - 0.00027 T^2)$ пружність водяної пари в насиченому стані.

Якщо в практиці керування процесом НТС використовується ТТР, то вологомісткість газу можна розраховувати по цим же співвідношенням.

Повертаючись до формулювання критерію керування об'єктом, слід підкреслити, що розбудова його моделі повинна враховувати не тільки оцінки ефективності сепарації, а і варіанти апаратно-програмної реалізації.

Протиріччя оцінки ефективності сепарації обумовлені тим, що зменшення вологості газу пов'язано із зменшенням швидкості його течії, відповідно і з продуктивністю установки сепарації. Це обумовлює формування мінімаксного, комплексного критерію керування, який відслідковує мінімальну місткість вологи та конденсату на вході в магістраль при стабільних витратах газу Q , що транспортується:

$$\min_{\psi} \max_Q \{ \Phi(\psi_0, T, \Delta p, V) \} \quad (5)$$

де ψ_0 – початкова вологість газу.

Відповідно до сформованого критерію (5), розглянемо структуру моделі керованого об'єкту, до найважливіших параметрів якої відносяться динамічні характеристики, які входять до рівняння передатної функції по Лапласу $W(s)$.

Для ідентифікації моделі процесу НТС скористайтесь рівнянням Джоуля – Томсона, яке встановлює зв'язок між температурою та тиском газу:

$$T_c = T_{BX} - \chi (p_{BX} - p_c),$$

де T_{BX} , T_c – температура до і після дроселя; p_{BX} , p_c – тиск до і після дроселя; χ – коефіцієнт Джоуля – Томсона.

Взагалі коефіцієнт Джоуля-Томсона для природного газу змінюється від 2 до 4°К/МПа, в залежності від складу газу, падіння тиску та початкової температури газу. З достатньою для моделювання точністю можна прийняти $\chi=3$.

В турбулентному режимі зміна тиску газу зв'язана з витратою газу нелінійним рівнянням (4), тому при переході до відповідної передатної функції отримують трансцендентні рівняння, які складно ефективно апроксимувати, та майже неможливо синтезувати необхідний регулятор.

Досвід показує, що входом з цієї ситуації є апроксимація трансцендентного рівняння передатною функцією аперіодичної ланки першого порядку з запізненням. В результаті передатна функція дроселя після переходу до прирощень має вигляд:

$$W_d(s) = \frac{K}{\tau_d s + 1}$$

де $K = \left(\frac{dp}{dQ} \right)_{Q_0}$ $\tau_d = \frac{V}{RT \alpha}$

s - оператор Лапласа; V - об'єм дроселю; R – стала газова константа; T – температура газу;
 α - провідність турбулентного дроселю.

З достатньою точністю передатну функцію сепаратора можна представити ланкою з запізненням[11]:

$$W_c(s) = \exp(-\tau_c s)$$

де $\tau_c = V_c / Q$ - стала часу затримки ; V_c - об'єм сепаратора.

Коефіцієнти та параметри передатних функцій змінюються в часі та залежать від витрат газу і інших зовнішніх факторів. Ці обставини необхідно враховувати в процесі синтезу системи керування установкою підготовки газу до транспортування та розглядати її як об'єкт керування, що описується рівняннями із змінними коефіцієнтами.

Для візуалізації перехідної характеристики процесу НТС використано середовище MatLab Simulink. Схема моделювання представлена на Рис.5.

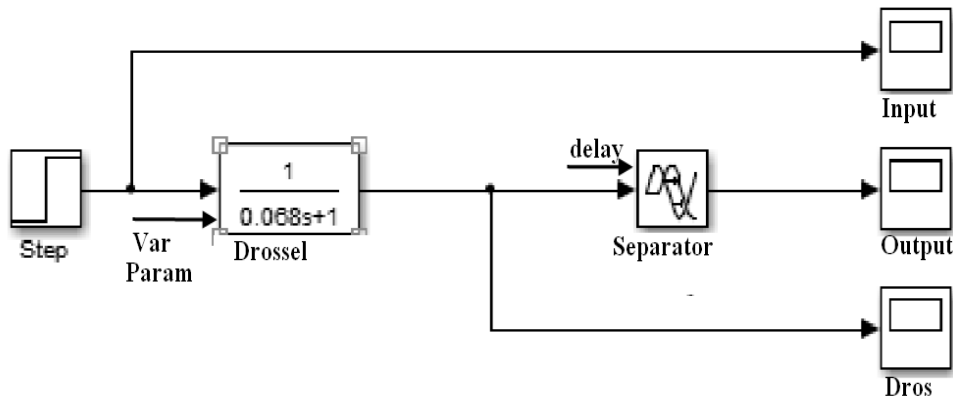


Рис.5. Схема оцінки перехідної характеристики процесу НТС

Для подальших досліджень в схемі передбачена імітація зміни параметрів в часі, що дозволить досліджувати ступінь впливу завод на якість процесу керування.

Висновки. В результаті аналізу процесів НТС проведено ідентифікацію параметрів моделі. Візуалізація процесів дроселювання та сепарації дозволила отримати передатні функції ланок процесу.

Отримана передатна функція представляється як об'єкт з затримкою.

Аналіз вигляду моделі процесу НТС показує, що розроблена модель може бути основою для синтезу регулятора процесу

1. Кулінченко Г. В. Завдання оптимального керування установкою комплексної переробки природного газу/ Г. В. Кулінченко, П. В. Леонтєв//XII Міжнародна науково - технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів».- Кременчук: КрНУ.-2013.-С.23-24
2. Кравцов А.В. Математическое моделирование процессов отделения воды и метанола при промышленной подготовке газового конденсата/А.В. Кравцов, Н.В. Ушева, О.Е. Мойзес, Е.А. Кузьменко//Известия Томского политехнического университета.-2007.- Т. 311, № 3. С.60-63
3. Горбійчук М.І. Математична модель процесу низькотемпературної сепарації газу/ М.І. Горбійчук, Н.Л.Кулинин// Науковий вісник національного технічного університету нафти і газу.- Івано-Франківськ.-2003.-№1(13).-С.88-92.
4. Кравцов А.В. Информационно-моделирующая система процессов промышленной подготовки газа и газового конденсата/ А.В. Кравцов, Н.В. Ушева, О.Е. Мойзес, Е.А. Кузьменко, В.И. Рейзлин, А.А. Гавриков// Известия Томского политехнического университета.-2011.- Т. 318, № 5. С.132-137
5. Роммахи М. Разработка физической модели движения газоконденсатных потоков в рабочей полости ИФ – сепараторов /Мустафа Аль Роммахи, А.В.Логвин, О.О. Ляпощенко// Хімічна промисловість України. -2012.- №6.- С.18-21.
6. Масагутов Р. АСУ ТП установки подготовки газа с расширенной функциональностью системы ПАЗ./ Р. Масагутов// Современные технологии автоматизации.-2012.-№2.-С.20-25.
7. Камский П. Автоматизация установки комплексной подготовки газа на базе отказоустойчивой системы S7-400Н/ П. Камский// Современные технологии автоматизации.-2012.-№2.-С.30-37.
8. Аксенов А.А. Сертификация системы моделирования движения жидкости и газа FlowVision/ А.А.Аксенов, В.В.Шмелев, М.Л.Смирнова, В.В.Банкрутенко, И.В.Нетронин, А.В.Будников, С.А.Рогожкин//САПР и графика. Инструменты АРМ-2006.- №4.- С.80-85.
9. Ахметов Ю. М. Исследование влияния тормозного устройства на структуру потока и параметры изотермического вихрового регулятора давления./ Ю. М. Ахметов, А. Ю. Пархимович, А. В. Сви-стунув, А. А. Соловьев, В. А. Целищев, А. А. Чиндина // Вестник УГАТУ.-2011.-Т. 15, №4 (44). С. 149–153.
10. Гухман Л.М. Подготовка газа северных газовых месторождений к дальнему транспорту./ Л.М Гухман //Л.: Недра.-1980.-161с.
11. Тараненко Б.Ф. Автоматическое управление газопромысловыми объектами/ Б.Ф. Тараненко //М.: Недра.-1976.-217с.