

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.564.27

Пневматичні регулятори в установках одержання інертних газів

Ю. М. Симоненко^{1✉}, Є. В. Медушевський², Є. В. Костенко³¹ТОВ «Кріоін Інжинірінг», пл. Митна, 1-а, Одеса, 65026, Україна;^{2,3}Одеський національний технологічний університет, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна✉ e-mail: ¹ysimonenko@cryoin.comORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-7827-0591>; ²<http://orcid.org/0000-0001-6750-8763>;³<https://orcid.org/0000-0002-8164-6203>

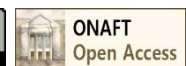
У статті відображено сфери використання пневматичних захисних та регулюючих пристроїв при збагаченні газових концентратів. Розглянуто основні типи редукторів. Наведено приклади технологічних схем, заснованих на застосуванні пневматичних регуляторів. Редуктори типу «після себе» слугують для зниження тиску газу, що подається з ресиверів високого тиску, групи балонів і реципієнтів. Включення таких регуляторів дозволяє знижувати вхідний тиск до рівня, відповідного характеристикам компресорів чи технологічним режимам установок. Редуктори «до себе» слугують для стабілізації тиску в апаратах-джерелах газових концентратів. При відборі у фазовий сепаратор (дефлегматор) Ne-Ne суміші з ряду різнотипних повітророздільних установок такі регулятори здатні забезпечити узгоджену роботу кількох блоків та виключити перетікання суміші та порушення повітророзділення. Редуктори «до себе» можуть виконувати функції превентивної захисної арматури поряд з типовими запобіжними клапанами. На відміну від останніх, регулятори «до себе» мають більшу чутливість і здатні знижувати тиск в установці плавно, не порушуючи технологічний процес. У цьому випадку регулятори налаштовують на 0,2...0,3 МПа нижче тиску спрацьовування основного запобіжного клапана. Наведено приклади контурів, заснованих на використанні пневморегуляторів у системах збагачення інертних газів. Розглянуто випадок відбору суміші безпосередньо з джерела і подавання рівномірно в колону з підвищеним (щодо джерела) тиском. Такий варіант передбачає узгодження витрати компресора з продуктивністю колони за рахунок використання періодичного компримування та ресиверів. Розрахункові моделі дозволяють прогнозувати зміну тиску протягом циклу. Залежно від продуктивності установки обчислюється мінімальний обсяг ресивера, що забезпечує безперервність подачі суміші у колону. Запропоновані схемні рішення дозволяють забезпечити стабільну роботу установок для збагачення концентратів інертних газів.

Ключові слова: Неонгелієва суміш; Фазовий сепаратор; Дефлегматор; Редуктор; Регулятор тиску; Компресор; Ресивер; Ректифікаційна колона; Повітророздільна установка.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2660>

© The Author(s) 2022. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

В останні десятиліття стрімко розвиваються та удосконалюються різноманітні системи управління. Вони стали життєво важливими компонентами установок у енергетиці, нафтохімії, харчовому вироб-

ництві та металургії. Найчастіше сучасні блоки регулювання засновані на використанні параметричних датчиків контролерів пневмо- або електроклапанів. Однак поряд з такими системами застосовуються регулятори тиску і витрати, які не потребують електричного живлення. Наприклад, дітище перших

французьких аквалангістів Емілія Гагнана та капітана Жака-Іва Кусто – акваланг – включає невід’ємну частину – редуктор (від латинського *reductor* – що приводить зворотно). Працюючий із з балонів зі стиснутим до 200 бар газом він дозволяє «повернутися» до відносно безпечного та прийняттого для багатьох пристроїв тиску, наприклад, 0,05 МПа. Редуктори, що підтримують стабільний тиск на виході, знайшли застосування в побуті, опалювальних приладах, газозварювальному устаткуванні та медицині. Багато типових редукторів використовуються у виробництві технічних газів. Вони потрібні в криогенних системах для заправки робочого тіла, забезпеченні роботи низькотемпературних сепараторів, в лабораторіях газового аналізу [1, 2].

2. Основні типи пневматичних регуляторів

Принцип роботи класичного редуктора показано на рис. 1.

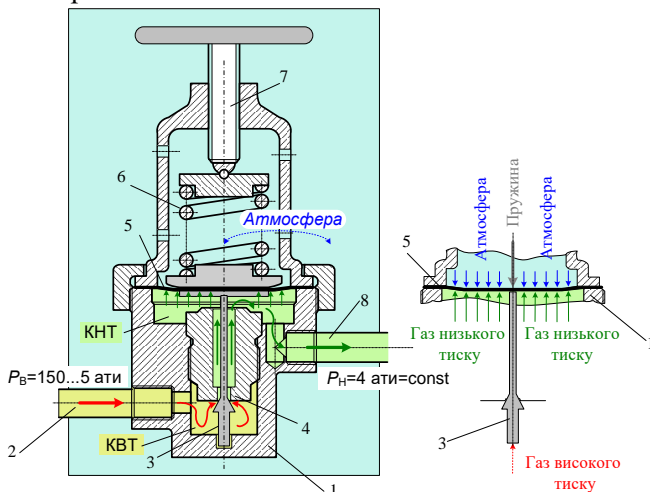


Рисунок 1 – Пристрій редуктора типу «після себе» та сили, що діють на мембрану: КВТ – камера високого тиску; КНТ – камера низького тиску; 1 - корпус; 2 - вхідний патрубок; 3 - клапан; 4 - сідло клапана; 5 - мембрана; 6 - пружина; 7 - регулятор зусилля пружини та тиску на виході; 8 - вихідний патрубок

При викрученому штоку 7 пружина 6 не діє на мембрану 5, і під тиском в камері КНТ вона переміщується вгору. Клапан 3 притискається до сідла 4 і замикає надходження газу високого тиску з КВТ. Шляхом загвинчування регулятора 7 збільшується вплив пружини на мембрану 5. Тепер при зниженні тиску в лінії 8 і камері КНТ клапан відкриється і почнеться підживлення газу з КВТ і лінії 2.

Якщо споживання газу низького тиску зменшиться (припиниться), тиск у КНТ підвищиться. Мембрана 5 переміститься вгору і зменшить (закриє) прохідний переріз клапана 4. У разі падіння тиску під мембраною при зростанні витрати в лінії 8 автоматично збільшиться підживлення за рахунок тиску на клапан з боку пружини 6. Розглянутий тип редуктора, який часто зустрічається на повітряних, кисневих та пропанових балонах, називають регулятором «після себе». Його функція – підтримка стабільного тиску на виході. Це завдання такий пристрій буде виконувати поки тиск у балоні (вхідної лінії 2) не впаде нижче встановленого регулятором значення. Деякі різновиди таких пристроїв показано на рис. 2.

Як правило, на газових редукторах встановлюють по два манометри, які вимірюють тиск на вході та на виході. Вони підключені до камер КВТ та КНТ (рис. 1). Для забезпечення роботи приладів газового аналізу використовують прецизійні регулятори, що підтримують тиск на виході з похибкою $\pm 0,05$ МПа (рис. 2,а). При підвищених витратах газу застосовують двокамерні регулятори з допоміжним контуром (рис. 2,б). Такі пристрої здатні забезпечити витрати до 500 $\text{nm}^3/\text{год}$.

У разі редукування речовин із відносно високими температурами конденсації, наприклад, пропану, зазвичай встановлюють лише один манометр на виході (рис. 2,в). Другий манометр не потрібний, оскільки рівноважний тиск в об’ємі перед редуктором залежить від температури і не відображає кількість речовини в балоні.



Рисунок 2 – Позначення та типи регуляторів «після себе»: а) – прецизійний для газової хроматографії; б) – двокамерний для підвищених витрат; в) – для двофазних речовин із параметрами нижче критичного рівня

Функція іншого типу регуляторів «до себе» позначена їхньою назвою. Вони зобов'язані підтримувати тиск на вході при зміні умов на виході. На перший погляд, пристрій другого регулятора (рис. 3) нагадує конструкцію типового редуктора (рис. 1). Однак у регуляторі «до себе» є суттєві відмінності, які впливають з його функції та конструктивного виконання:

- вхідний потік подається в підмембранну порожнину КВТ;
- клапан повернутий на 180° і відкривається під час підйому мембрани вгору;
- для замикання клапана пружина має бути повністю стиснута. В іншому ці пристрої мають багато спільного і можуть бути виготовлені на основі уніфікованих деталей.

Працює регулятор «до себе» (рис. 3) в такий спосіб. Після налаштування зусилля пружини на мембрані створюється певна рівновага сил. Коли тиск у камері КВТ нижче заданого рівня, мембрана 5 йде вниз і притискає клапан 3 до сидла 4. Витрата газу, що перетікає в нижню камеру КНТ, падає або повністю припиняється. Якщо тиск на вході та в камері КВТ наростає, мембрана переміщується вгору, і клапан 3 відкривається. Величина вхідного регульованого тиску може бути збільшена при вкручуванні штока 7 тобто стиснення пружини 6.

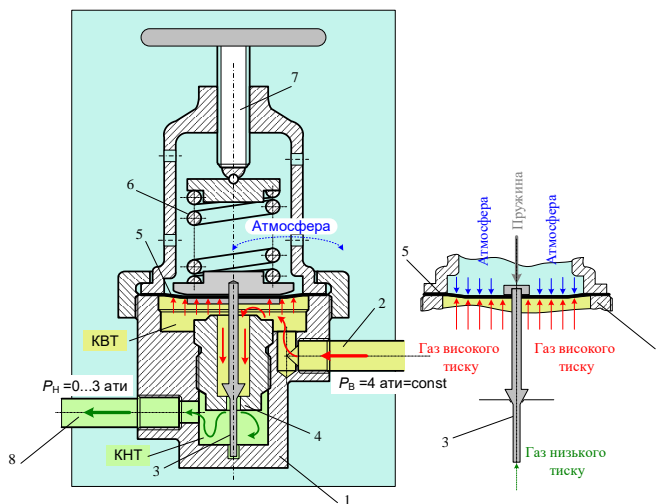


Рисунок 3 – Пристрій редуктора типу «до себе» та сили, що діють на мембрану: КВТ – камера високого тиску; КНТ – камера низького тиску; поз. 1 ... 8 відповідають рис. 1

По суті регулятор, що утримує тиск перед собою, може виконувати функцію запобіжного клапана [3]. Але на відміну від найпростіших пружинних предклапанів, які мають значний «гістерезис» (тобто

різницю між тиском відкриття та закриття), у спеціалізованих регуляторів «до себе» цей показник становить $< 0,05$ МПа. Така точність досягається використанням мембранних вузлів, чутливих до найменших коливань тиску. Площа мембрани у багато разів перевищує перетин клапана і різниця між тисками відкриття та закриття клапана мінімальна. Чутливі регулятори «до себе» особливо потрібні як захисна арматура низького тиску ($P = 0,011...0,15$ МПа).

В установках отримання інертних газів, крім регулюючої та захисної арматури, також застосовуються зворотні клапани. Вони служать, наприклад, для виключення перетікання газу із закачених балонів в компресор і далі (байпасної лінії) в контур низького тиску.

4. Приклади використання регулюючої та захисної пневмоарматури в установках очищення інертних газів

На рис. 4 наведено приклад схеми на базі пневматичних пристроїв. У процесі роботи джерела 1 суміш подається в ресивер низького тиску 2. Контур забезпечує живлення блоку очищення БО безперервним потоком. Оскільки $P_1 < P_{BO}$ для підвищення тиску суміші використовується компресор, який має запас продуктивності і включається у роботу епізодично. Регулятор $R_{ДС}$ призначений для підтримки номінального тиску $P_1 = \text{const}$, заданого технологічним режимом у джерелі газового концентрату 1 (див. рис. 6). Редуктор $R_{ПС1}$ знижує тиск перед компресором, не допускаючи перевантаження при підвищенні тиску всмоктування. У схемі передбачено зворотний клапан Зв1. Він перешкоджає перетіканню газу високого тиску з ресивера 3 в ресивер 2 при зупиненому компресорі. Регулятор $R_{ПС2}$ необхідний для зменшення тиску в ресивері $P_{Зmax}$ та може бути на порядок вище, ніж у блоці очищення. Регулятор витрати F_{BO} узгоджує продуктивність блоку очищення з продуктивністю джерела 1. При $F_1 > F_{BO}$ виникає загроза накопичення суміші в контурі і для запобігання «замиканню» джерела потрібно скидати частину суміші в атмосферу. Якщо $F_1 < F_{BO}$ подача суміші в блок очищення буде перериватись. Епізодичність роботи може негативно впливати на стабільність процесу у БО. $R_{ПС3}$ – превентивний клапан захисту колони, який дозволяє у разі підвищення тиску плавно скинути побічну фракцію у газгольдер, не допускаючи спрацьовування Зп1.

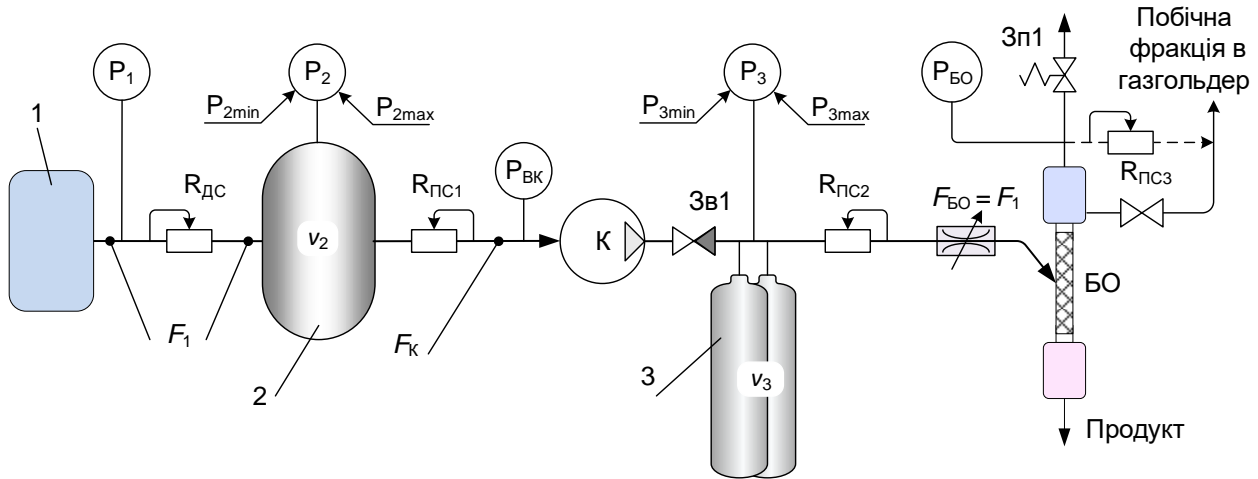


Рисунок 4 – Схема контуру подачі сирової суміші в ректифікаційну колону блоку очищення (БО) при розміщенні БО в безпосередній близькості від джерела суміші: 1 – джерело газового концентрату; 2 – ресивер низького тиску; 3 – ресивер високого тиску; 4 – група балонів; 3в1 – зворотний клапан; Зп1 – запобіжний клапан; К – компресор; R_{дс} та R_{пс} – регулятори тиску «до себе» та «після себе», відповідно.

Таблиця 1 – Позначення робочих параметрів та їх значення для прикладу розрахунку (до рис. 4).

Найменування параметру		Позначення	Значення для прикладу
Тиск видачі суміші із джерела 1		P_1	0,6 МПа
Тиск всмоктування компресора		$P_{ВК}$	0,12 МПа
Продуктивність компресора		$F_к$	10 нм ³ /год
Тиск у ресивері 2 низького тиску	min	$P_{2min} \approx P_{ВК}$	0,12 МПа
	max	$P_{2max} \approx P_1$	0,6 МПа
Гідравлічний об'єм ресивера 2		v_2	5 м ³
Тиск на вході в блок очищення БО		$P_{Б0}$	1,2 МПа
Запас тиску в ресивері 3 для забезпечення безперебійного живлення		ΔP	0,8 МПа
Тиск у ресивері 3 високого тиску	min	$P_{3min} = P_{Б0} + \Delta P$	2,0 МПа
	max	$P_{3max} = P_{НК}$	15 МПа
Тиск у групі балонів 4	залишковий	$P_{04} \approx P_{ВК}$	0,12 МПа
	min*	P_{4*min}	2,0 МПа
	max	P_{4max}	15 МПа
Гідравлічний об'єм групи балонів 4		v_4	0,2 м ³
Продуктивність джерела		F_1	2,5 нм ³ /год
Витрата перед блоком очищення		$F_{Б0} = F_1$	2,5 нм ³ /год
Об'ємна частка ксенону в суміші (Xe-Kr)		y_{Xe}	0,1

Примітка. Тиск $P_{4*min} = 2,0$ МПа відповідає тиску в балонах 4 в кінці безкомпресорного відбору суміші. Після цього під час роботи компресора К балони 4 спустошуються до рівня $P_{04} = 0,12$ МПа, що відповідає тиску всмоктування компресора.

Таблиця 2 – Параметри, що враховують реальність компонентів для суміші Xe-Kr при концентрації $y_{Xe} = 10\%$ та температурі $T = 293$ К (до рис. 4).

Тиск суміші, МПа	КСЕНОН		КРИПТОН	
	Парціальні тиски (МПа) при $y_{Xe} = 10\%$	Коефіцієнт стисливості, Z_{Xe}	Парціальні тиски (МПа) при $y_{Kr} = 90\%$	Коефіцієнт стисливості, Z_{Kr}
$P_{2min} = 0,12$	$P^{Xe2min} = 0,012$	0,9994	$P^{Kr2min} = 0,108$	0,9980
$P_{2max} = 0,6$	$P^{Xe2max} = 0,06$	0,9969	$P^{Kr2max} = 0,54$	0,9890
$P_{3min} = 2,0$	$P^{Xe3min} = 0,2$	0,9937	$P^{Kr3min} = 1,8$	0,9631
$P_{3max} = 15$	$P^{Xe3max} = 1,5$	0,9169	$P^{Kr3max} = 13,5$	0,754

У початковий момент після завантаження обсягу v_2 компресором К тиск в ресивері 2 складає $P_{2\min} = P_{BK} = 0,12$ МПа. За рахунок надходження суміші із джерела 1 тиск поступово підвищується до $P_{2\max} = P_1 = 0,6$ МПа. У цей момент необхідно запустити компресор К, щоб уникнути «замикання» джерела 1 і вимушеного скидання суміші в атмосферу. Період спорожнення ресивера компресором 2 визначається за формулою

$$\Delta\tau_{2K} = \frac{V_{2\max} - V_{2\min}}{F_K - F_1}, \quad (1)$$

де $V_{2\max}$ і $V_{2\min}$ – обсяги суміші в ресивері 2 на початку та в кінці завантаження, нм^3 ; $(F_K - F_1)$ – фактична швидкість відбору газу з ресивера 2, $\text{нм}^3/\text{год}$ (з урахуванням F_1 – надходження суміші із джерела).

Об'єм суміші в ресивері 2, наведений до нормальних умов ($T_{HV} = 293$ К та $P_{HV} = 0,1013$ МПа), визначається співвідношенням

$$V_{2HV} = \frac{v_2 \cdot \rho_2}{\rho_{HV}^\Sigma}, \quad (2)$$

де ρ_2 – густина суміші при довільному тиску P_2 , $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_{HV}^Σ – нормальна густина суміші при P_{HV} , $\text{кг}/\text{м}^3$

У свою чергу, густина суміші за нормальних умов визначається концентрацією та нормальними густинами компонентів.

$$\begin{aligned} \rho_{HV}^\Sigma &= y^{Xe} \cdot \rho_{HV}^{Xe} + y^{Kr} \cdot \rho_{HV}^{Kr} = \\ &= y^{Xe} \cdot \rho_{HV}^{Xe} + (1 - y^{Xe}) \cdot \rho_{HV}^{Kr} \end{aligned} \quad (3)$$

де $\rho_{HV}^{Xe} = 5,49$ $\text{кг}/\text{м}^3$ та $\rho_{HV}^{Kr} = 3,49$ $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для прийнятих умов (табл. 1 та 2) нормальна густина суміші складе

$$\rho_{HV}^\Sigma = 0,1 \cdot 5,49 + 0,9 \cdot 3,49 = 3,69 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Густина газової суміші ρ_2 при довільних параметрах P_2 і T_2 залежить від стисливостей компонентів Z_i , їх атомних мас μ_i , концентрацій y_i та парціальних тисків ($y_i \cdot P_2$), табл. 2,

$$\rho_2 = 10^6 \cdot \frac{P_2}{R_0 \cdot T_2} \cdot \left(\frac{\mu_{Xe} \cdot y_{Xe}}{Z_{Xe}} + \frac{\mu_{Kr} \cdot y_{Kr}}{Z_{Kr}} \right), \quad (4)$$

де $\mu_{Xe} = 131,3$ $\text{кг}/\text{кмоль}$ та $\mu_{Kr} = 83,8$ $\text{кг}/\text{кмоль}$ – атом-

ні маси компонентів; Z_{Xe} та Z_{Kr} – коефіцієнти стисливості при парціальних тисках (табл. 2); $R_0 = 8314$ $\text{Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – універсальна газова постійна; T_2 – температура газу в обсязі.

Густина суміші в ресивері 2 за $P_{2\max} = 0,6$ МПа визначається за формулою (4)

$$\begin{aligned} \rho_{2\max} &= V_{HV}^\Sigma = \frac{10^6 \cdot 0,6}{8314 \cdot 298} \cdot \left(\frac{131,3 \cdot 0,1}{0,9969} + \frac{83,8 \cdot 0,9}{0,9889} \right) = \\ &= 21,6 \text{ кг}/\text{м}^3. \end{aligned}$$

Густина суміші в ресивері 2 після завантаження до $P_{2\min} = 0,12$ МПа

$$\begin{aligned} \rho_{2\min} &= \frac{10^6 \cdot 0,12}{8314 \cdot 298} \cdot \left(\frac{131,3 \cdot 0,012}{0,9994} + \frac{83,8 \cdot 0,108}{0,9978} \right) = \\ &= 4,30 \text{ кг}/\text{м}^3. \end{aligned}$$

Згідно (1) час скачування компресором ресивера 2 складе

$$\Delta\tau_{2K} = \frac{V_{2\max} - V_{2\min}}{F_K - F_1} = \frac{v_2}{\rho_{HV}^\Sigma} \cdot \frac{\rho_{2\max} - \rho_{2\min}}{F_K - F_1} \quad (5)$$

З урахуванням обчислених значень ρ_2 тривалість роботи компресора К

$$\Delta\tau_{2K} = \frac{5}{3,69} \cdot \frac{21,6 - 4,30}{10 - 2,5} = 3,13 \text{ год},$$

а безкомпресорний період наповнення ресивера 2 із витратою $F_1 = 2,5$ $\text{нм}^3/\text{год}$ дорівнює

$$\Delta\tau_{1-2} = \frac{5}{3,69} \cdot \frac{21,6 - 4,30}{7,5} = 9,38 \text{ год}.$$

За час роботи компресора буде перекачано всього $(F_K \cdot \Delta\tau_{2K}) = 10 \cdot 3,13 = 31,3$ м^3 суміші. Частина цього потоку з витратою $F_{BO} = F_1 = 2,5$ $\text{нм}^3/\text{год}$ надійде до блоку очищення (БО, рис. 4), а залишок – в ресивер високого тиску 3 з витратою $(F_K - F_{BO}) = 10 - 2,5 = 7,5$ $\text{нм}^3/\text{год}$. Вміст ресивера 3 буде використано для живлення БО в період зупинки компресора $\Delta\tau_{1-2}$.

За час роботи компресора до блоку очищення подано

$$\Delta V_{BO} = F_1 \cdot \Delta\tau_{2K} = 2,5 \cdot 3,13 = 7,82 \text{ нм}^3,$$

а в ресивер високого тиску 3 закачано

$$\Delta V_3 = (F_K - F_1) \cdot \Delta \tau_{2K} = (V_{2max} - V_{2min}) = 7,5 \cdot 3,13 = 23,5 \text{ м}^3.$$

Визначимо необхідний гідравлічний об'єм v_3 ресивера високого тиску з огляду на обмеження $P_{3max} < 15$ МПа. При цьому тиску відповідно до формули (4) та таблиці 3 густина суміші

$$\rho_{3max} = \frac{10^6 \cdot 15}{8314 \cdot 298} \cdot \left(\frac{131,3 \cdot 0,1}{0,9169} + \frac{83,8 \cdot 0,9}{0,7540} \right) = 692,3 \text{ кг/м}^3.$$

Аналогічно густина в кінці відбору суміші з ресивера 3 при $P_{3min} = 2,0$ МПа дорівнює

$$\rho_{3min} = \frac{10^6 \cdot 2,0}{8314 \cdot 298} \cdot \left(\frac{131,3 \cdot 0,1}{0,9937} + \frac{83,8 \cdot 0,9}{0,9631} \right) = 73,9 \text{ кг/м}^3.$$

Різниця між кінцевою і початковою кількістю

газу $[V_{3max} - V_{3min}]$ відповідає обчисленій раніше надбавці суміші, що надійшла в ресивер 3 при роботі компресора ΔV_3 . Відповідно до (2)

$$V_{3max} - V_{3min} = \frac{v_3}{\rho_{HV\Sigma}} \cdot (\rho_{3max} - \rho_{3min}) = \Delta V_3. \quad (6)$$

Звідки шуканий гідравлічний об'єм ресивера високого тиску складе

$$v_3 = \frac{\rho_{HV\Sigma} \cdot \Delta V_3}{\rho_{3max} - \rho_{3min}} = \frac{3,69 \cdot 23,5}{692,3 - 73,9} = 0,140 \text{ м}^3.$$

При такому і більш ємному ресивері 3 високого тиску буде забезпечено безперервне живлення блоку очищення БО протягом $\Delta t_{1-2} = 9,4$ год, поки при зупиненому компресорі К наповнюється ресивер 2 низького тиску. У якості ресивера 3 можна використовувати три паралельно включених стандартних балона з гідравлічним об'ємом кожного 50 літрів.

На рисунку 5 показано циклограму зміни тиску в контурі подачі суміші.



Рисунок 5 – Циклічна зміна тисків у ресиверах згідно з рис. 4

5. Використання пневморегуляторів в установках одержання газових концентратів

У процесі низькотемпературної ректифікації повітря неон і гелій не зріджуються, а накопичуються в колонах повітродозільних установок (ПРУ).

Підвищення концентрації неону і гелію вище за кілька відсотків негативно позначається на передачі тепла між колонами ПРУ. Тому, незалежно від подальшого використання Ne і He, їх виводять із блоку у вигляді 1%...2%-суміші (інше – азот). Для зниження витрат на перевезення концентрату

його збагачують у дефлегматорах шляхом конденсації азоту [4]. При живленні дефлегматора від кількох різнотипних установок [5] виникає необхідність узгодження тисків потоків Ne-He-сумішей та робочих тисків дефлегматора. Безпосередня подача потоків до загального колектора неприпустима, оскільки це може призвести до перетікання суміші в блок з мінімальним тиском. Це порушить

його нормальну роботу через падіння парціального тиску азоту у конденсаторі ПРУ. Для виключення названого явища пропонується здійснити відбір суміші із блоків через регулятори тиску $R_{дс1} \dots R_{дс3}$ типу «до себе» та зворотні клапани $Зв1 \dots Зв3$ (рис. 6). Підвищений тиск у дефлегматорі, необхідний для ефективного фазоподілу, підтримується додатковим регулятором $R_{дс4}$.

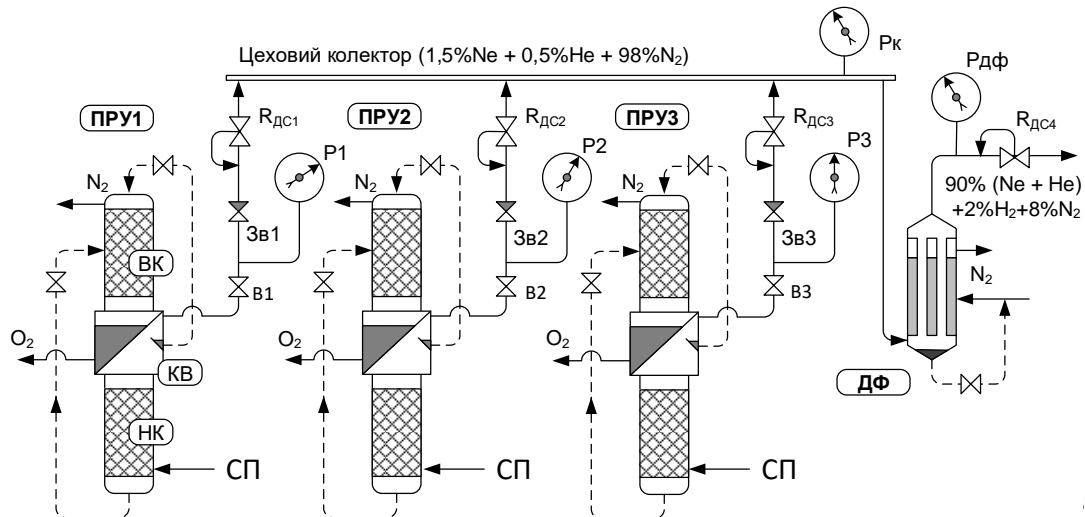


Рисунок 6 – схема підключення дефлегматора Ne-He-суміші до ПРУ за різних робочих тисків у нижніх колонах (НК): ПРУ №1 ... ПРУ №3 – повітродільні установки; НК та ВК – нижня та верхня колони; КВ – конденсатори-випарники; СП – стиснене повітря (блоки ПРУ); В1 ... В3 – регулятори витрати суміші; $R_{дс1} \dots R_{дс4}$ – регулятори тиску «до себе»; Зв1 ... Зв3 – зворотні клапани; P1 ... P3, Pдф – манометри; ДФ – дефлегматор;

Приймаємо $P1 > P2 > P3$. Як впливає з рис. 6 тиск P_k у колекторі Ne-He-суміші задається меншим, ніж у нижній колоні ПРУ3. Налаштування виконується регулятором $R_{дс4}$ з урахуванням гідравлічного опору теплообмінників дефлегматора ДФ (на схемі не показано). Регулятори $R_{дс1}$, $R_{дс2}$ та $R_{дс3}$ встановлюються на робочі тиски відповідних блоків. Витрати суміші, що відбирається з кожного блоку, регулюються В1 ... В3 з урахуванням концентрації потоків.

6. Висновки

Поряд із сучасними комп'ютерними системами управління у виробництві інертних газів використовуються елементи регулюючої арматури, що не потребують електроживлення.

Застосування пневморегуляторів спрощує технологічні схеми та підвищує надійність роботи систем при пошкодженні електричних мереж.

На базі регуляторів тиску розроблено системи безперервного забезпечення блоків очищення при різних варіантах доставки сирової суміші від джерел.

Безперебійна подача концентратів у блок очищення сприяє стабільній роботі ректифікаційної колони і гарантує отримання продуктів високої чистоти.

При збагаченні в дефлегматорах сирової Ne-He-суміші, одержуваної у ПРУ з різними робочими тисками необхідно вжити заходів, що запобігають замиканню блоків зі зниженим тиском. Ця задача може бути вирішена з використанням комплексу пневморегуляторів та зворотних клапанів.

Особистий внесок авторів CRediT

Симоненко Ю.М.: концептуалізація, методологія, еволюція загальних цілей та завдань, адміністрування. **Медушевський Є.В.:** дослідження, формальний аналіз, візуалізація. **Костенко Є.В.:** верифікація, візуалізація, програмне забезпечення.

Література

1. Романенко Н.Т., Куліков Ю.Ф. Кріогенна арматура. – М.: Машинобудування, 1998. – 110 с.

2. **Філін Н.В., Буланов А.Б.** Рідинні криогенні системи. – Л.: Машинобудування, 1985. – 247 с.
3. **Бондаренко В.Л., Симоненко Ю.М.** Криогенні технології видобування рідкісних газів. – Одеса: «Астропринт», 2013. – 332 с.
4. **Бондаренко В.Л., Вігуржинська С.Ю.** Оптимізація системи попереднього очищення неонгелієвої суміші // Холодильна техніка та технологія. – 1999. – Вип. 63. – С. 86-91.
5. **Бондаренко В.Л., Лушик А.А., Андрєєв А.Г., Дяченко Т.В.** Конденсаційні системи збагачення Ne-He-суміші та досвід їх використання на Нижньотагільському металургійному комбінаті // Технічні газети. – 2009. – № 6. – С. 66-70.

Отримана в редакції 17.08.2023, прийнята до друку 18.09.2023

Pneumatic regulators in units for inert gases obtaining

Iurii Symonenko^{1✉}, *Evgeny Medushevsky*², *Evgeny Kostenko*³

¹CryoIn Engineering Ltd., sq. Mytna, 1-a, Odesa, 65026, Ukraine;

^{2,3}Odesa National University of Technology, 1/3 Dvoryanska Str., Odesa, 65082, Ukraine;

✉ e-mail: ¹ysimonenko@cryoin.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-7827-0591>; ²<http://orcid.org/0000-0001-6750-8763>;

³<https://orcid.org/0000-0002-8164-6203>

The article shows the areas of use of pneumatic protective and regulating devices in the enrichment of gas concentrates. Examples of technological schemes based on the application of pneumatic regulators are given. Reducers of the "reducing" type serve to reduce the pressure of gas supplied from high-pressure receivers, a group of cylinders and receivers. The inclusion of such regulators allows you to reduce the inlet pressure to a level corresponding to the characteristics of the compressors or the technological modes of the units. Back pressure reducers serve to stabilize the pressure in the devices-sources of gas concentrates. When selecting a Ne-He mixture from a number of different types of air separation units into the phase separator (dephlegmator), such regulators are able to ensure the coordinated operation of several units and eliminate the overflow of the mixture and violation of air separation. Back pressure reducers can perform the functions of preventive protective valves along with typical safety valves. Unlike the latter, back pressure reducers have greater sensitivity and are able to reduce the pressure in the installation smoothly, without disrupting the technological process. In this case, the regulators are adjusted to 0.2...0.3 MPa below the pressure of the main safety valve. Examples of circuits based on the use of pneumatic regulators in inert gas enrichment systems are given. The case of sampling the mixture directly from the source and feeding it uniformly into the column with increased (relative to the source) pressure is considered. This option involves matching the compressor flow rate with the column performance through the use of periodic compression and receivers. Calculation models allow predicting the change in pressure during the cycle. Depending on the performance of the unit, the minimum volume of the receiver is calculated, which ensures the continuity of the mixture supply to the column. The proposed schematic solutions allow for stable operation of units for the enrichment of inert gas concentrates.

Keywords: Neon-helium mixture; Phase separator; Dephlegmator; Reducer; Pressure regulator; Compressor; Receiver; Rectification column; Air separation unit.

References

1. **Romanenko, N.T., Kulikov, Y.F.** (1998) Cryogenic fittings. *M.: Mashinobuduvaniya, 110.*
2. **Filin, N.V., Bulanov, A.B.** (1985) Liquid cryogenic systems. *L.: Mashinobuduvaniya, 247.*
3. **Bondarenko, V.L., Symonenko, Yu.M.** (2013) Cryogenic technologies of rare gases extraction. – *Odesa: "Astroprint", 332.*
4. **Bondarenko, V.L., Vigurzhynska, S.Yu.** (1999) Optimization of the pre-cleaning system of the neon-helium mixture. *Refrigeration engineering and technology, 63, 86-91.*
5. **Bondarenko, V.L., Lushchyk, A.A., Andreev, A.G., Dyachenko, T.V.** (2009) Condensation systems for the enrichment of Ne-He mixtures and the experience of their use at the Nizhny Tagil metallurgical plant. *Industrial gases, 6, 66-70.*

Received 17 August 2023

Approved 18 September 2023

Available in Internet 30 September 2023