

Аміачні холодильні системи

Про проблеми газів, що не конденсуються

Наявність «повітря», точніше, газів, що не конденсуються, при робочих режимах в аміачній холодильній системі вагомо впливає на перевитрату електроенергії при виробленні штучного холоду (див. «Холод», № 2, 3, 2004 р.). Крім енергетичних втрат, газів, що не конденсуються, визначають іще ряд проблем, пов'язаних із великими втратами холодильного агента при їх випуску із систем

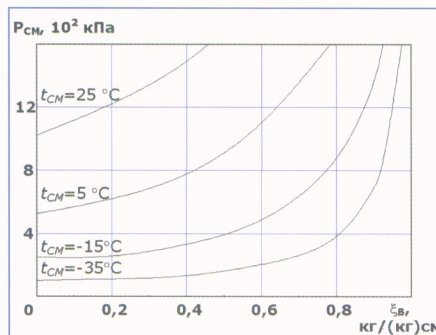


Рис. 1. Залежність тиску суміші «аміак-повітря» від масової концентрації повітря у суміші та її температури

- якщо газів, що не конденсуються, не відводити, то повний тиск конденсації, який дорівнює сумі парціальних тисків усіх газів, буде зростати. Це означає зменшення продуктивності компресора, підвищення споживання потужності, збільшення терміну роботи холодильної системи та зниження загальної її холодопродуктивності.

Таким чином, перевитрата енергії при виробленні холоду може бути обумовлена різким зниженням інтенсивності теплообміну при конденсації холодильного агента, що містить «неконденсати», а як наслідок – істотним підвищенням тиску конденсації (рис. 1–3). За даними І. В. Мазюкевича, при $q = 4000$ ккал/(м²·год) наявність 2,5% «повітря» в аміаку зменшує коефіцієнт тепловіддачі при конденсації порівняно з чистим холодильним агентом приблизно в чотири рази, а 15% – у 9 разів. У такому випадку для підтримки розрахункового тиску необхідна додаткова поверхня теплообміну конденсаторів, а в разі її відсутності неминуче порушення режиму роботи аміачної холодильної установки (АХУ) з енергетичними втратами.

З рис. 2 видно, що при $q = \text{const}$ інтенсивність теплообміну через «неконденсати» зменшується, причому в області менших теплових потоків (q) вплив домішок прояв-

ляється більше. Іншим важливим моментом є те, що особливо різке зниження ефективності теплообміну при конденсації аміаку спостерігається вже за наявності невеликої кількості (до 2%) «неконденсатів» ($\xi_{вг}$), а з її подальшим зростанням зниження коефіцієнта тепловіддачі (α) відбувається менш інтенсивно.

Важливість проблеми, що розглядається, підтверджується результатами обстежень існуючих промислових аміачних холодильних систем. Нерідкі випадки, коли температура конденсації через «заповітрявання» холодильних систем вища від розрахункової на 10 і навіть 15 °С, а розрахункова перевитрата електроенергії досягає 35÷50% від обсягу її нормованого споживання. Цікавий приклад зниження ефективності холодильних систем наведений у проспекті фірми Grasso: «В аміачній установці тиск нагнітання складає 12,64 атм (кг/см²), що відповідає температурі 32 °С, виміряна температура сконденсованого холодоагенту – 24 °С, що відповідає тиску конденсації 9,89 атм. Таким чином, парціальний тиск газів, що не конденсуються, дорівнює

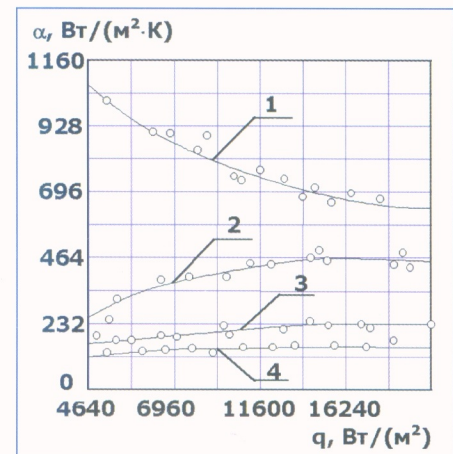


Рис. 2. Залежність $\alpha = f(q)$ для суміші «аміак-повітря»:

1 – чиста пара; 2 – 2,5% повітря; 3 – 17,5% повітря; 4 – 35,3% повітря

Коли в конденсаторі конденсується пара, яка містить газ, що не конденсується, при практично нерухомій суміші, то відбувається таке:

- в міру конденсації шар пари біля стінки збагачується газом, що не конденсується. Ця газова плівка є бар'єром для доступу пари до холодної поверхні конденсації;

- парціальний тиск пари холодоагенту і температура насичення біля поверхні розділу фаз зменшуються, і парогазову суміш необхідно охолоджувати більше, щоб вона залишалася в насиченому стані і щоб відбувалася конденсація;

- об'ємна витрата суміші та коефіцієнт теплопередачі знижуються;

2,75 атм. Для режиму, коли тиск усмоктування 2,96 атм (мінус 10 °С), розрахункова холодопродуктивність знижується на 7,3% при підвищенні споживаної потужності на 17,1%. У результаті загальне підвищення споживаної енергії при 100% розрахункової холодопродуктивності складає 22,6%».

Хоча гази, що не конденсуються, як правило, не повинні бути присутніми у холодильній системі, вони потрапляють до неї через такі причини:

- несправний вакуумний насос і неякісне вакуумування систем при початковому пуску;
- нещільність фланцевих з'єднань, сальників компресорів і насосів при роботі холодильної установки з температурами кипіння аміаку нижче мінус 33 °С;
- ремонти і ревізії обладнання;
- розкладання холодильного агенту чи мастила (наприклад, аміак розкладається на азот і водень);
- заправлення у систему мастила;
- заправлення холодильного агенту (до 1,5% «неконденсатів» в аміаку).

Неможливо визначити заздалегідь, яка кількість газу, що не конденсується, є в системі чи скільки його потрібно видалити. Для визначення його наявності у промисловій холодильній установці рекомендується використовувати просту традиційну методику, що добре зарекомендувала себе на практиці. Необхідно порівняти тиск у конденсаторі, визначений за показанням манометра, з тиском насиченої пари аміаку при фактичній температурі конденсації. Для визначення останньої на лінії виходу рідкого аміаку з конденсатора (не далі 1 м від нього) вварюють гільзу і поміщають у неї термометр. Визначена температура приблизно дорівнюватиме температурі конденсації, якщо конденсатор не підігрітий, тобто якщо забезпечене досить добре зливання з нього рідкого холодильного агенту. Однак на практиці можливе деяке переохолодження аміаку за рахунок підігрівання нижньої частини апаратів чи (у горизонтальних кожухотрубних і випарних конденсаторах) додаткового охолодження крапель сконденсованого аміаку, що стікають з верхніх трубок. Тому при визначенні тиску конденсації рекомендується до виміряної температури додати 2 °С. За температурою рідкого холодоагента на виході з конденсатора визначають значення тиску насиченої пари і порівнюють його з показанням манометра. У разі відсутності газів, що не конденсуються, значення

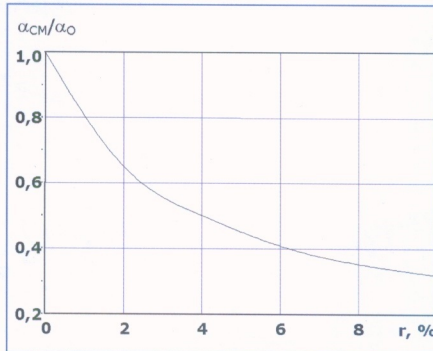


Рис. 3. Відносна зміна коефіцієнта теплопередачі при конденсації аміачно-повітряної суміші

тисків збігатимуться, а в разі їх наявності у системі тиск у конденсаторі, визначений за показанням манометра, буде вищим. Різниця тисків буде тим більшою, чим більше «повітря» в системі АХУ.

Слід мати на увазі, що при малих концентраціях газів, що не конденсуються, збільшення тиску порівняно невисоке і звичайно залишається непоміченим обслуговуючим персоналом. Наприклад, при температурі суміші 25 °С збільшення масової концентрації «повітря» з 1 до 7,8% призводить до зростання тиску суміші на ~0,06 МПа (0,61 кгс/см²). Однак таке збільшення концентрації «повітря» помітно знижує інтенсивність конденсації холодильного агенту.

«Повітря», що потрапляє у систему АХУ, незалежно від місця проникнення накопичується як у конденсаторі, так і в лінійному ресивері, який утворює гідравлічний затвор для газів і запобігає їх прориву до регулювальної станції. Місця (точки) відбору аміачно-повітряної суміші для видалення «повітря» необхідно вибирати залежно від конструкції конденсаторних апаратів, а також з урахуванням схемного рішення обв'язки конденсаторів і лінійних ресиверів, що дуже важливо. Вибір точок відбору залежить головним чином від двох параметрів:

- **Шлях потоку.** Концентрація газів, що не конденсуються, максимальна біля найхолоднішої частини теплообмінної поверхні конденсатора, як правило, на останньому етапі конденсації. Гази рухаються до виходу з конденсатора разом із холодильним агентом. Там відбувається, принаймні частково, відокремлення конденсату і суміші пари, яка залишилася, з газами, що не конденсуються. Якщо відокремлення відбулося, гази, що не конденсуються, можна видалити із системи через спеціально обладнані відбірники, якщо ні, цим доведеться зайнятися на наступних етапах руху холодильного агенту.
- **Різниця густини.** Якщо газ, що не конденсується, легший від пари холодильного

агенту, він повинен підніматися над парю і випускатися з верхньої точки посудини. Якщо важчий, точка випуску газу повинна знаходитися якомога нижче. Існують лише три гази – водень, гелій і метан, густина яких менша, ніж аміаку. Але їх присутність у системі холодильної установки малоймовірна. Якщо аміак контактує з повітрям, то утворена суміш у результаті поступового перемішування піднімається вгору, і вона легша, ніж чисте повітря.

Усе зазначене і породжує різні думки фахівців щодо визначення точок відбору аміачно-повітряної суміші для випуску газів, що не конденсуються, та відсутності точних рекомендацій з проектування систем конденсації. Наприклад, із горизонтальних кожухотрубних конденсаторів із поверхнею охолодження до 110 м² (КТГ 25-110) суміш традиційно рекомендується відбирати з існуючого для цих цілей штуцера на верхній твірній конденсатора, а з поверхнею охолодження 140÷300 м² – із штатного штуцера та патрубка, приєднаного до верхнього штуцера оглядового скла; із вертикальних конденсаторів типу KB – із штуцера для встановлення манометрів; із зрешувальних конденсаторів – тільки через штатний вентиль у верхній частині конденсатора. Для установок з випарними конденсаторами рекомендованим і найбільш ефективним вважається відбір аміачно-повітряної суміші з лінійного ресивера, при цьому необхідно забезпечити добре зливання рідкого аміаку з нижнього колектора апарата в лінійний ресивер. Ці рекомендації часто не узгоджуються з нагромадженим практичним досвідом багатьох фахівців і з описаними вище параметрами визначення точок відбору. Наприклад, у тому випадку, коли кілька конденсаторів «обв'язані» за загальноприйнятими і широко застосовуваними рекомендаціями з гідрозатвором або в системі використаний лінійний ресивер зі зливанням рідкого аміаку під шар рідини (на сучасному жаргоні – ресивер буферного типу), гази, що не конденсуються, не проходять у лінійний ресивер, установлення повітровіддільника на ньому не має сенсу, а відбір суміші необхідно виконувати з нижнього зливного патрубка конденсаторів.

У пластинчастих конденсаторах, наприклад, фірми *Alfa Laval*, що все частіше вико-



Рис. 4. Автоматичний повітровіддільник «Перджер» фірми Grasso

ристовуються у сучасних аміачних системах і «чилерах», проблема визначення точок відбору аміачно-повітряної суміші ускладнюється ще й вертикальною конфігурацією каналів із верхнім входом і нижнім виходом. У такому випадку найбільше значення також має шлях потоку і густина газів. Парогазова суміш проходить по каналах і виходить з апаратів низу. Перепад тисків не дає суміші, густина якої зменшується в міру конденсації, піднятися в конденсаторі. У випадку зупинки холодильної системи з пластинчастими конденсаторами більш легка суміш може піднятися вгору, але, оскільки гофрований канал є гарним змішувальним пристроєм, то в результаті, ймовірно, утворюється досить однорідна аміачно-повітряна суміш. Навіть якщо біля вхідного отвору утвориться «пузир» газу, що не конденсується, останній проштовхнеться парю аміаку, коли вона знову надійде у конденсатор. Отже, для пластин-

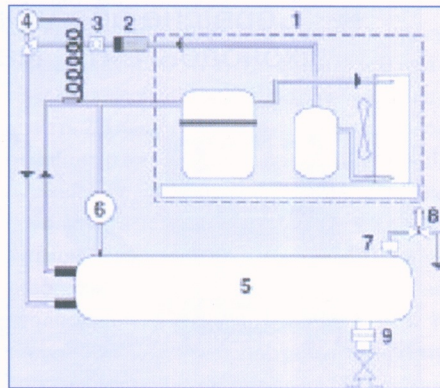


Рис. 5. Принципова конструкція віддільника «Перджер»:

1 – блок конденсації; 2 – фільтр; 3 – оглядове скло; 4 – терморозширювальний вентиль; 5 – теплообмінник; 6 – регулятор високого та низького тиску; 7 – калібрований опір; 8 – соленоїдний клапан випуску відокремлених газів; 9 – з'єднувальні трубопроводи

частих конденсаторів газовипускний отвір необхідно розміщати біля нижнього вихідного патрубка.

Деякі проектувальники взагалі чинять «правильно», закладаючи в проєктах відбір аміачно-повітряної суміші в усіх можливих точках накопичення «неконденсатів», перекладаючи право вибору правильності рішення на експлуатаційника холодильної установки.

Очевидно, що правильно організовані пуск АХУ і застосування надійних систем відокремлення «повітря» при експлуатації дозволяють не допустити перевитрати електроенергії та втрати холодильного агента. Принцип роботи повітровіддільників ґрунтується на тому, що пара холодильного агента охолоджується до температури, що відповідає тиску насичення пари, коли вона конденсується, у той час як гази, що не конденсуються, можуть охолоджуватися до значно нижчих температур. На підставі значень тисків і температур у повітровіддільнику можна визначити наявність газів, що не конденсуються, і вести їх із системи. Природно, що повітровіддільник повинен бути підключений до системи з найнижчою температурою кипіння холодильного агента. Підтвердженням цього є дані з технічної документації віддільників газів, що не конденсуються, фірми *York Refrigeration*: «АХУ має тиск конденсації 13 бар (приблизно 36 °С). За таких умов «неконденсатів» у системі практично немає. Якщо температура конденсації складає 32 °С, а тиск, як і раніше, 13 бар, то в системі на кожні 11 літрів аміаку знаходиться 1 літр повітря, й у випадку його прямого випуску із системи втрати становитимуть на кожен літр повітря 11 літрів пари аміаку. Якщо замість прямого випуску встановлений повітровіддільник з охолодженням газової суміші до мінус 7 °С, то на кожний літр повітря припадатиме 0,3 літра пари холодильного агента, а до температури мінус 25 °С – 0,15 літра пари аміаку».

Відомі фахівцям різні типи автоматичних повітровіддільників АВ-2 і АВ-4 так і не знайшли широкого застосування через свою недосконалість і низьку надійність. Інші конструкції, звичайно теплообмінники типу труба в трубі (повітровіддільник ВТ-1), фактично використовуються тільки для контролюючих організацій і формального виконання вимог діючих НТД. Випуск повітря з їхньою допомогою – трудомісткий і трива-

лий процес, їхня продуктивність найчастіше недостатня для ефективного обслуговування промислових установок. Тому при експлуатації АХУ, як і раніше, застосовується прямий випуск аміачно-повітряної суміші в посудину з водою.

Кращі повітровіддільники можуть підтримувати концентрацію газів, що не конденсуються, у системах ХУ до надзвичайно малих значень в автоматичному режимі. Прикладом може служити автоматичний віддільник газів, що не конденсуються, «Перджер» (рис. 4) фірми *Grasso*, який добре зарекомендував себе на багатьох підприємствах України. Принципова відмінність цього апарата від інших полягає в тому, що один з елементів його конструкції є незалежним холодильним блоком, завдяки якому температура кипіння холодильної установки не впливає на якість відокремлення газів, що не конденсуються (рис. 5). Більше того, апарат працює незалежно від обслуговуючого персоналу і навіть при зупинці холодильної системи. Конденсація холодильного агента відбувається при дуже низьких температурах, що підтримуються холодною машиною, яка працює на R404A. За рахунок цього забезпечується низька концентрація аміаку в викидному газі. Апарат «Перджер» починає роботу при концентрації газів, що не конденсуються, більше 2% і припиняє, коли забезпечує її зниження до 1%. Або ж він підключається в роботу автоматично кожні 24 години на визначений термін. «Перджер» фірми *Grasso* розрахований на обслуговування холодильних систем холодопродуктивністю до 6000 кВт. Однак не всі вітчизняні холодильні установки можуть зрівнятися за технічною досконалістю з холодильними системами Голландії. Підтвердженням є зафіксований випадок безперервної роботи віддільника газів протягом декількох діб у складі холодної системи фабрики морозива холодопродуктивністю 2500–3000 кВт. Важлива перевага цього апарата – рекомендоване найпростіше і швидке його включення у схему холодної установки за допомогою одного приєднання до лінійного ресивера чи поплавкового регулятора на лінії високого тиску. Але непередумане його встановлення відповідно до рекомендацій іноді є й значною перешкодою в ефективності його використання. Це обумовлюється складністю схемних рішень конденсатор-

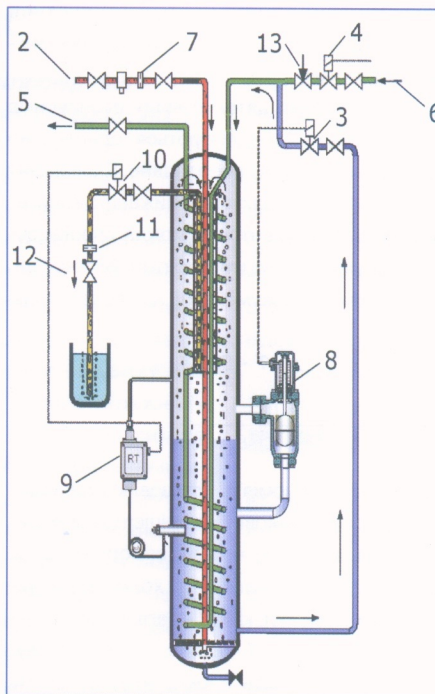


Рис. 6. Автоматичний повітровіддільник GP-2 фірми *York Refrigeration*

них відділень і визначення точок відбору суміші аміаку та газів, що не конденсуються. Відмітними характеристиками застосування повітровіддільника «Перджер» є також зниження втрат холодильного агента до 5% порівняно з можливими при ро-

боті АХУ з неавтоматизованими газозвіддільниками. А наявність лічильника робочого часу, що входить до комплексу поставки, дозволяє реєструвати ефективний час газозвіддільника.

Принципово інший та більш класичний підхід до конструювання віддільників газів, що не конденсуються, у *York Refrigeration*. Наприклад, віддільник GP2 є повноцінною частиною холодної системи, повністю автоматизований і забезпечує практично порівнянні з апаратом «Перджер» технічні характеристики процесів відокремлення неконденсатів (рис. 6). Апарат являє собою посудину, що містить охолоджувальний змійовик, у який під тиском подається рідкий аміак (6) через ручний регулювальний вентиль (13). Підключення лінії всмоктування (5) рекомендується до системи з найнижчою температурою кипіння. На лінії подачі встановлено соленоїдний клапан (4), що керується системою управління установки і при зупинці компресора закривається. Суміш газів подається з точок її відбору через діафрагму (7), яка розміщена на входному трубопроводі (2), до основи розподільної камери. Холодильний агент конденсується на трубчастому теплообміннику, після чого рівень рідкого аміаку в посудині підвищується і пара додатково

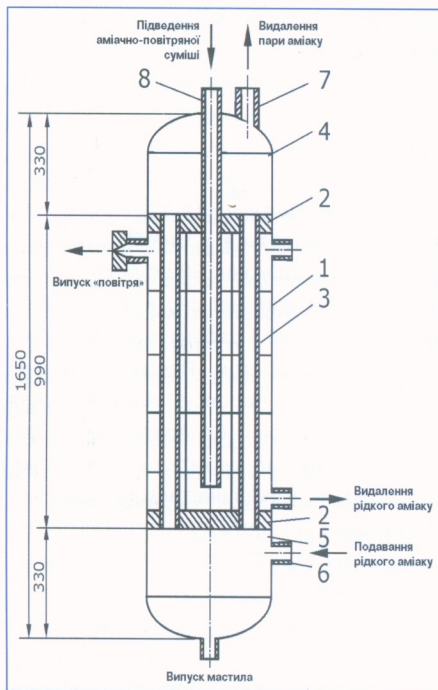


Рис. 7. Схематичний розріз повітро-віддільника (ВНДКТ) холодопрому, м. Москва:
1 – обичайка (труба $\varnothing 157 \times 3,5$ мм); 2 – трубна решітка;
3 – трубки (19 труб $\varnothing 19 \times 2$ мм, довжиною 1050 мм);
4 – ресиверна ємність, що виконує роль сухопарника;
5 – ресиверна ємність, у яку подається рідкий аміак;
6 – патрубок на ресиверній ємності 5; 7 – патрубок, яким відсмоктується пара аміаку; 8 – патрубок, яким підводить-ся аміачно-повітряна суміш у міжтрубний простір

конденсується у шарі рідини. Рідина приймає температуру, приблизно рівну температурі випаровування у змійовику. Якщо рідина піднімається до рівня регулятора (8), відкривається соленоїдний клапан (3), водночас клапан (4) закривається. Оскільки повітровіддільник буде заповнений повітрям, температура знижуватиметься, а тиск збільшуватиметься. Процес повітровідділення керується пристроєм сигналізації, захисту і регулювання рівня рідини (9). Коли різниця між температурою (тиском) рідини і тиском газу перевищує приблизно 1 бар, регулятор дає сигнал відкрити соленоїдний клапан (10) випуску «повітря». Установлена діафрагма (11) гарантує відсутність стрибків тиску, а зворотний клапан (12) – що вода не потрапить у повітровіддільник. Викид газів припиняється, коли різниця тисків зменшується до 0,5 бар. Повітровіддільник рекомендується ізолювати. Повертаючись до обговорення правильності вибору точок відбору повітряно-аміачної суміші для видалення «неконденсатів», необхідно звернути увагу на конструктивні особливості розглянутого віддільника GP2. Для АХУ, що працюють з тиском всмоктування в області

вакууму, виробником рекомендується один апарат GP2 холодопродуктивністю 1200 кВт.

Використання автоматичних віддільників для газів, що не конденсуються, однозначно економічно вигідне і виправдане. Економічність ефективність за рахунок зниження енергетичних витрат орієнтовно можна спрогнозувати за рекомендаціями фірми Grasso, що представлені в документації на апарат «Перджер»:

$$S = f_a \cdot Q_0 \cdot \tau \cdot T \cdot E_c \cdot X,$$

$$TO = \frac{I}{f_a \cdot Q_0 \cdot \tau \cdot E_c \cdot X},$$

де, S – економія в грошових одиницях, грн; f_a – розрахунковий коефіцієнт (нормальне охолодження: $f_a = 0,25$; заморожування: $f_a = 0,33$); Q_0 – загальна холодопродуктивність установки, кВт; τ – загальний час експлуатації, год/рік; T – кількість років експлуатації; E_c – вартість електроенергії, грн за 1 кВт·год; X – вміст газу, що не конденсується, у конденсаторах до застосування повітровіддільника (усереднено приймається 0,1); I – капіталовкладення (вартість повітровіддільника з урахуванням витрат на установку), грн; TO – термін окупності і початку принесення прибутку, рік.

Крім того, застосування сучасних автоматизованих газівіддільників в схемах АХУ – це не тільки енергетичні переваги. При впровадженні автоматичних віддільників «неконденсатів» необхідно пам'ятати і про ті позитивні результати їх застосування, які складно перекласти на економічні показники:

- холодильна установка досягає і зберігає свою продуктивність на «вищому рівні», а отже, забезпечує надійність холодопостачання технологічного процесу навіть у найспекотніші літні періоди;
- зберігається якість мастила і холодоагенту;
- знижується негативний вплив на навколишнє середовище;
- підвищується надійність холодильної установки в цілому;
- менше спрацьовування та витрати на техобслуговування обладнання за рахунок поліпшення умов його роботи і, відповідно, збільшення тривалості терміну експлуатації установки;
- жорстке обмеження втрат холодоагенту;
- зменшення витрати мастила;
- автоматизована експлуатація й автоматичне відключення, а отже, вирішення

проблем охорони праці і техніки безпеки.

Незважаючи на беззаперечну економічну і технологічну доцільність застосування сучасних автоматичних віддільників газів, що не конденсуються, у схемних рішеннях холодильних систем, багато власників АХУ не знаходять необхідних коштів на їх придбання і намагаються вирішити задачу «повітровідділення», придумуючи свої або використовуючи класичні конструктивні рішення повітровіддільників з відомих навчальних посібників. У будь-якому разі це значно краще, ніж узагалі не приділяти уваги цій проблемі. Та конкурувати з опрацьованими і випробуваними технічними рішеннями відомих виробників такого обладнання все ж досить складно.

Один із варіантів надзвичайно простого віддільника газів, який може бути виготовлений силами працівників підприємства, розроблений у ВНДКТіхолодопрому (м. Москва, 1982 р.) та представлений на рис. 7. Повітровіддільник цієї конструкції може бути підключений як за безнасосною, так і за насосно-циркуляційною системою подачі аміаку. При обв'язці за безнасосною системою рекомендується забезпечити автоматичну підтримку рівня рідкого аміаку приблизно на середині висоти апарата за допомогою приладів автоматики фірми Danfoss, при насосно-циркуляційній подачі рівень не регулюється. При застосуванні представленої конструкції віддільника рекомендується автоматизувати також випуск газів з апарата і перепуск сконденсованого аміаку з міжтрубного простору в трубний, що також легко здійснити за допомогою приладів автоматики Danfoss.

На завершення необхідно відзначити, що розглянута проблема і шляхи її розв'язання більш складні, ніж представлено у цій статті. Але впевнено можна стверджувати, що навіть на такому рівні вирішення проблем газів, що не конденсуються, для АХУ можна зробити помітний внесок у розв'язання енергетичних, технологічних, екологічних і економічних задач при виробленні та споживанні штучного холоду як для існуючих, так і проєктованих об'єктів.

Ю. О. Желіба, к. т. н., доц. ОДАХ

