

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**



**Дьяченко Т.В.**

**ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ  
ЗРІДЖЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

**Навчальний посібник**

**Одеса - 2017**

УДК 621.574.013-932.2:621.574.1:661.91

ББК

*Рекомендовано Вченою радою Одеської національної академії харчових технологій від 07.11.2017 р., протокол №6*

**Дьяченко Т.В.** Транспортування та збереження зрідженого природного газу: навчальний посібник. – Одеса: Освіта України, 2017. – 106 с.

Рецензенти:

Зав. кафедрою ХУтаКП ОНАХТ, д.т.н., проф. Хмельнюка М.Г.;

Головний інженер ПАТ «Одесагаз» Бурдейний О.В.;

Головний спеціаліст відділу стратегічного планування розвитку паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) Департаменту стратегічного розвитку ПЕК та інвестиційної політики Міністерства енергетики та вугільної промисловості України Артюх В.М.

Навчальний посібник знайомить майбутніх фахівців нафтогазової промисловості з питаннями зрідження, транспортування, збереження, регазифікації зрідженого природного газу. А також допомагає студентам підвищити свій рівень знань з охорони праці, пожежної безпеки та охорони навколишнього середовища у галузі, яка використовує зріджений природний газ.

Навчальний посібник призначено для бакалаврів зі спеціальності 185 «Газонафтопроводи та газонафтосховища», а також може бути використано магістрами та аспірантами, які займаються питаннями зрідження природного газу.

©ОНАХТ, 2017

## АНОТАЦІЯ

Поставки зрідженого природного газу (ЗПГ) в різні регіони є альтернативою поставок природного газу (ПГ) через трубопроводи. В даний час ряд розвинених країн Європи, Азії та Америки розглядає ЗПГ як пріоритетну або важливу технологію імпорту природного газу. Основні з них – Франція, Бельгія, Іспанія, Південна Корея і США. Найбільший споживач ЗПГ – це Японія, де практично 100 % потреб газу покривається імпортом ЗПГ.

У навчальному посібнику представлена базова інформація з питань виробництва, транспортування та регазифікації скрапленого природного газу для студентів напряму підготовки 6.050304 «Нафтогазова справа». Розглянуто основи для проектування заводів з виробництва ЗПГ: цикли охолодження; пристрій основних апаратів, що входять до складу установок для виробництва і газифікації ЗПГ, а також ємкостей для зберігання і транспортування ЗПГ наземним і морським транспортом. Велику увагу приділено запатентованим технологіям скраплення ПГ, які використовують провідні виробники ЗПГ. Представлені схеми декількох заводів, побудованих відповідно до запатентованих технологій. Вивчено способи регазифікації природного газу.

У заключному розділі роботи розглянуті питання охорони праці, пожежної безпеки та охорони навколишнього середовища.

# ЗМІСТ

|                                                                                                               | Стор. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ВСТУП                                                                                                         | 5     |
| Розділ 1. ВЛАСТИВОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ                                                                         | 6     |
| Розділ 2. ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ                                                                                 | 8     |
| Розділ 3. ЗРІДЖЕНИЙ ГАЗ – АЛЬТЕРНАТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ПОСТАВОК ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ПРОМИСЛОВО РОЗВИНУТІ РЕГІОНИ СВІТУ | 9     |
| 3.1. Розподіл покладів природного і сланцевого газу                                                           | 9     |
| 3.2. Споживання природного газу                                                                               | 13    |
| 3.3. Зріджений природний газ                                                                                  | 15    |
| <i>Питання для самоконтролю</i>                                                                               | 20    |
| Розділ 4. ВИРОБНИЦТВО ЗРІДЖЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ                                                              | 21    |
| 4.1. Цикли кріогенних установок для зрідження метану                                                          | 21    |
| 4.2. Схеми заводів для отримання ЗПГ                                                                          | 37    |
| 4.3. Регазифікація                                                                                            | 44    |
| <i>Питання для самоконтролю</i>                                                                               | 49    |
| Розділ 5. АПАРАТИ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ЗПГ                                                | 50    |
| 5.1. Теплова ізоляція                                                                                         | 50    |
| 5.2. Ізотермічні ємності для зберігання та транспортування ЗПГ                                                | 58    |
| 5.3. Теплообмінні апарати                                                                                     | 77    |
| <i>Питання для самоконтролю</i>                                                                               | 89    |
| Розділ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ, ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА, ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА                                    | 90    |
| 6.1. Охорона праці                                                                                            | 90    |
| 6.2. Пожежна безпека                                                                                          | 92    |
| 6.3. Охорона навколишнього середовища                                                                         | 98    |
| <i>Питання для самоконтролю</i>                                                                               | 100   |
| ЛІТЕРАТУРА                                                                                                    | 101   |

## ВСТУП

Земля – третя від Сонця планета, єдине відоме людині на цей час тіло Сонячної системи, населене живими організмами. Вона розкреслена водою та сушею, в яких залягає велика кількість корисних копалин (тверді, рідкі та газоподібні). Їх скупчення утворюють родовища, а при великих площинах розташування – райони, провінції й басейни. На сьогодні найбільш цінними паливними копалинами є нафта та газ. На природний газ приходить ся 21,3 % енергії, яку людство споживає у світі.

Стрімкий ріст цін на газ в 1995-2008 роках зробив рентабельними нові технології, наприклад, здобування сланцевого газу, запаси якого є дуже великими та розподілені більш-менш рівномірно по земній кулі.

Для поставок природного газу на великі відстані, як правило, використовують інфраструктуру на основі трубопроводів великого діаметру. При організації поставок ЗПГ капітальні витрати досить високі: необхідно очистити вихідний природний газ від домішок, зріджений його, перевезти в спеціалізованих цистернах і регазифікувати перед подачею в мережу споживача. За рахунок цього вартість природного газу, отриманого з ЗПГ, трохи вище, ніж в разі поставки природного газу через трубопровід. Однак ці дані не включають екологічні фактори. Газопровід – це ціла інфраструктура, що включає в себе компресорні станції, системи проміжного зберігання ПГ, джерела енергії тощо. В процесі побудови газопроводу відчужуються величезні площі родючих земель і лісових масивів. У довгостроковій перспективі збитки від будівництва та експлуатації інфраструктури трубопроводів значно вищі, ніж системи забезпечення споживачів ЗПГ. Особливо перспективні поставки ЗПГ для промислових об'єктів, розміщених в важкодоступних або віддалених областях, де будівництво газопроводу технічно або економічно недоцільно.

В даний час ЗПГ можна розглядати як альтернативу трубопровідного транспорту в будь-якому регіоні світу.

## РОЗДІЛ 1. ВЛАСТИВОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Природний газ – це суміш газів, що утворилися в надрах Землі при метановому бродінні органічних речовин. В пластових умовах (при заляганні в земних надрах) ПГ знаходиться в газоподібному стані – у вигляді окремих скупчень (газові залежи), в вигляді газової шапки нафтогазових родовищ, або в розчиненому стані в нафті чи воді. При нормальних умовах природний газ знаходиться тільки в газоподібному стані чи в вигляді кристалів в природних газогідратах.

Основним компонентом природного газу є метан (рис.1.1). У місцях до-бичі перед транспортуванням з ПГ витягують важкі вуглеводні і негорючі гази, які використовуються для опалення будинків, в якості автомобільного палива, а також для виробництва нафтохімічної продукції.



Рис. 1.1. Молекула метану

Залежно від вмісту метану та інших вуглеводневих компонентів метанового ряду гази діляться на сухі, жирні і кислі (рис. 1.2) [1].

До сухих відносяться гази, в яких вміст метану становить 95 ... 96 %, а етану, пропану, бутану і пентану незначно (частки відсотка). Такі склади характерні для чисто газових покладів, де відсутні джерела збагачення важкими компонентами.

Жирні гази – це гази з високим вмістом «важких» з'єднань. Крім метану, в них містяться десятки відсотків етану, пропану і більш високомолекулярних сполук аж до гексана. Жирні газові суміші характерні для попутних газів, які супроводжують нафтові поклади.

Кислі гази – це гази з високим вмістом  $\text{CO}_2$ .

Чистий природний газ не має кольору і запаху. Для облегшення можливості визначення витоку газу, в нього в невеликій кількості додають одо-

ранти – речовини, що мають легкий неприємний запах (гнилої капусти, прилого сіна, тухлих яєць).

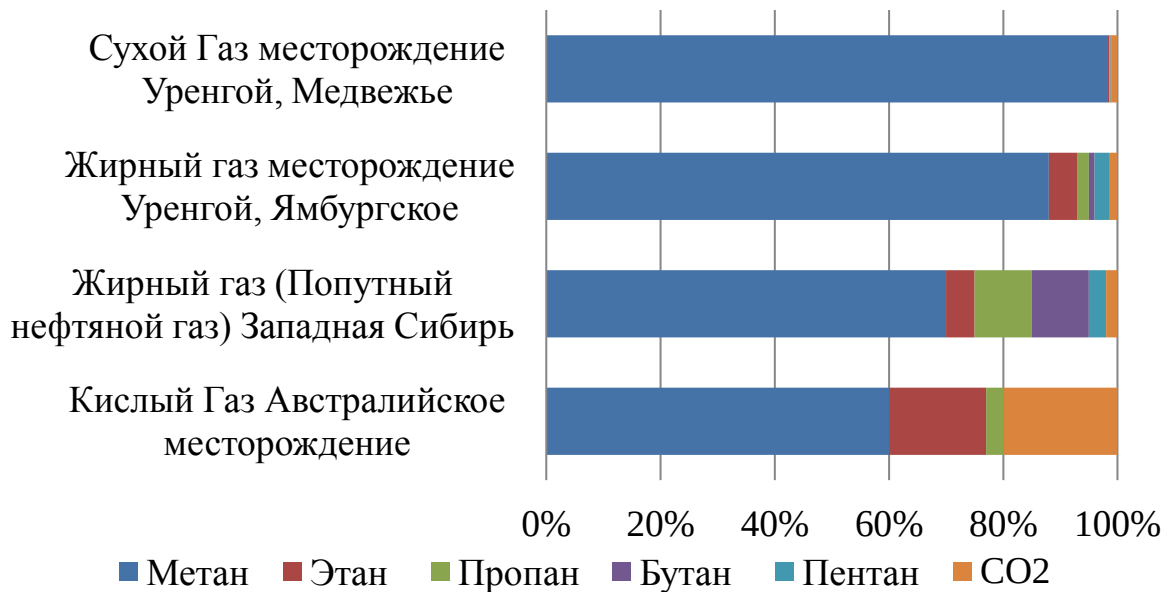


Рис. 2.1. Склад газу різних джерел

Зріджений природний газ — це газ, переведений в рідкий стан при температурах менш, ніж критична; кріогенна рідина, що отримується з природного газу охолодженням до температури конденсації  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура кристалізації  $-182,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , щільність  $420\text{ кг/м}^3$ . В залежності от состава природного газу применяются различные технологии его сжижения. Этот же критерий определяет себестоимость природного газа для потребителей.

## РОЗДІЛ 2. ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ

Природний газ – виключно цінна сировина для народного господарства. В якості палива він володіє високою теплотворною здатністю, гарною транспортабельністю. Його головна цінність полягає в тому, що це - екологічно чисте мінеральне паливо, при згорянні якого утворюється мала кількість шкідливих сполук. Все це створює передумови для нарощування використання ПГ в комунальному господарстві, в промисловості, включаючи електроенергетику, на транспорті. Частка природного газу в структурі світового енергоспоживання постійно збільшується.

Починаючи з 1990-х років, з'являються різні проекти використання ЗПГ в якості моторного палива на водному, залізничному та автомобільному транспорті, найчастіше з використанням переобладнання газодизельних двигунів [2-5]. Вже існують реально працюють приклади експлуатації морських і річкових суден на ЗПГ. У Росії налагоджується серійний випуск тепловоза ТЕМ19-001, що працює на ЗПГ. У США і Європі з'являються проекти з перекладу вантажного автомобільного транспорту на ЗПГ; існує проект розробки ракетного двигуна, який буде використовувати в якості палива ЗПГ і рідкий кисень.

Горючі гази є також цінною сировиною хімічної промисловості. Природні та попутні гази, які використовуються в хімічному синтезі, як правило, розділяють на окремі компоненти, кожний з яких є цінною сировиною.

При нагріванні природного газу с киснем (окислювальний піроліз) можливо отримати два продукти: ацетилен та синтез-газ. Ацетилен – це сировина для виробництва ацетатного шовку. Синтез-газ отримується при конверсії метану с водяною парою та використовується для різноманітних синтезів, в тому числі – в процесі виробництва аміаку.



### РОЗДІЛ 3. ЗРІДЖЕНИЙ ГАЗ – АЛЬТЕРНАТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ПОСТАВОК ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ПРОМИСЛОВО РОЗВИНЕНИХ РЕГІОНАХ СВІТУ

#### 3.1. Розподіл покладів природного газу

Світові доведені запаси газу, на кінець 2015 року складають 186,9 трлн. м<sup>3</sup> [5]. Вони розподілені нерівномірно (рис. 3.1). Найбільші за обсягом родовища ПГ знаходяться в Росії (17 %), Ірані (18 %) і Катарі (13 %). На пострадянській території найбільшими родовищами природного газу мають Узбекистан, Азербайджан, Казахстан (Карачаганакське родовище) і Туркменія [5].

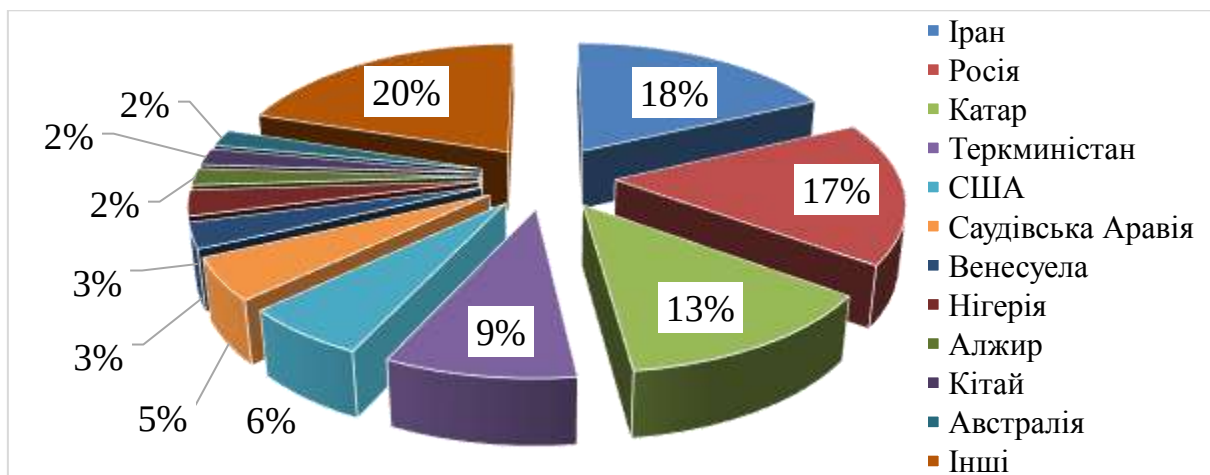


Рис. 3.1. Розподіл світових запасів ПГ на 2015 рік [2]

Основні поклади в Росії зосереджені в Волго-Уральському, Тимано-Печорському і Західно-Сибірському газonosних регіонах, а також на Далекому Сході та Північному Кавказі.

Одночасно зі споживанням ПГ виробляються постійні геофізичні дослідження, які відкривають нові родовища (рис. 3.2). Наприклад, обсяг розвіданих запасів ПГ у порівнянні з рівнем двадцятирічної давності (119,9 трлн. м<sup>3</sup> на кінець 1995 г.) виріс на 55,9 %, а якщо порівнювати з рівнем десятирічної давності (157,3 трлн. м<sup>3</sup> на кінець 2005 р .) - на 18,9 % [6].

Найбільшими доведеними запасами – 80 млрд. м<sup>3</sup>, мають країни Середнього Сходу: Катар, Іран, Саудівська Аравія.

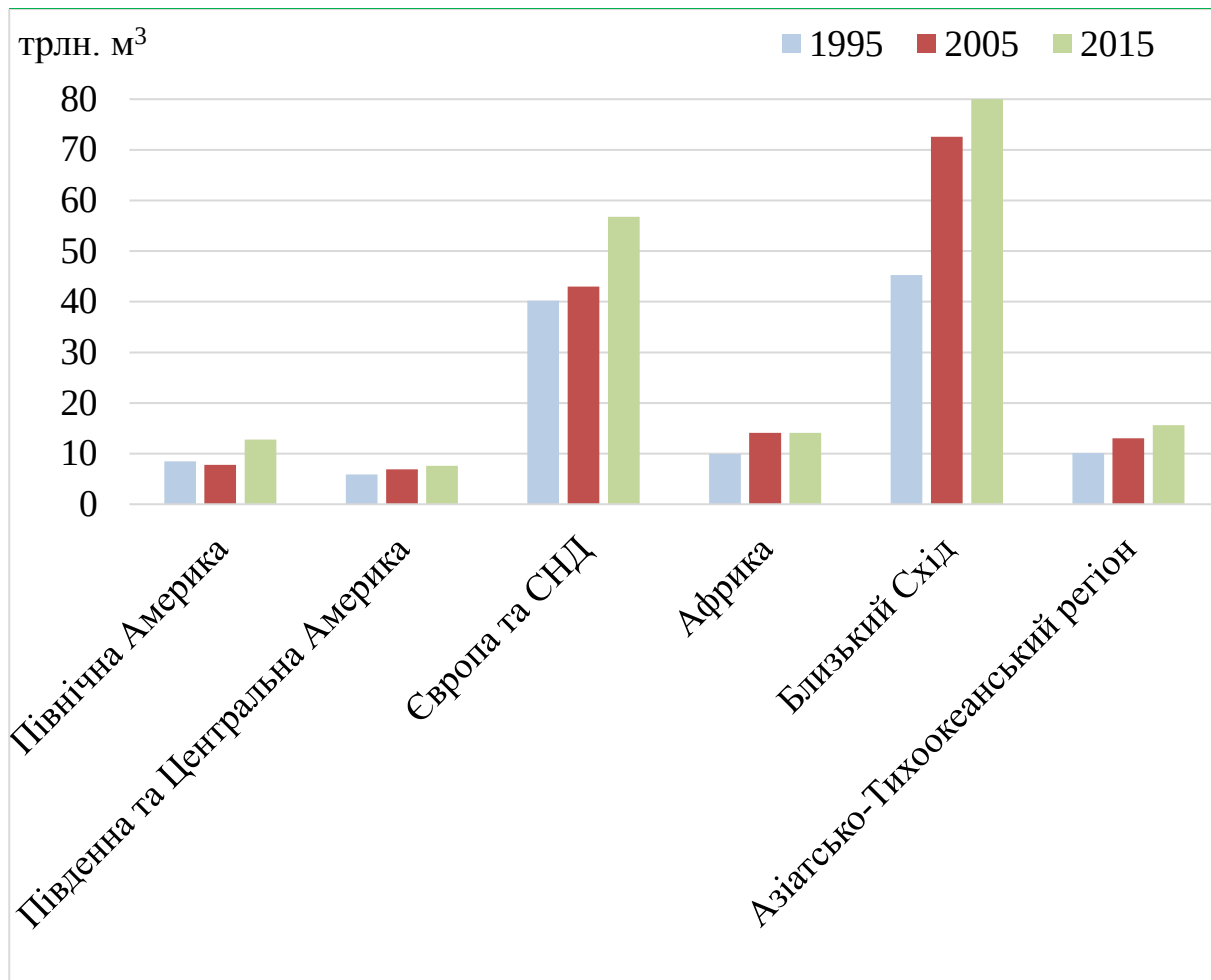


Рис. 3.2. Розподіл доведених запасів природного газу в 1995, 2005 і 2015 роках по регіонах [5]

Першими промисловими родовищами, з яких почали видобувати природний газ, були національні газові родовища в Південній Франції, Північній Італії, Німеччини та Румунії [6]. У 1960-і роки в Нідерландах було знайдено велику газове родовище Гронінген.

У таблиці 3.1 наведені дані про доведені запаси природного газу на території Європи з урахуванням Росії. Аналіз таблиці 3.1 показує, що в даний час найбільші запаси природного газу розміщені на території Росії (32,3 трлн. м<sup>3</sup>) [6]. Другі за обсягом (1,9 трлн. м<sup>3</sup>) запаси в Норвегії.

В останні десятиліття бурхливими темпами розвивається видобуток сланцевого газу (СГ) [7]. За складом це переважно метан, однак його досить важко отримати. Для цього необхідно знімати великі за площею обсяги ґрунту. Це дуже витратний і економічно нерентабельний спосіб видобутку. Проте, технології не стоять на місці, а собівартість його видобутку постійно знижується.

Таблиця 3.1. Доведені запаси ПГ Європи [6]

| Країни    | Доведені запаси      |       | Виробництво          |      |
|-----------|----------------------|-------|----------------------|------|
|           | трлн. м <sup>3</sup> | %     | млрд. м <sup>3</sup> | %    |
| Данія     | 0,05<                | 0,05< | 4,6                  | 0,1  |
| Німеччина | 0,05<                | 0,05< | 7,2                  | 0,2  |
| Італія    | 0,05<                | 0,05< | 6,2                  | 0,2  |
| Голландія | 0,7                  | 0,4   | 43                   | 1,2  |
| Норвегія  | 1,9                  | 1     | 117                  | 3,3  |
| Польща    | 0,1                  | 0,1   | 4,1                  | 0,1  |
| Румунія   | 0,1                  | 0,1   | 10,3                 | 0,3  |
| Росія     | 32,3                 | 17,3  | 573,3                | 16,1 |
| Україна   | 0,6                  | 0,3   | 17,4                 | 0,5  |
| Англія    | 0,2                  | 0,1   | 39,7                 | 1,1  |
| Інші      | 0,1                  | 0,1   | 3,2                  | 0,1  |

Аналіз розвіданих запасів СГ в світі (табл. 3.2) показує, що найбільшими запасами технічно доступного сланцевого газу володіють Китай, США, Мексика і Аргентина.

Вперше на промисловому рівні СГ почали добувати в 1821 році поблизу Нью-Йорка. Сьогодні найбільш об'ємними родовищами визнані Ред-Хок, Тикондерога, Тендер-Хорс, розташовані в Мексиканській затоці. За доведеними даними, тут може перебувати до 20 млрд. Кубометрів палива. Лідером за обсягами покладів СГ є родовище на Алясці - Пойнт-Томпсон. За оцінками запаси сланцевого газу становлять понад 3 трильйонів кубометрів.

Таблиця 3.2. Розподіл запасів сланцевого газу [8]

| Країна                         | Ресурси трлн. м <sup>3</sup> |                    | Країна                 | Ресурси трлн. м <sup>3</sup> |                    |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------|------------------------------|--------------------|
|                                | Геологічні                   | Технічно видобувні |                        | Геологічні                   | Технічно видобувні |
| Північна Америка               |                              |                    | Європа                 |                              |                    |
| Канада                         | 68,34                        | 16,23              | Велико-британія        | 3,8                          | 0,74               |
| США                            | 78,30                        | 18,80              | Німеччина              | 2,27                         | 0,48               |
| Мексика                        | 63,24                        | 15,43              | Данія                  | 4,5                          | 0,91               |
| Південна та Центральна Америка |                              |                    | Іспанія                | 1,19                         | 0,23               |
| Аргентина                      | 91,87                        | 22,71              | Нідерланди             | 4,28                         | 0,74               |
| Болівія                        | 4,36                         | 1,02               | Франція                | 20,59                        | 3,88               |
| Бразилія                       | 36,22                        | 6,94               | Швеція                 | 1,39                         | 0,28               |
| Венесуела                      | 23,08                        | 4,73               | Болгарія               | 1,87                         | 0,48               |
| Колумбія                       | 8,72                         | 1,56               | Литва                  | 0,11                         | -                  |
| Парагвай                       | 9,91                         | 2,12               | Польща                 | 21,61                        | 4,19               |
| Уругвай                        | 0,37                         | 0,06               | Румунія                | 6,60                         | 1,44               |
| Чилі                           | 6,46                         | 1,36               | Україна                | 16,20                        | 3,62               |
| Азія                           |                              |                    | Росія                  | 54,97                        | 8,13               |
| Індія                          | 16,54                        | 2,72               | Африка                 |                              |                    |
| Індонезія                      | 8,58                         | 1,30               | Алжир                  | 96,83                        | 20,02              |
| Йорданія                       | 0,99                         | 0,2                | Єгипет                 | 15,15                        | 2,83               |
| Китай                          | 134,41                       | 31,58              | Лівія                  | 26,68                        | 3,46               |
| Монголія                       | 1,56                         | 0,11               | Марокко                | 2,69                         | 0,57               |
| Пакистан                       | 16,60                        | 2,97               | Туніс                  | 3,23                         | 0,65               |
| Тайланд                        | 0,62                         | 0,14               | ПАР                    | 44,15                        | 11,04              |
| Туреччина                      | 4,62                         | 0,68               | Австралія та Океанія   |                              |                    |
|                                |                              |                    | Австралія              | 57,94                        | 12,38              |
| Итого:                         | Геологічні                   |                    | Технологічно видобувні |                              |                    |
|                                | 960,84                       |                    | 206,73                 |                              |                    |

В даний час в США будують газопровід для подачі СГ в Вашингтон, закінчення якого планується в 2018 році. Це багато в чому вирішить енергетичні проблеми Сполучених штатів Америки за рахунок власних ресурсів.

### 3.2. Споживання природного газу

Обсяг споживання природного газу в світі не надто різниться від обсягу його виробництва, оскільки майже весь видобутий і одержуваний газ відразу ж надходить в газорозподільні мережі. У 2015 році обсяги нових розвіданих запасів зрівнялися з рівнем споживання і досягли 186,9 трлн. м<sup>3</sup> [6].

Таблиця 3.3. Світове споживання природного газу за період 2005-2015 рр. [6]

|                                 | 2005   | 2007   | 2009   | 2011   | 2013   | 2015   |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Північна Америка                | 782,1  | 813,8  | 815,9  | 870,6  | 927,0  | 963,6  |
| Південна і Центральна Америка   | 123,5  | 142,5  | 136,8  | 151,5  | 165,8  | 174,8  |
| Європа та Азія                  | 1093,5 | 1120,6 | 1041,5 | 1089,1 | 1051,2 | 1003,5 |
| Середній Схід                   | 279,3  | 321,8  | 358,2  | 404,6  | 446,9  | 490,2  |
| Африка                          | 85,1   | 96,7   | 99,6   | 114,2  | 122,9  | 135,5  |
| Азіатсько-тихоокеанський регіон | 410,8  | 473,8  | 519,2  | 619,1  | 678,4  | 701,1  |
| Σ                               | 2504,5 | 2679,8 | 2680,2 | 2929,3 | 3062,5 | 3135,2 |

Частка країн Заходу в споживанні природного газу (близько 50 %), що відносяться до технологічно розвинених країн, більше, ніж їх частка у виробництві, а частка країн, що розвиваються (17 %) і країн з перехідною економікою (33 %) – навпаки, менше [7]. У 1990-х рр. ці відносні показники, хоча і повільно, але продовжували змінюватися: в країнах з перехідною економікою – в бік скорочення, а в двох інших груп – в бік збільшення частки споживання.

Європейська газова мережа (рис. 3.3) будувалася поступово протягом останніх 80 років. Спочатку вона була розроблена навколо національних газових родовищ в Південній Франції, Північній Італії, Німеччини та Румунії [6]. Великомасштабний імпорт газу з Норвегії, Росії та Алжиру був організований в якості основного джерела поставок газу в 1980-х роках після двох нафтових криз. У 1990-х роках газова мережа була побудована в Греції, Португалії та Ірландії. Після 2000 року спостерігається акцент на підключенні газового ринку Великобританії до норвезького газу на континенті і об'єднання з газовими мережами нових держав-членів ЄС. Створено альтернативні російським канали газопостачання шляхом прокладки трубопроводів з Північної Африки і з узбережжя Каспійського моря.

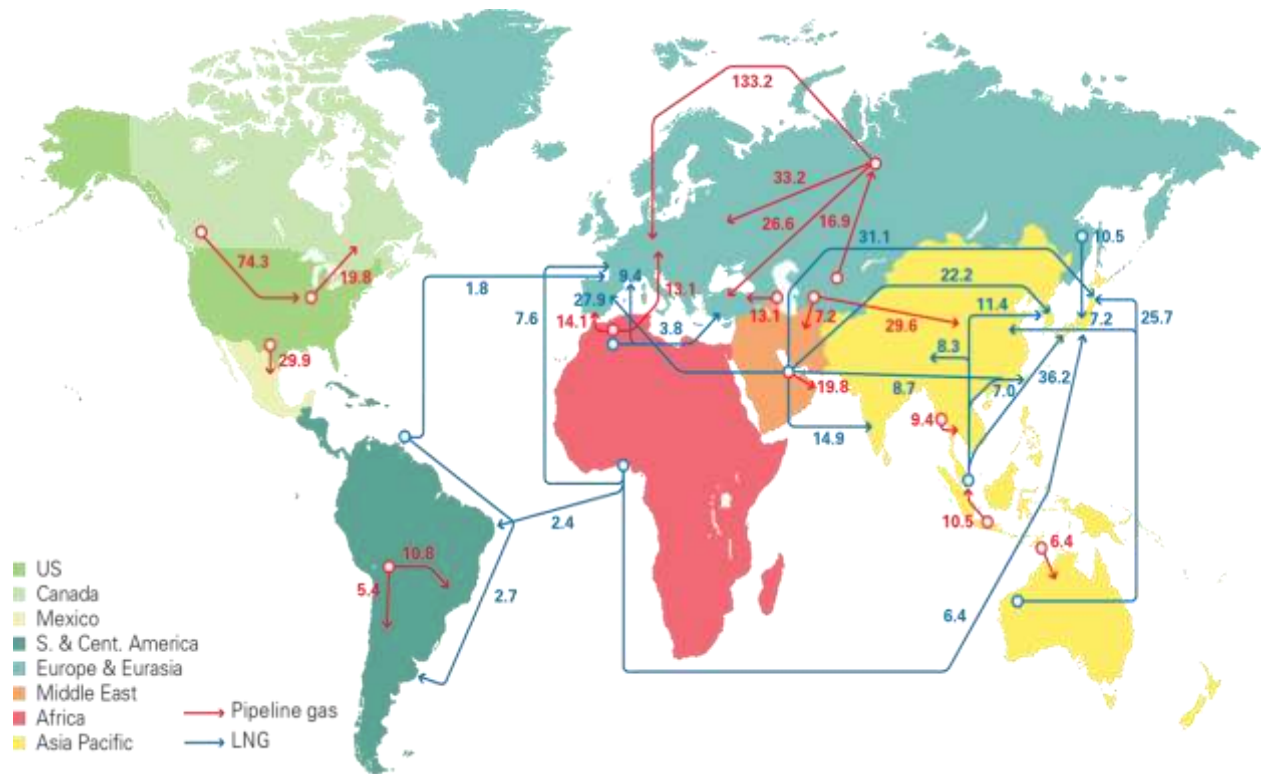


Рис. 3.3. Торговий рух газу за 2015 рік, млрд м³ [5]

У 2016 році попит на природний газ в Європі збільшився на 4,3% в порівнянні з 2015 роком через холодну зиму та переходу з вугілля на газ в енергетичному секторі. При незначній зміні внутрішнього виробництва додатковий попит на європейський газ був задоволений збільшенням імпорту з

використанням трубопровідного транспорту шляхом збільшення поставок з Росії та Алжиру. У 2016 році почалося очікуване збільшення поставок ЗПГ, але збільшення поставок було спожито азіатськими і близькосхідними ринками перш, ніж воно досягло Європи (табл. 3.4, 3.5).

Таблиця 3.4. Європейський ринок газу 2014-2016 [8]

|                                                | 2014                     | 2015                     | 2016                     |
|------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Потрібності Європи                             | 476 млрд. м <sup>3</sup> | 496 млрд. м <sup>3</sup> | 517 млрд. м <sup>3</sup> |
| Виробництво                                    | 255 млрд. м <sup>3</sup> | 248 млрд. м <sup>3</sup> | 246 млрд. м <sup>3</sup> |
| Об'єм в сховищах<br>(Storage Inventory Change) | 7 млрд. м <sup>3</sup>   | 6 млрд. м <sup>3</sup>   | 1 млрд. м <sup>3</sup>   |
| Російський імпорт                              | 148 млрд. м <sup>3</sup> | 160 млрд. м <sup>3</sup> | 172 млрд. м <sup>3</sup> |
| Інший імпорт трубою                            | 32 млрд. м <sup>3</sup>  | 30 млрд. м <sup>3</sup>  | 49 млрд. м <sup>3</sup>  |
| Споживання ЗПГ в Європі                        | 49 млрд. м <sup>3</sup>  | 51 млрд. м <sup>3</sup>  | 50 млрд. м <sup>3</sup>  |

Такий ступінь залежності від Росії турбує європейських споживачів. 28 членів торгового блоку запропонували знизити її за допомогою розвитку видобутку сланцевого газу і нафти, інвестування в нові проекти з доставки газу в Європу з країн Центральної Азії та Північної Африки.

### 3.3. Зріджений природний газ

Починаючи з 1970-х рр. в якості нового фактора світового енергетичного господарства став виступати зріджений природний газ [7]. Інтерес до цього енергоносія був зумовлений багатьма причинами, зокрема, наявністю великих ресурсів природного газу в багатьох країнах Азії, Африки і Латинської Америки, які після видобутку неможливо транспортувати по газопроводах в економічно розвинені країни. При цьому експортні поставки ЗПГ порівняно легко здійсненні і не вимагають будівництва дорогих газових ма-

гістралей. З точки зору економіки головною перевагою ЗПГ перед газоподібним паливом є мобільність ринку і можливість більш широкого вибору виробника.

Природний газ в зрідженому вигляді використовують велика кількість країн, однак їх обсяги, що становлять 55 млрд. м<sup>3</sup> від загального обсягу споживання природного газу (близько 13 % від загального обсягу споживання ПГ), не можна порівняти з традиційним методом доставки трубопровідним транспортом.

Таблиця 3.5. Обсяг споживання природного газу країнами Європи [6]

| Країни    | Споживання           |     | Країни     | Споживання           |       |
|-----------|----------------------|-----|------------|----------------------|-------|
|           | млрд. м <sup>3</sup> | %   |            | млрд. м <sup>3</sup> | %     |
| Австрія   | 8,3                  | 0,2 | Литва      | 2,3                  | 0,1   |
| Білорусія | 17,2                 | 0,5 | Голландія  | 31,8                 | 0,9   |
| Бельгія   | 15,1                 | 0,4 | Норвегія   | 4,8                  | 0,1   |
| Болгарія  | 2,9                  | 0,1 | Польща     | 16,7                 | 0,5   |
| Чехія     | 7,2                  | 0,2 | Португалія | 4,3                  | 0,1   |
| Данія     | 3,2                  | 0,1 | Румунія    | 10,3                 | 0,3   |
| Фінляндія | 2,1                  | 0,1 | Росія      | 391,5                | 11,2  |
| Франція   | 39,1                 | 1,1 | Словаччина | 4,3                  | 0,1   |
| Німеччина | 74,6                 | 2,1 | Іспанія    | 27,6                 | 0,8   |
| Греція    | 2,8                  | 0,1 | Швеція     | 0,9                  | 0,05< |
| Угорщина  | 8,9                  | 0,3 | Швейцарія  | 2,9                  | 0,1   |
| Ірландія  | 4,2                  | 0,1 | Туреччина  | 43,6                 | 1,3   |
| Італія    | 61,4                 | 1,8 | Україна    | 28,8                 | 0,8   |
| Англія    | 68,3                 | 2   | Інші       | 7,6                  | 0,2   |



Головними експортерами СПГ були і залишаються країни, що розвиваються – в першу чергу Південно-Східної Азії, Африки і Південно-Західної Азії. Частка економічно розвинених країн у світовому експорті не досягає і 1/10 (рис. 3.3) [7].

Основний експорт з країн Південно-Східної Азії на початку XXI ст. забезпечують Індонезія, Малайзія і Бруней, з Африки - Алжир і Нігерія, з Південно-Західної Азії-Катар і Абу-Дабі (ОАЕ). Серед країн Заходу до числа експортерів СПГ відносяться тільки США (Аляска) і Австралія. Важливо враховувати, що ця група провідних країн-експортерів не залишається незмінною. Уже на границі XX-XXI ст. в неї увійшли ще кілька країн: Катар, Нігерія, Тринідад і Тобаго.

Поряд з групою країн-експортерів зрідженого природного газу склалася і досить постійна група країн-імпортерів. Це, перш за все, країни Східної Азії - Японія (понад 1/2 всього світового імпорту СПГ), Республіка Корея і о. Тайвань, а також країни Західної Європи - Франція, Іспанія, Італія, Бельгія. Зазвичай в цю групу включають і Туреччину. Трохи СПГ імпортують і США. Деякі з цих країн - Японія, Республіка Корея, о. Тайвань, ввозять природний газ виключно в зрідженому вигляді. Франція, Бельгія, не кажучи вже про США, поряд з імпортом СПГ, орієнтуються на імпорт газоподібного палива.

З географічної точки зору особливий інтерес становить та обставина, що окремі райони експорту та імпорту СПГ тісно пов'язані один з одним і разом утворюють міжнародні газотранспортні системи, кожна з яких включає в себе весь виробничий ланцюжок - від видобутку природного газу до доставки його до споживачів на місце призначення. До початку XXI ст. в світовому господарстві склалися дві головні газотранспортні системи – система Азіатсько-Тихоокеанського регіону і Африкансько-Західноєвропейська система (рис. 3.3).

Будується велика кількість нових заводів зі скраплення природного газу, модернізуються вже функціонують. За рахунок цього постачання ЗПГ планується збільшити з 350 млрд. МЗ в 2016 до понад 510 млрд. МЗ у 2021.

Споживання газу в Європі неухильно зростає завдяки його екологічності та планів щодо скорочення використання вугілля (особливо в Німеччині, Польщі і Чехії) через активне використання в електроенергетиці, промисловості і поширення його застосування в транспорті. Для заміни палива з вугілля на газ буде потрібно додатково 70 млрд куб. м газу в рік, і частина цього попиту якраз задовольнить СПГ.

Зростає число автомобілів на газі в Європі, при цьому в Італії, Франції, Німеччині та Нідерландах відзначається зростання споживання газу саме в генерації електроенергії. При цьому Південній Європі не вистачає диверсифікації джерел. А для того щоб впоратися з цією проблемою, Європа повинна просувати будівництво нових інфраструктурних проєктів, які дозволять транспортувати газ з півночі на південь і зі сходу на захід.

Європейці активно будують термінали для прийому зрідженого газу з Північної Америки. За даними [9] в 2016 р на території Європи перебувало 26 терміналів з прийому СПГ, багато з яких виконують функцію перевалочну базу (рис. 3.4). Це дозволило знизити залежність ЄС від поставок трубопровідного газу з Росії і з Норвегії.

Виробництво зрідженого природного газу дозволяє вирішити безліч проблем, пов'язаних з видобутком природного газу в умовах арктичного клімату і в інших важкодоступних регіонах з подальшим постачанням в промислово розвинені країни.

За потужністю ЗПГ терміналів, як і за обсягом імпорту ЗПГ, лідирує Японія – 246 млрд кубометрів на рік за даними 2010 року. На другому місці – США, більш 180 млрд кубометрів на рік (дані 2010 року). В цілому на 2010 рік сукупна потужність терміналів перевищила 800 млрд кубометрів.

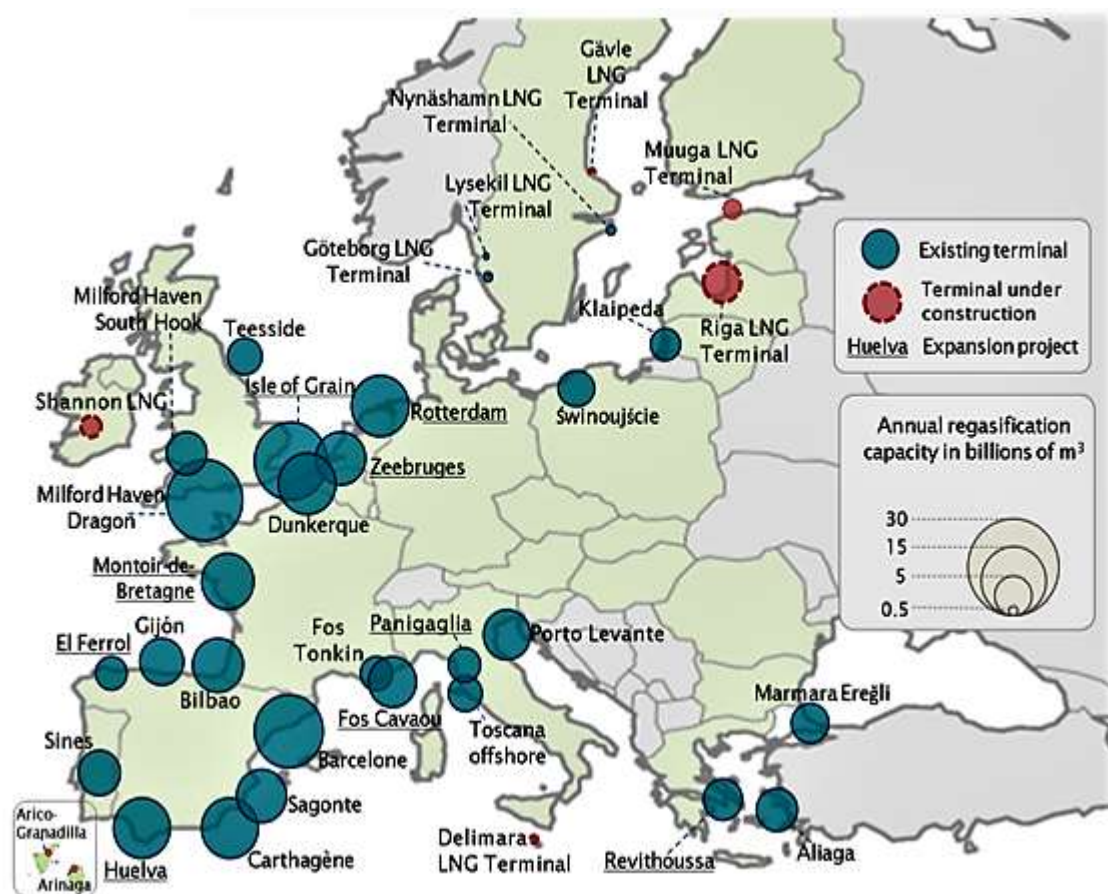


Рис. 3.4. Карта європейських терміналів ЗПГ на 2016 рік

Головним завданням у розвитку прийомних терміналів насамперед є будівництво нових одиниць в різних країнах. На сьогоднішній день 6 2% приймальні потужності доводиться на Японію, США і Південну Корею. Разом з Великобританією та Іспанією, приймальня потужність перших 5 країн становить 74 %. Решта 26 % розподілені між 23 країнами. Отже, будівництво нових терміналів відкриє нові і збільшить існуючі ринки для ЗПГ.

В даний час актуальними є дослідження, спрямовані на зниження собівартості ЗПГ, як в сфері виробництва, так і при його споживанні (регазифікації). Для цього необхідне проведення широкого спектру досліджень, спрямованих на розробку нових технічних рішень, а також вдосконалення технології виробництва зрідженого природного газу.

### ***ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ***

1. Природний газ (склад, властивості).
2. Області застосування природного газу.
3. Поклади природного і сланцевого газу.
4. Виробники і споживачі ПГ.
5. Ринок ЗПГ

## РОЗДІЛ 4. ВИРОБНИЦТВО ЗРІДЖЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ

### 4.1. Цикли кріогенних установок [10-17]

Зрідження природного газу можливе лише при охолодженні його нижче критичної температури. Інакше газ не зможе бути перетворений в рідину навіть при дуже високому тиску.

Для зрідження природного газу можуть бути використані як принципи внутрішнього охолодження, коли природний газ сам виступає в ролі робочого тіла, так і принципи зовнішнього охолодження, коли для охолодження і конденсації природного газу використовуються допоміжні кріогенні гази з більш низькою температурою кипіння (наприклад, кисень, азот, гелій). В останньому випадку теплообмін між природним газом і допоміжним кріогенним газом відбувається через теплообмінну поверхню.

Зрідження природного газу на основі внутрішнього охолодження може досягатися такими способами:

- \* Розширенням стисненого газу при  $h = \text{const}$ , тобто дроселюванням; при дроселюванні потік газу не виробляє будь-якої роботи;

- \* При  $s = \text{const}$  з віддачею зовнішньої роботи; при цьому отримують додаткову кількість холоду, крім обумовленого ефектом Джоуля-Томсона, так як робота розширення газу відбувається за рахунок його внутрішньої енергії.

#### 4.1.1. Системи зрідження з використанням процесу дроселювання

Для аналізу ефективності систем зрідження приймемо ідеальні умови: незворотні втрати; гідравлічні опори відсутні (за винятком дроселя); відсутні також теплоприви з навколишнього середовища; теплообмінники має стовідсоткову ефективність.

**4.1.1.1. Система Лінде-Хемпсона.** Ця система є найпростішою серед всіх систем зрідження. Схема системи Лінде-Хемпсона показана на рис. 4.1, а, а цикл – в  $T,s$ -діаграмі на рис. 4.1, б.

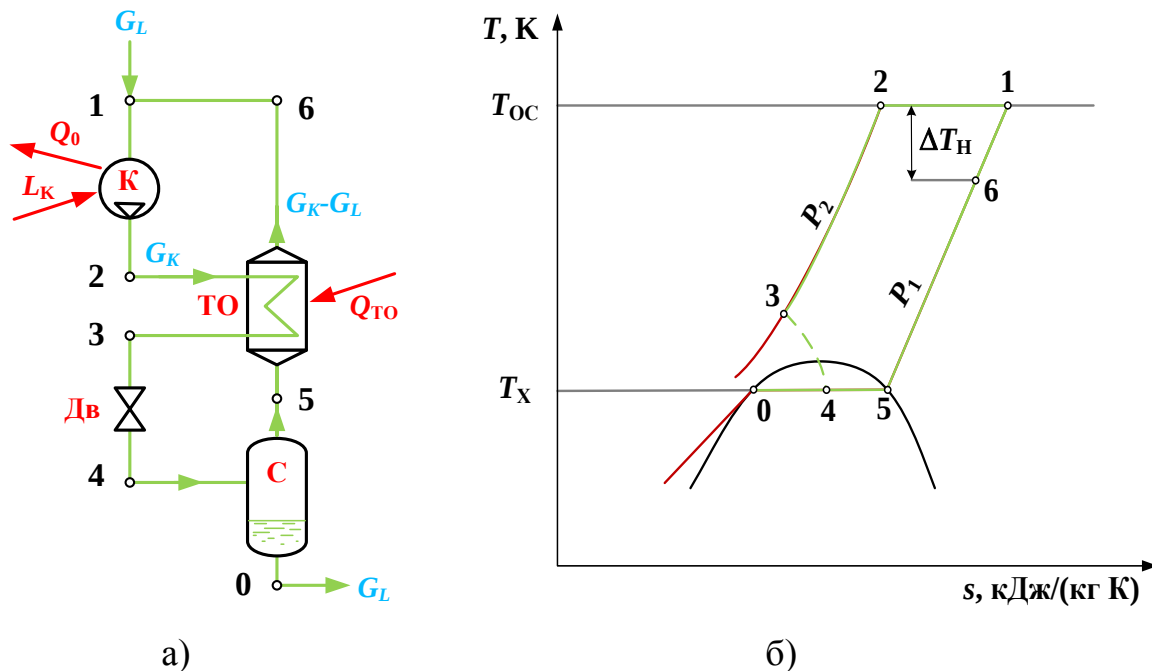


Рис. 4.1. а) Зріджувальна система Лінде-Хемпсона: К – компресор; ТО – теплообмінний апарат; Дв – дросельний вентиль; С – сепаратор;  $L_K$  – витрачається робота зі стиснення газу,  $Q_0$  – сумарний потік енергії від системи;

$Q_{TO}$  – теплоприлив до теплообмінного апарату;  $G_L$  – витрата рідини;

$G_K$  – витрата через компресор; б) цикл Лінде-Хемпсона в  $T,s$ -діаграмі;

$\Delta T_H$  – недорекуперація

Цикл Лінде-Хемпсона працює наступним чином:

- ✓ газ стискається зворотно і ізотермічно від умов навколишнього середовища в точці 1 до точки 2. У реальній системі процес 1-2 складається з двох процесів: незворотного адіабатного або політропного стиснення і подальшого зниження температури газу до значення, що відрізняється від температури навколишнього середовища всього на кілька градусів;
- ✓ стиснений газ проходить через теплообмінник при постійному тиску (в ідеальному випадку), в якому відбувається обмін енергією з відходить потоком низького тиску (процес 2-3);

- ✓ від точки 3 до точки 4 відбувається розширення газу в дроселі до  $P_4 = P_1$  (процеси 2-3 – ізобарично). У точці 4 частина газового потоку знаходиться в рідкому стані і виводиться з системи в стані 0 (стан насиченою рідини), інша частина потоку виводиться зі збірки рідини в стані 5 (стан насиченої пари);
- ✓ цей холодний газ, в кінцевому рахунку, нагрівається до початкової температури, відводячи енергію від вхідного потоку високого тиску.

Для отримання оптимальної ефективності (максимальний вихід рідини  $y$  – частка зрідженого газу  $G_L$  із загального потоку  $G_K$ ,  $y = G_L / G_K$ ) системи Лінде-Хемпсона стан 2 повинен знаходитись на кривій інверсії. Для метану при 300 К це тиск приблизно 100 МПа. Однак в реальних системах через технологічних обмежень зазвичай застосовується тиск близько 25...30 МПа.

Проста система Лінде-Хемпсона, показана на рис. 4.1, не працюватиме для таких газів, як неон, водень і гелій. Ця система не зможе бути запущена, так як максимальна температура інверсії для цих газів нижче кімнатної температури. Чим ближче газ за своїми властивостями до ідеального, тим нижче його температура інверсії (у водню, наприклад, при атмосферному тиску  $T_{(i \max)} = 216$  К, у гелію  $T_{(i \max)} = 34$  К, у неону  $T_{(i \max)} = 250$  К). Ефективність системи Лінде-Хемпсона  $y$  для різних речовин ( $P_1 = 101,3$  кПа;  $P_2 = 20,265$  МПа;  $T_1 = T_2 = 300$  К) наведена у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Ефективність зрідження різних газів

| Речовина                   | N <sub>2</sub> | повітря | CO     | Ar     | O <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | NH <sub>3</sub> |
|----------------------------|----------------|---------|--------|--------|----------------|-----------------|-----------------|
| Вихід рідини,<br>моль/моль | 0,0708         | 0,0808  | 0,0871 | 0,1183 | 0,1065         | 0,1977          | 0,8079          |

**4.1.1.2. Система Лінде-Хемпсона з попереднім охолодженням.** Ефективність системи Лінде-Хемпсона може бути підвищена, якщо її модерні-

зувати таким чином, щоб газ на вході в теплообмінник мав температуру нижче температури навколишнього середовища. Така удосконалена система показана на рис. 4.2, а, а цикл в  $T,s$ -діаграмі – на рис. 4.2, б.

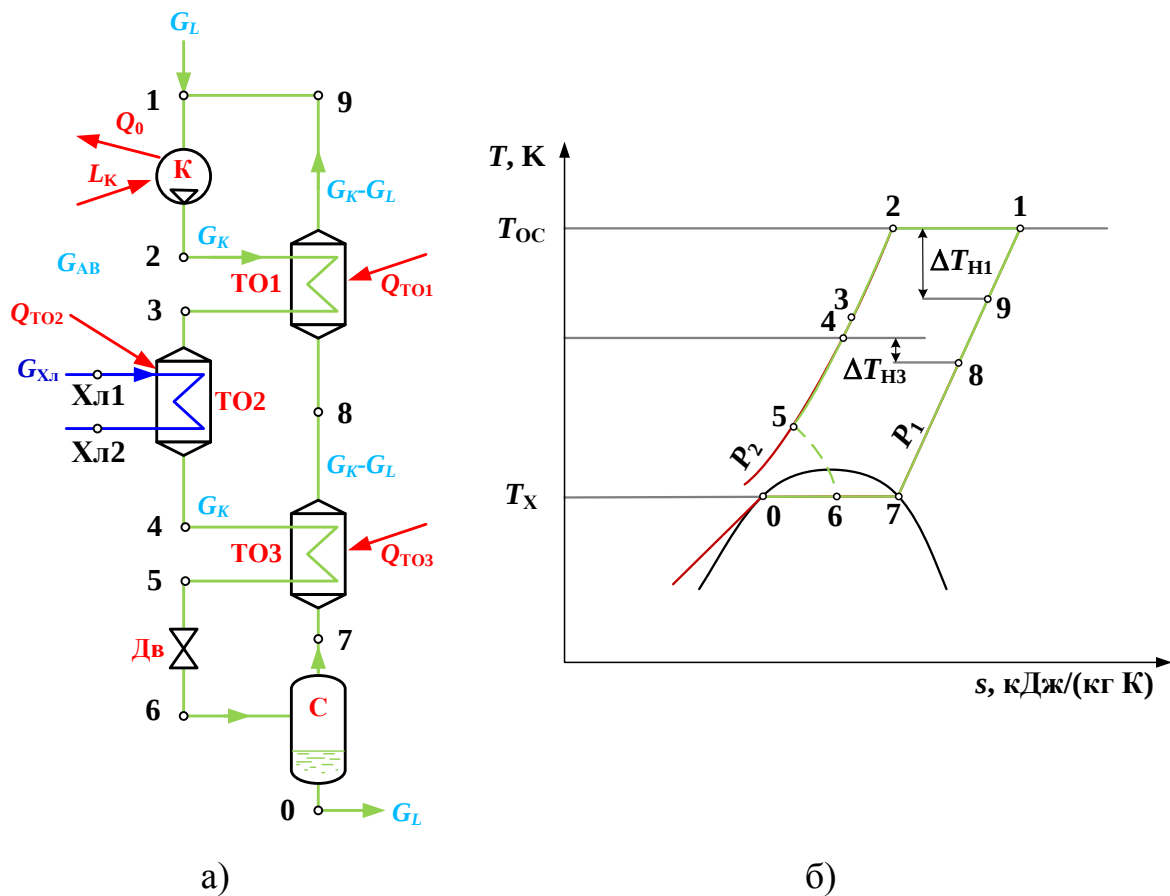
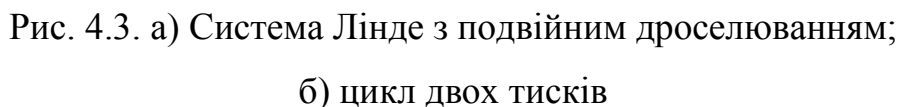


Рис. 4.2. а) Система Лінде-Хемпсона з попереднім охолодженням: К – компресор; ТО – теплообмінний апарат; Дв – дросельний вентиль; С – сепаратор;  $L_K$  – витрачається робота зі стиснення газу,  $Q_0$  – сумарний потік енергії від системи;  $Q_{TO}$  – теплоприлив до теплообмінного апарату;  $G_L$  – витрата рідини;  $G_K$  – витрата через компресор;  $G_{Xл}$  – витрата холодоагенту;  
б) цикл Лінде-Хемпсона з попереднім охолодженням в  $T,s$ -діаграмі

Для охолодження основного потоку газу використовується окрема система охолодження на таких холодоагентах, як вуглекислий газ, аміак, хлориди. Критична температура допоміжного холодоагенту повинна бути вище температури навколишнього середовища, для того щоб він міг бути сконденсований в результаті обміну теплотою з атмосферою або охолоджуючою водою при температурі з навколишнього середовища.



**4.1.1.3. Система Лінде з подвійним дроселюванням.** Так як в простій системі Лінде-Хемпсона тільки невелика частина газу зріджується, можна вдосконалити цикл таким чином, щоб не весь газ розширювався до низького тиску, а деяка частина розширювалася б до проміжного тиску. Витрати роботи в ідеальному ізотермічному компресорі для ідеального газу рівні  $R T_1 \ln (P_2/P_1)$ , тобто зниження ступеня стиснення знижує витрати роботи. Це реалізовано в системі Лінде з подвійним дроселюванням, схема якої показана на рис. 4.3, а, а цикл показаний в  $T,s$ -діаграмі на рис. 4.3, б.



25

зширюється до проміжного тиску в точці 5, де частина газу зріджується. Насичена рідина і пар поділяються в збірнику рідини. Пар повертається в другий компресор через трьохточний теплообмінник, тоді як рідина розширюється до нижнього тиску циклу.

Значення ККД для систем з подвійним дроселюванням приблизно на 20-30% вище, ніж для системи Лінде-Хемпсона з попереднім охолодженням.

**4.1.1.4. Каскадна система.** Каскадна система є розвитком системи з попереднім охолодженням, в якій попередня система охолодження охолоджується іншою додатковою системою. Каскадна система, запропонована Кеєзомом в 1933 р, показана на рис. 4.4.

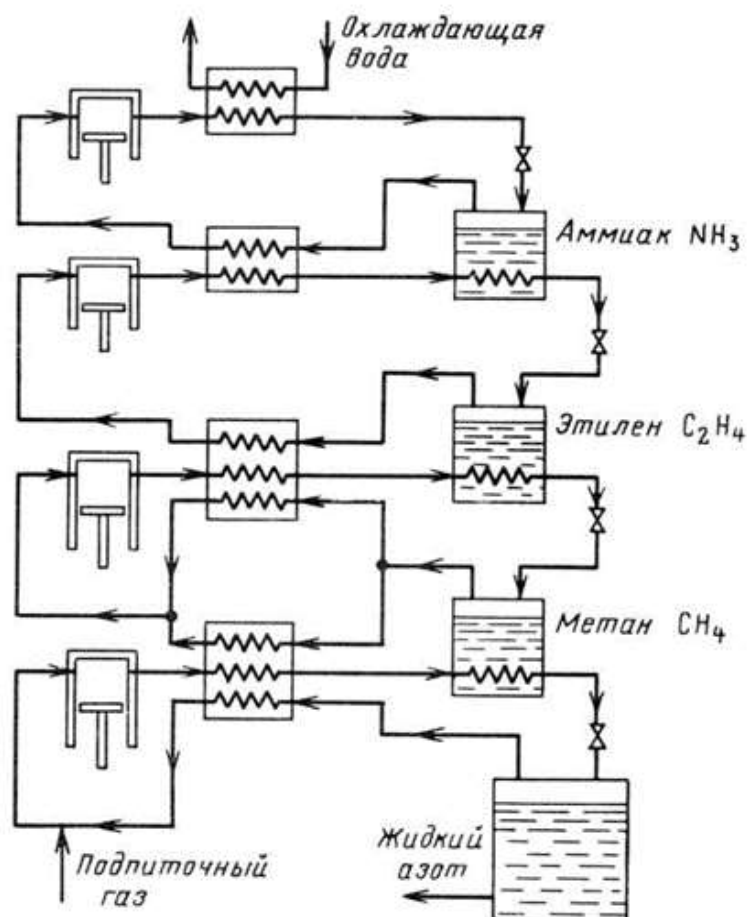


Рис. 4.4. Каскадна система, призначена для скраплення азоту

Аміак використовується для зрідження етилену при 1925 кПа, етилен - для зрідження метану при 2530 кПа. На завершення метан використовується для зрідження азоту при 1885 кПа.

З термодинамічної точки зору каскадні системи близькі до ідеальних зворотних систем. Каскадні системи більш ефективні за рахунок того, що незворотні втрати в дроселі мають місце в більш вузькому діапазоні тисків. Другою перевагою каскадних систем є більш низький робочий тиск в окремих контурах.

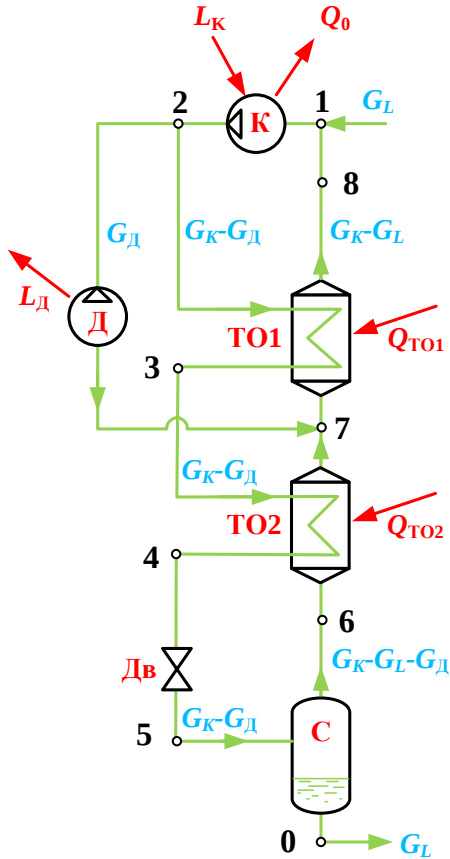
Каскадний цикл зрідження метану є еталоном енергоефективності. Незважаючи на це, каскадний цикл не знайшов широкого практичного застосування зважаючи на значні капітальні витрати. Щоб запобігти витоку рідини, кожен контур повинен бути абсолютно герметичний, що створює додаткові складності при монтажі та експлуатації обладнання.

#### **4.1.2. Системи зрідження з використанням процесу оборотного адіабатичного розширення**

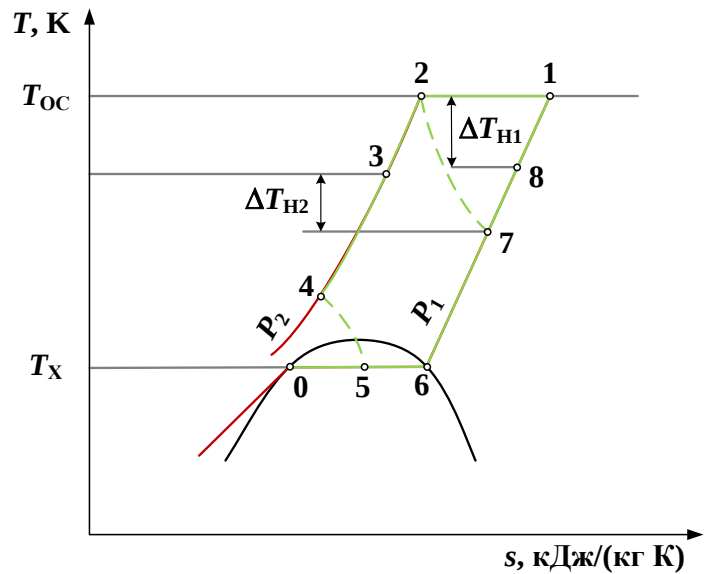
**4.1.2.1. Система середнього тиску Клода.** З термодинамічної точки зору розширення в дроселі є незворотнім процесом. Таким чином, для того щоб наблизитися до ідеальної ефективності, потрібно знайти кращий процес для отримання низьких температур. В системі Клода, показаної на рис. 4.5, а, енергія відводиться від газового потоку за рахунок виробництва їм роботи в розширювальній машині або детандері. Цикл Клода в  $T,s$ -діаграмі показаний на рис. 4.5, б. Якщо процес в детандері оборотний і адіабатичний, то цей процес є ізоентропійним, в якому досягається більш низька температура, ніж для ізоентальпійного розширення.

Спочатку газ стискається до тиску приблизно 4 МПа і потім проходить через перший теплообмінник. Близько 60...80 % газу відділяється від основного потоку, розширюється в детандері і знову об'єднується з зворотним потоком за другим теплообмінником.

Зріджувальний потік рухається далі через другий і третій теплообмінники і, нарешті, дроселюється в збірник рідини. Холодний пар зі збірки рідини повертається через теплообмінники, охолоджуючи надходить газ.



а)



б)

Рис. 4.5. а) Система Клода: К – компресор; ТО – теплообмінний апарат; Дв – дросельний вентиль; С – сепаратор; Д – детандер;  $L_K$  – витрачається робота зі стиснення газу;  $L_D$  – виробляється робота з розширення газу;  $Q_0$  – сумарний потік енергії від системи;  $Q_{TO}$  – теплоприлив до теплообмінного апарату;  $G_L$  – витрата рідини;  $G_K$  – витрата через компресор;  $G_D$  – витрата через детандер; б) цикл Клода в  $T,s$ -діаграмі: ефективність теплообмінників дорівнює 100 % і адіабатна ефективність детандера дорівнює 100 %

Дросель як і раніше необхідний в системі Клода, так як детандер реальної системи не може витримати великий вологовміст. Рідина має значно

меншу стисливість, ніж газ, тому, якщо в циліндрі детандера (поршневого типу) утворюється рідина, це призведе до високих ударних навантажень. Були розроблені експериментальні зразки турбодетандерів осьового типу, які успішно працюють з вмістом рідини до 15% за вагою без руйнування лопаткового апарату турбіни. У деяких системах Клода робота, одержувана в детандере, використовується при стисненні газу. У системах невеликої продуктивності енергія розсіюється в гальмах або споживається зовнішнім повітряним вентилятором. Це не позначається на виході рідини, проте, в разі, коли робота детандера не використовується, збільшуються витрати роботи на стиснення. Теоретично ККД таких систем доходить до 80 %.

**4.1.2.2. Система низького тиску.** *Капіція* модернізував базову схему Клода, відмовившись від третього, або низькотемпературного, теплообмінника (рис. 4.6). Оскільки температура газу перед детандером досить низька, що створює труднощі з мастилом, замість поршневого детандера був використаний турбодетандер.

Перший, або високотемпературний, теплообмінник в системі Капіці був насправді набір регенераторів з клапанами, в яких об'єднувалися процеси охолодження і очищення. Вхідний теплий газ охолоджувався в одному регенеративній елементі, і в ньому ж осідали домішки, в той час як вихідний потік нагрівався в іншому елементі регенератора і виносив домішки, обложіні в ньому раніше. Через кілька хвилин спрацьовували клапани і перемикали потоки високого і низького тисків з одного елемента на інший. Робочий тиск для системи Капіці становило приблизно 700 кПа.

**4.1.2.3. Система Гейландта.** *Гейландт* зауважив, що для циклу високого тиску (приблизно 20 МПа з часткою детандированого потоку приблизно 0,6) оптимальне значення температури перед розширенням в детандері близько до температури навколишнього середовища. Таким чином, застосовуючи систему Клода з тиском 20 МПа, можна виключити перший

теплообмінник. Модернізована таким чином система Клода названа системою Гейландта по імені її автора і широко використовується в установках високого тиску для зрідження повітря. Схема установки показана на рис. 4.7.

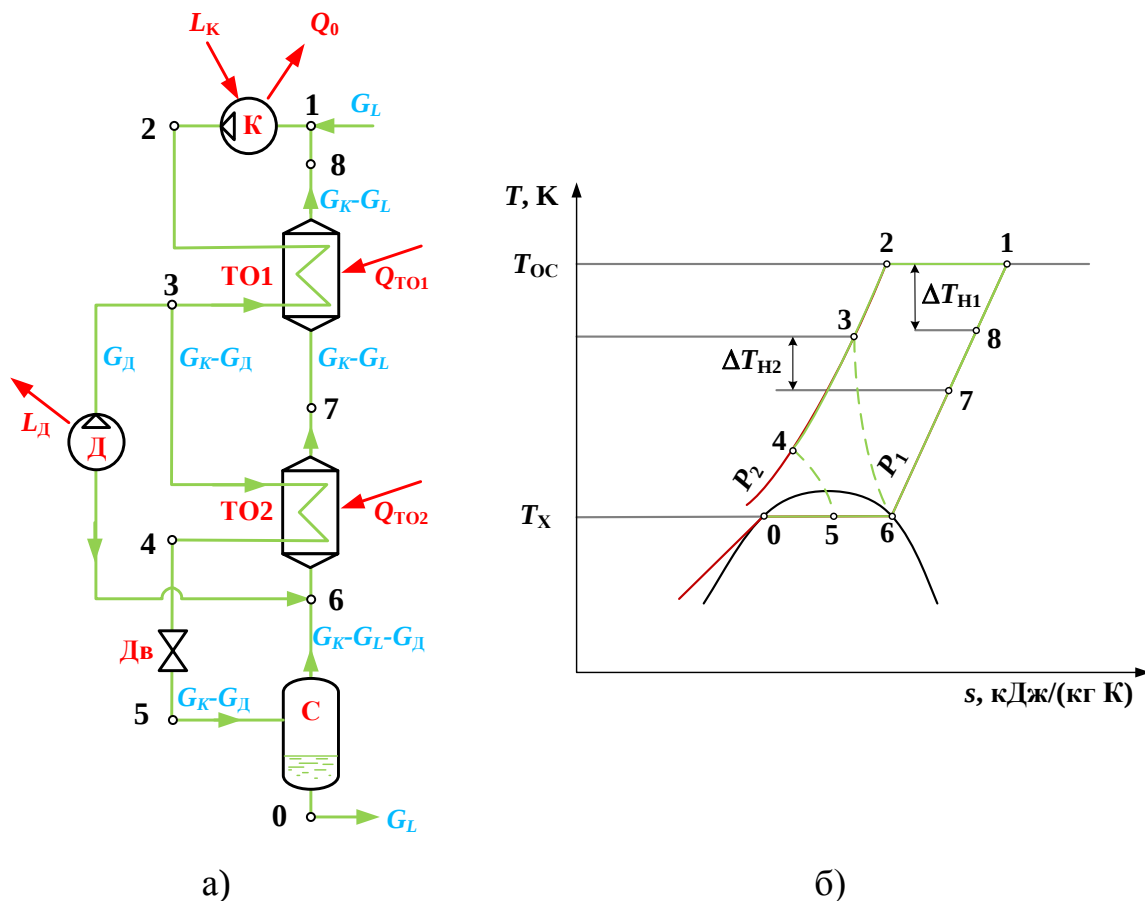
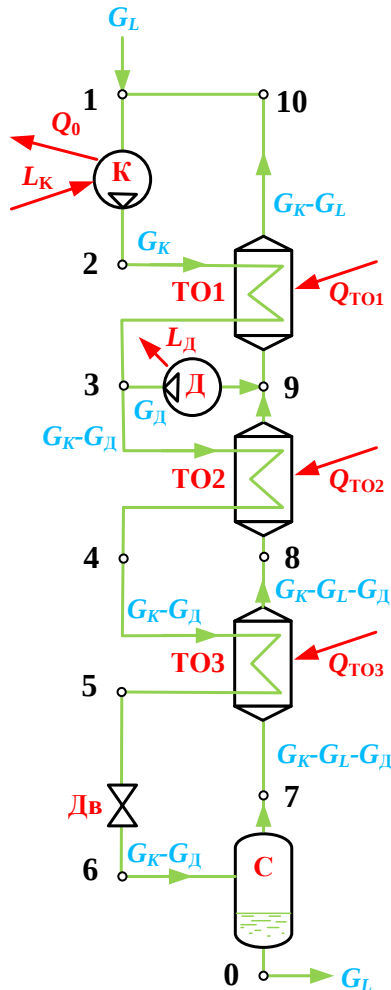


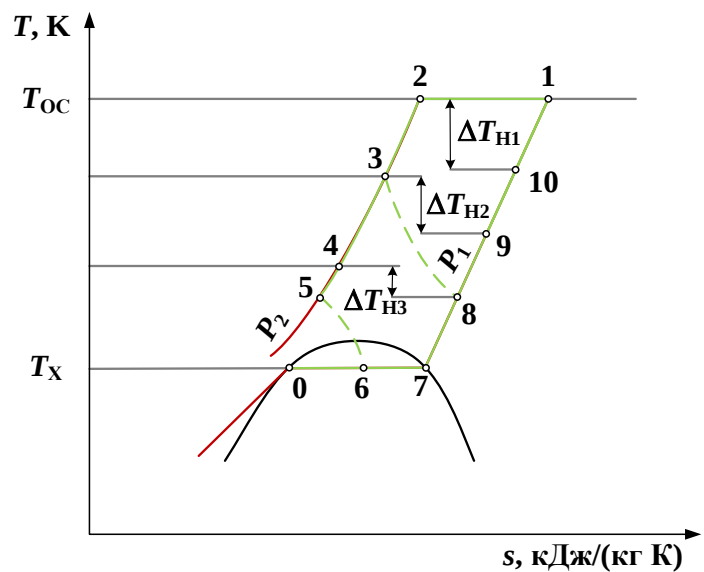
Рис. 4.6. а) Система Капиці: К – компресор; ТО – теплообмінний апарат; Дв – дросельний вентиль; С – сепаратор; Д – детандер;  $L_K$  – витрачається робота зі стиснення газу;  $L_D$  – виробляється робота з розширення газу;  $Q_0$  – сумарний потік енергії від системи;  $Q_{TO}$  – теплоприлив до теплообмінного апарату;  $G_L$  – витрата рідини;  $G_K$  – витрата через компресор;  $G_D$  – витрата через детандер; б) Система Капиці в  $T,s$ -діаграмі

Перевагою системи Гейландта є просте вирішення питань мастила в детандері. У системах зрідження повітря газ надходить в детандер при кімнатній температурі і виходить з температурою приблизно 150 K; для змащення можуть використовуватися звичайні мастильні речовини. В системі

Гейландта детандер і дросель вносять приблизно однаковий внесок у здобуття низьких температур, в той час як у звичайній системі Клода роль детандера (частка детандерного потоку) багато більша.



а)



б)

Рис. 4.7. а) Система Гейландта: К – компресор; ТО – теплообмінний апарат; Дв – дросельний вентиль; С – сепаратор; Д – детандер;  $L_K$  – витрачається робота зі стиснення газу;  $L_D$  – виробляється робота з розширення газу;  $Q_0$  – сумарний потік енергії від системи;  $Q_{TO}$  – теплоприлив до теплообмінного апарату;  $G_L$  – витрата рідини;  $G_K$  – витрата через компресор;  $G_D$  – витрата через детандер; б) Система Гейландта в  $T,s$ -діаграмі

**4.1.2.4. Система Клода з двома рівнями тиску.** Існує безліч удосконалень, які можуть бути використані для підвищення ефективності базової схеми Клода. На рис. 4.8 показано система Клода з двома рівнями тиску, аналогічна системі Лінде з подвійним дроселюванням.

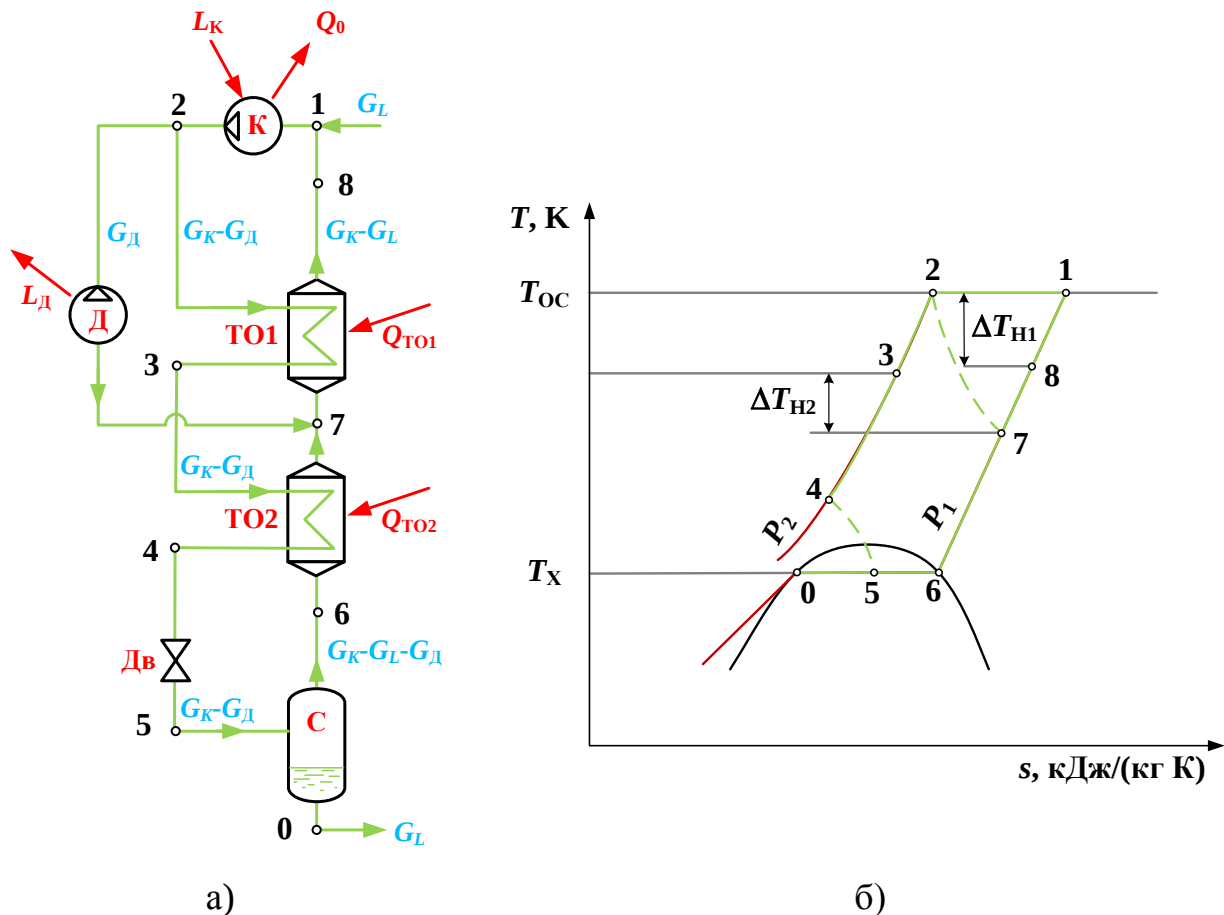


Рис. 4.8. а) Система Клода двох тисків: К – компресор; ТО – теплообмінний апарат; Дв – дросельний ventиль; С – сепаратор; Д – детандер;  $L_K$  – витрачається робота зі стиснення газу;  $L_D$  – виробляється робота з розширення газу;  $Q_0$  – сумарний потік енергії від системи;  $Q_{TO}$  – теплоприлив до теплообмінного апарату;  $G_L$  – витрата рідини;  $G_K$  – витрата через компресор;  $G_D$  – витрата через детандер; б) Система Клода в  $T,s$ -діаграмі



В описаній системі до високого тиску стискується тільки газ, що йде на дросель. Газ, що циркулює через детандер, стискається до деякого проміжного тиску; тому витрати роботи на одиницю маси зріджуваного газу знижуються. На азоті оптимальна ефективність цієї системи досягається, коли газ стискається від 101,3 кПа до 3,5 МПа, а частка детандерного потоку становить приблизно 75 % від загальної витрати.

**4.1.2.5. Порівняння вбудованих циклів зрідження метану.** Питомі витрати енергії на зрідження метану в різних вбудованих циклах наведені в таблиці 4.2. Дані таблиці вказують, що найбільш економічним циклом для зрідження метану є каскадний цикл. Наприклад, цикл, що складається з трьох ступенів: аміачної, етиленової і метанової.

Таблиця 4.2. Витрата енергії для скраплення метану при використанні різних вбудованих циклів [12]

| Цикл глибокого охолодження                          | Витрата енергії, кВт·ч/л CH <sub>4</sub> |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|
| З однократним дроселюванням                         | 2,70                                     |
| Високого тиску з детандером                         | 1,67                                     |
| Із циркуляцією повітря високого тиску               | 1,62                                     |
| З однократним дроселюванням і аміачним охолодженням | 1,30                                     |
| З циркуляцією повітря в.д. і аміачним охолодженням  | 1,18                                     |
| Каскадний цикл                                      | 0,90                                     |

#### 4.1.3. Цикли з зовнішнім охолодженням

Особливістю використання зовнішніх циклів є зрідження практично всього обсягу надходженого природного газу. Винятком є низькокипучі домішки, що містяться в його обсязі.

Скраплення природного газу на основі зовнішнього охолодження може здійснюватися шляхом використання:

- \* Кріогенераторів Стирлінга, Вюлемье-Таконіса тощо; робочими тілами яких є, як правило, гелій або водень, що дозволяє при здійсненні замкнутого термодинамічної циклу досягати температури на стінці теплообмінника нижче температури кипіння природного газу;

- \* Кріогенних рідин з температурою кипіння нижче, ніж у природного газу, наприклад рідкого азоту, кисню та ін.;

- \* Каскадного циклу за допомогою різних холодильних агентів (пропану, аміаку, метану та ін.); при каскадному циклі скраплений більш висококипучий газ при випаровуванні створює холод, необхідний для зниження температури більш низькокипучого газу.

При промисловому виробництві ЗПГ найбільш ефективними є цикли скраплення, що працюють на вуглеводнях або азоті.

**4.1.3.1. Зовнішні цикли на азоті.** На рис. 4.9 представлений складний рефрижераторний цикл, в якому в якості робочого тіла використовується газоподібний азот. Поряд з турбокомпресором I, II, холодопродуктивність рефрижератора створюють три турбодетандера IV, VI і VII. Розширювальні машини працюють на різних температурних рівнях, що дозволяє сформулювати три ступені охолодження ПГ.

Перший турбодетандер IV розширює газ з температурою навколишнього середовища від максимального ( $P_3$ ) до проміжного тиску  $P_2$ . Цей ступінь охолодження забезпечує досягнення температурного рівня  $T_5 \approx 230...240$  К. Другий детандер VI розширює азот, попередньо охолоджений за рахунок відведення теплоти в першій секції теплообмінника V до рівня  $T_7 \approx 240$  К. Початковий тиск потоку дорівнює тиску на виході з останнього ступеня компресора  $P_3$ , після детандера тиск азоту знижується до рівня всмоктування в середню секцію компресора  $P_2$ . Температура потоку після детандера становить 110...120 К. Третій детандер VII розширює газ з

тиском  $P_3$  і температурою  $T_9 \approx 130 \dots 140$  К до рівня лінії всмоктування в першу щабель компресора Р1. Потік низького тиску направляється в теплообмінник-переохолоджувач Х, а потім в основний теплообмінник рефрижераторного циклу ІХ.

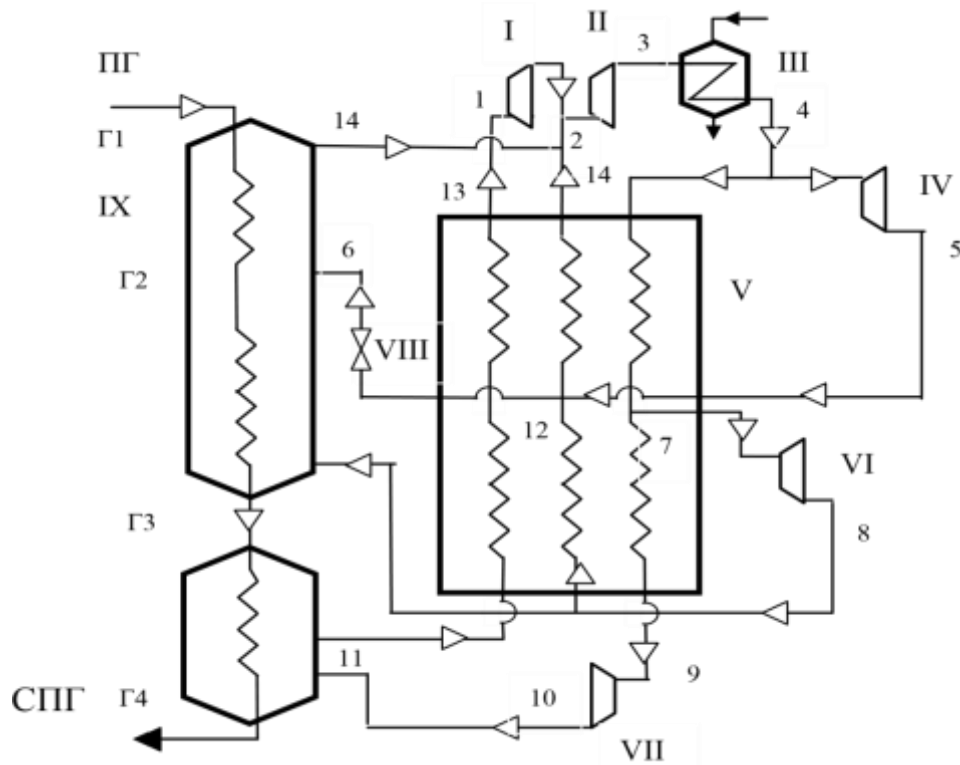


Рис 4.9. Зріджувач природного газу з рефрижератором на базі азотного детандерного циклу [16, 17]

Потік азоту після детандерів IV і VI ділиться на дві частини. Одна частина направляється в теплообмінник V для переохолодження прямого потоку азоту. Друга частина потоків газу після детандерів IV і VI направляється в теплообмінник-зріджувач ІХ. Тиск потоку азоту після детандера IV вище тиску в міжтрубному просторі теплообмінник ІХ, тому потік після детандера IV дроселюється через вентиль VIII в міжтрубний простір теплообмінника ІХ.

Незважаючи на відносну складність схеми руху матеріальних потоків в рефрижераторі, зріджувач, в якому використовується просте робоче тіло

(газоподібний азот) може бути розрахований і спроектований без проведення попередніх експериментальних досліджень.

**4.1.3.2. Дросельна система на змішаному холодоагенті.** В установках зрідження невеликої продуктивності в якості зовнішнього холодильного агента часто використовується зріджувальний природний газ. У цьому випадку застосовуються більш прості цикли: з дроселюванням, детандером, вихровою трубою та ін. Коефіцієнт зрідження становить 5...20 %, а зріджуваний газ повинен знаходитися при підвищеному тиску.

Система, представлена на рис. 4.10, була спроектована для застосування в каскадних системах авторефрижераторів. Її робота стала можливою тому, що природний газ складається з ряду компонентів, що конденсуються на різних температурних рівнях. Цей процес може бути використаний для охолодження вхідного потоку без застосування окремих охолоджуючих контурів для холодоагентів, що дозволяє для організації циркуляції газу замість окремих компресорів для кожного з потоків як у випадку звичайної каскадної системи використовувати один компресор.

Природний газ зазвичай надходить в систему при тиску 3,9...5,3 МПа. Якщо тиск потоку природного газу досить високо, допоміжний (дожимовий) компресор може і не знадобитися.

Газова суміш в охолодному циклі стискається і частково конденсується в охолоджувачі за компресором. Потік надходить в сепаратор фаз, після якого рідка фаза, збагачена пропаном, розширюється в дроселі і змішується зі зворотним газовим потоком для здійснення охолодження у першому трьохпоточному теплообміннику.

Пара з фазового сепаратора частково зріджується в трьохпоточному теплообміннику і проходить в другий сепаратор фаз, з якого рідина, збагачена етаном, розширюється в дроселі і направляється в другий трьохпоточний теплообмінник.

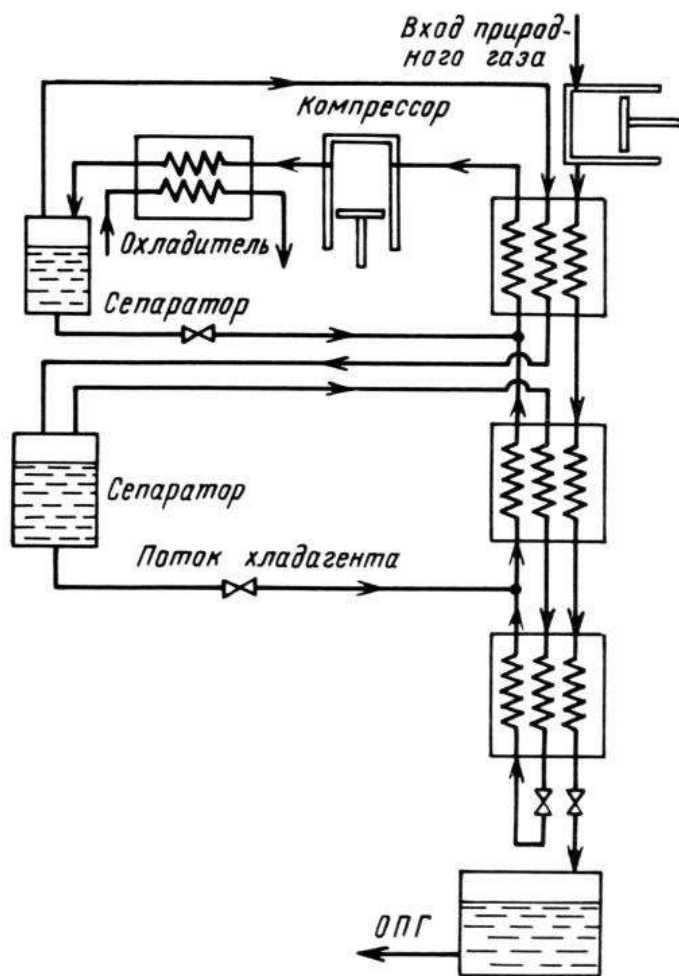


Рис. 4.10. Каскадна система на суміші, яка використовується для зрідження природного газу [10]

Пара з другого сепаратора і потік природного газу частково конденсуються в кінцевому трьохпоточному теплообміннику. У цій точці циклу потік холодоагенту в основному складається з метану; потік розширюється в дроселі і повертається в систему для охолодження основного потоку в трьохпоточному теплообміннику. Рідкий природний газ дроселюється до тиску зберігання в збірнику рідини.

#### 4.2. Схеми заводів для отримання ЗПГ

Зріджений природний газ (ЗПГ) не є революційно новим відкриттям. Це вже перевірена технологія, яка успішно використовується протягом багатьох років, в основному в електрогенеруючій промисловості.

Як правило, завод зі зрідження природного газу складається з:

- установки попереднього очищення і зрідження газу;
- технологічних ліній виробництва ЗПГ;
- резервуарів для зберігання;
- обладнання для завантаження на танкери;
- додаткових служб для забезпечення заводу електроенергією і водою для охолодження.

Перетворення природного газу в рідкий стан здійснюється в кілька етапів (рис. 4.11). Спочатку видаляються всі домішки (перш за все, двоокис вуглецю, а іноді і мінімальні залишки сполучень сірки). Потім витягується вода, яка в іншому випадку може перетворитися в крижані кристали і закупорити установку скраплення.

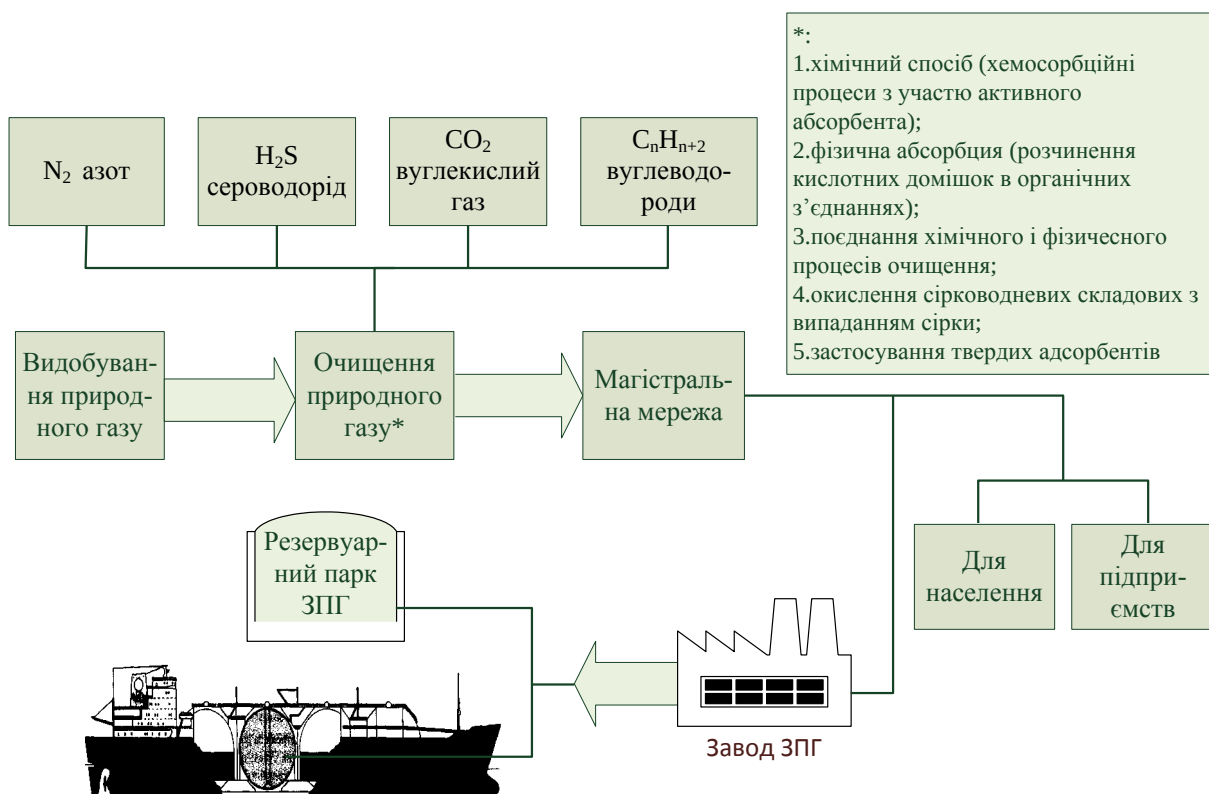


Рис. 4.11. Принципова схема виробництва ЗПГ [12]

Останнім часом для комплексної очистки газу від вологи, вуглекислого газу і важких вуглеводнів використовують адсорбційний спосіб глибокого очищення газу на молекулярних ситах.

Наступний етап - видалення більшості важких вуглеводнів, після чого залишаються головним чином метан і етан. Потім газ поступово охолоджується, зазвичай за допомогою двоциклового процесу охолодження в серії теплообмінників (випарників холодильних машин). Очищення і фракціонування реалізуються, як і основна частка охолодження, під високим тиском. Холод виробляється одним або декількома холодильними циклами, що дозволяють знизити температуру до  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тоді при атмосферному тиску природний газ стає рідиною.

У світі в різний час було використано сім різних технологій зрідження природного газу [13-16]. Однак на сьогоднішній день очевидним лідером даної галузі є компанія Air Products. Розроблені нею процеси AP-SMR<sup>™</sup>, AP-C3MR<sup>™</sup> і AP-X<sup>™</sup> складають 82 % всього ринку. Практично єдиним конкурентом даних процесів є технологія Optimized Cascade, розроблена ConocoPhillips.

AP-SMR<sup>™</sup> (single mixed refrigerant – одиночний цикл змішаного холодоагенту, рис. 4.12) технологія традиційно використовується для наземних установок зрідження природного газу, зазвичай для продуктивності до 1 млн. тон на рік на одній технологічній лінії. Для збільшення потужності установки потрібно кілька окремих ліній. Особливістю AP-SMR є використання однієї автоматичної системи, що управляє декількома газовими турбінами. Застосування сумішевого холодоагенту дозволяє знизити до мінімуму  $\Delta T$  між кривими нагрівання MR і охолодження NG, що значно підвищує ефективність процесів теплообміну.

AP-C3MR<sup>™</sup> (рис. 4.13) становить близько 81% від світових базових потужностей з виробництва ЗПГ. У цьому процесі використовуються два окремі цикли холодоагенту. Цикл пропану, який використовується для попереднього охолодження природного газу і часткового розрідження змішаного холодоагенту, а в деяких випадках і для видалення зрідженого паливного газу (ЗПГ - скидального потоку, використовуваного для потреб заводу)

застосовується цикл на пропані, в той час як цикл на змішаному холодоагенті MR використовується для скраплення і сублімації природного газу.

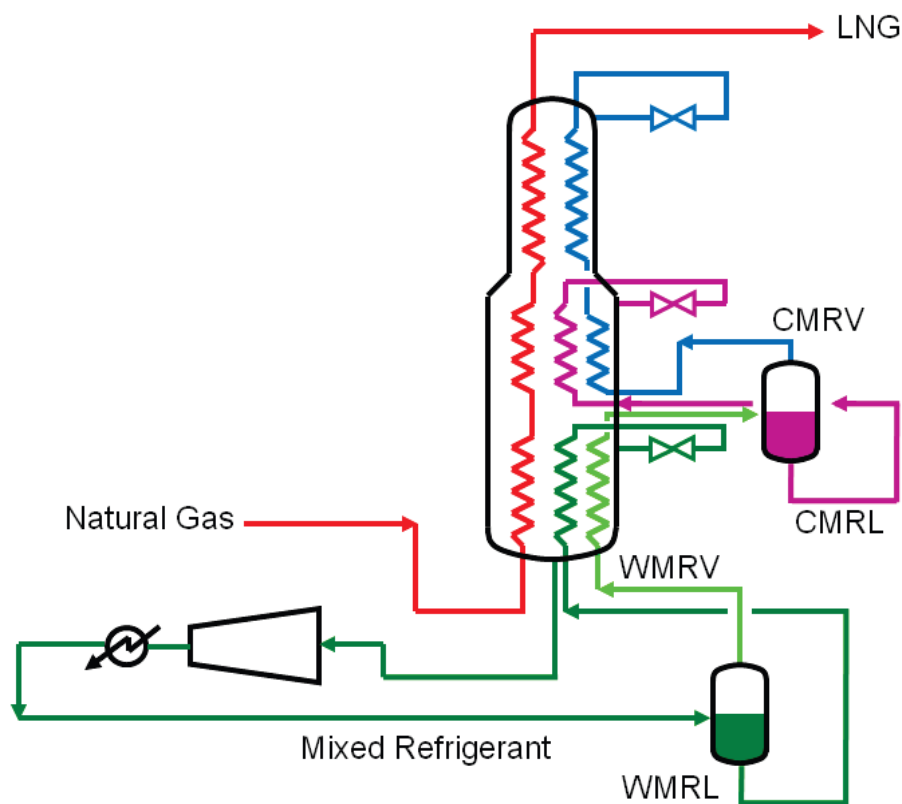


Рисунок 4.12. Схема технології AP-SMR™ [14-16]

C3MR є перевіреною технологією MR, випробуваної і перевіреної протягом десятиліть, що робить її широко прийнятої для наземних установок скраплення. Проте, для морського застосування він менш привабливий через великий запас пропану, особливо при використанні теплообмінників типу «чайника» (kettle-type). Зберігання пропану вимагає підвищеної міцності для пропанового резервуара, де зберігається це робоче тіло. Тому процес C3MR для застосування на морських терміналах володіє низькою привабливістю.

Air Products AP-N™ розробив більш ефективну форму процесу AP-X™ (який використовується в декількох технологічних лініях великої продуктивності в Катарі), де кількість розширювачів, рівнів тиску і темпе-



ратури оптимізовано (рис. 4.14). Для зрідження ПГ використовується зовнішній азотний цикл. Стиснення азотного холодоагенту здійснюється в три етапи. Це допомагає оптимізувати процес в разі коливань умов подачі.

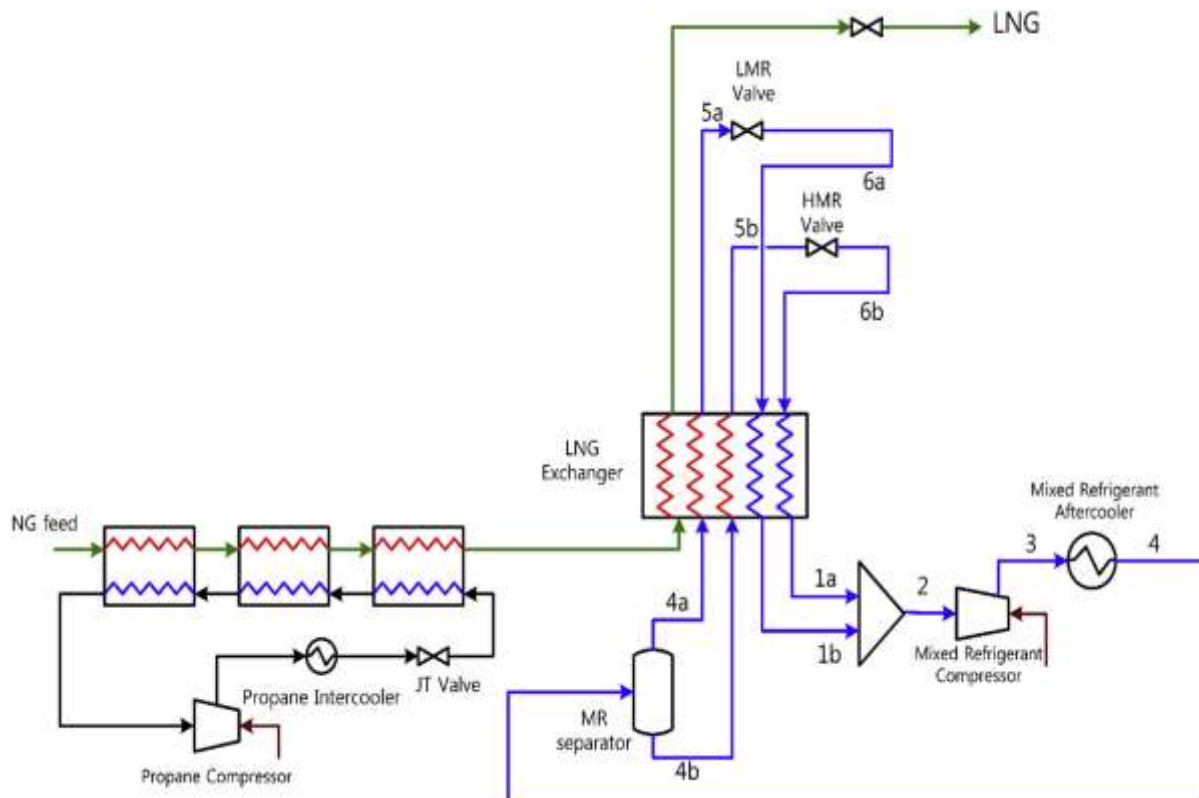


Рисунок 4.13. Схема технології C3MR [13-15]

Вищевказані технології зрідження, як правило, застосовуються для виробництва великих обсягів ЗПГ, призначеного для подальшого експорту. Разом з тим, великий потенціал розвитку мають малогабаритні установки зрідження призначені для внутрішнього використання на промислових підприємствах. Установки подібного типу можна вже зустріти в Норвегії, Фінляндії і Росії. Крім того, локальні установки виробництва ЗПГ можуть знайти широке застосування в Китаї, де сьогодні активно розвивається випуск автомобілів, що працюють на ЗПГ. Впровадження малогабаритних установок може дозволити Китаю масштабувати вже існуючу транспортну мережу ЗПГ-автомобілів.

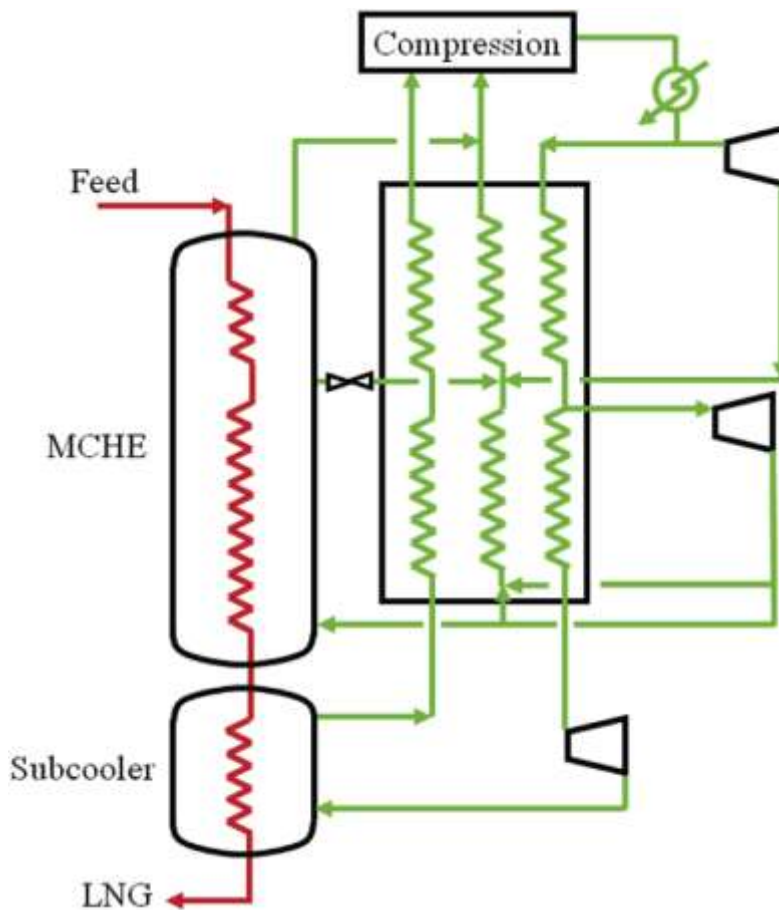


Рисунок 4.14. Схема технології AP-N [14-16]

Технологія ПАТ «Кріогенмаш» базується на дросельно-ежекторному циклі. Продуктивність зазначених установок 0,3...4 тони ЗПГ на годину на одній лінії. Цикл оптимальний для створення міні-заводів ЗПГ як альтернативи прокладанню газопроводів для забезпечення природним газом віддалених інфраструктурних об'єктів і газомоторного автотранспорту в радіусі 150...1000 км. Особливості малогабаритних установок (рис. 4.15):

- установки базуються на досить ефективному і простому холодильному циклі високого тиску зріджуваного природного газу;
- для підвищення термодинамічної ефективності зрідження застосовується зовнішнє фреонове попереднє охолодження на температурному рівні мінус 40 °С;
- для розширення газу високого тиску замість дроселя застосовуються еже-

- ктори, корисно використовують енергію тиску газу для організації циркуляційного холодильного контуру при підвищеному тиску в зворотному потоці;
- поєднання високого тиску прямого потоку з підвищеним тиском в зворотному потоці знижує втрати від незворотності в теплообміннику і питома витрата енергії на зрідження на кілограм ЗПГ;
  - триступенева сепарація двофазного потоку дозволяє ефективно відокремити і вивести з холодильного контуру легкокипучі домішки водню, гелію, азоту без втрат метану.



Рисунок 4.15. Зовнішній вигляд малотонажної установки ЗПГ, розміщеної в межах контейнера [18, 19]

Поряд зі стаціонарними системами, в останні роки активно розвиваються плаваючі установки зрідження природного газу. Плаваючі заводи відкривають доступ до газових родовищ, які недоступні для об'єктів інфраструктури (трубопроводів, морських терміналів та ін.). На сьогоднішній день

найбільш амбітним проектом у цій галузі є плаваюча платформа ЗПГ, яка будується компанією Shell в 25 км від західного берега Австралії (рис. 4.16).

Об'єкт Prelude FLNG може виробляти 3,6 млн. тонн на рік ЗПГ, 1,3 млн. т. газового конденсату і 0,4 млн. т. зрідженого нафтового газу. Об'єкт Prelude FLNG має довжину 488 м і ширину 74 м, що робить його найбільшим морським плавучим об'єктом, коли-небудь побудованих. Особливістю технології є використання в циклі попереднього охолодження сумішевого холодоагенту DMR з більш низькою, ніж у пропану, молекулярною вагою. При цьому додатково збільшується потужність блоку теплообмінників, повністю використовуючи наявну потужність газової турбіни. Гнучкість процесу DMR при роботі з використанням теплообмінників різних типів забезпечує його перевага в порівнянні з C3MR.

### **4.3. Регазифікація**

Регазифікація зрідженого природного газу – це процес перетворення ЗПГ з рідкого стану в газоподібний. Після цього природний газ стає придатним для звичайного використання: подачі по трубопроводах споживачам і закачування в газові балони.

Перетворення в газ відбувається в системі випаровування за допомогою нагріву. Підігрів може здійснюватися прямим і непрямим способом. У першому випадку газ отримує тепло безпосередньо від гарячого теплоносія, у другому - тепло надходить до газу через проміжний теплоносій, що обігрівається гарячим теплоносієм. Найбільш часто в якості гарячого теплоносія використовується морська вода, як проміжний теплоносій – пропан.

Зріджений природний газ з транспортної ємності через пристрій прийому зливається в ємність зберігання. ЗПГ через запірну арматуру подається на випарник, де перетворюється в парову фазу, а після цього підігрівається, одоризується і через газорегулювальний блок подається споживачеві. Склад



a)



б)

Рис. 4.16. а) Зовнішній вигляд заводу Prelude FLNG і  
б) його розміщення біля берегів Австралії [21]



пункту з регазифікації зрідженого природного газу (рисунки 4.17, 4.18, табл. 4.3):

- пристрій зливу ЗПГ;
- ємність зберігання ЗПГ (одиначно 8...50 м<sup>3</sup>), сумарно до 250 м<sup>3</sup>;
- теплообмінник-регазифікатор продуктивністю 50...4000 м<sup>3</sup>/год;
- підігрівач газу, електричний вибухозахищений або атмосферний;
- блок газорегулювальний;
- блок одоризації;
- система загальностанційної автоматики;
- системи пожежної, охоронної сигналізації, контролю загазованості, інші системи згідно норм ПБ, ПУЕ та норм проектування.

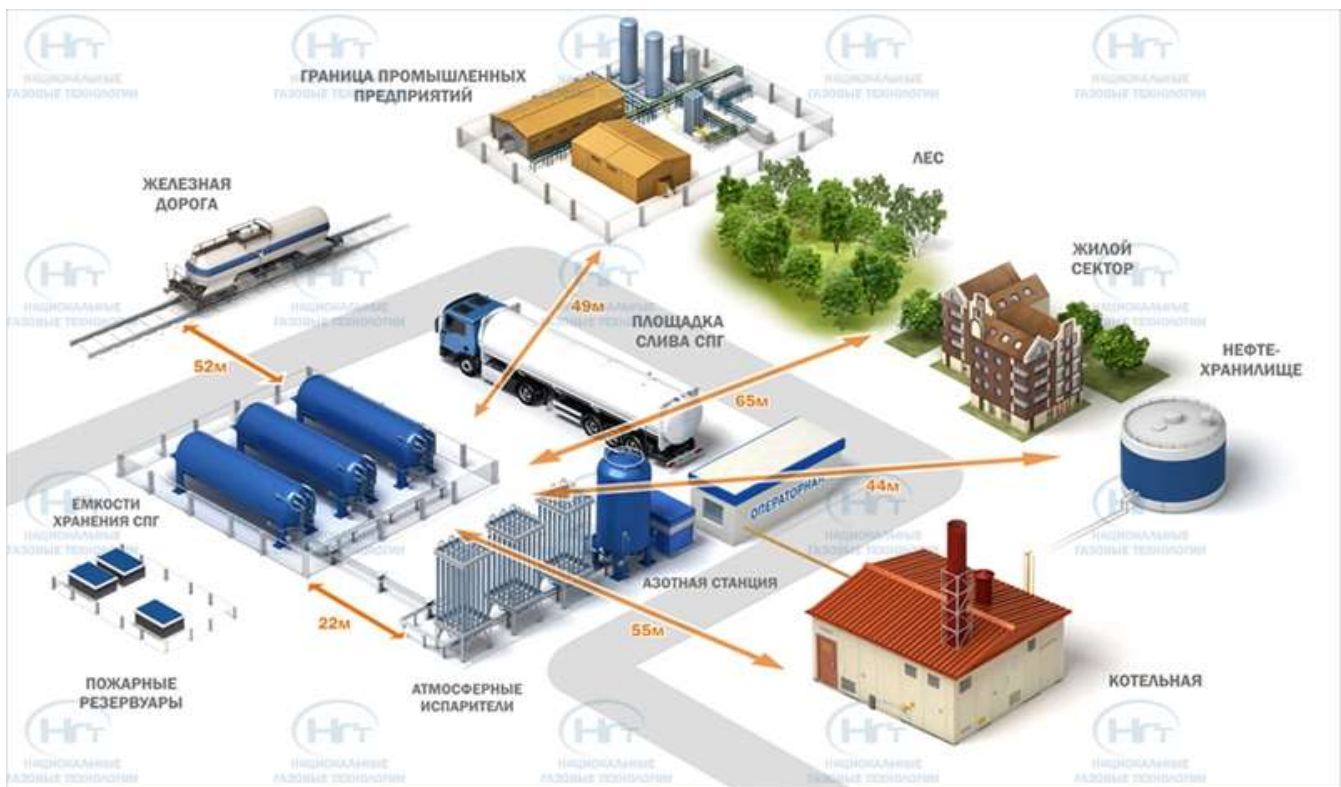


Рис. 4.17. План-схема типового майданчика регазифікації ЗПГ [5]

Так, наприклад, базові капітальні витрати на будівництво регазифікаційного танкера, який буде використовуватися в якості плавучого терміналу, складають

менше половини вартості стаціонарного берегового терміналу без урахування витрат на створення гавані та іншої інфраструктури, необхідної для його застосування.



а)



б)

Рис. 4.18. Стаціонарний (а) і мобільний (б) пункти газифікації з атмосферними випарниками

Таблиця 4.3. Визначення обсягу ємності для зберігання ЗПГ в залежності від газоспоживання об'єкта і частоти поставок [5]

| Газос-<br>пожи-<br>вання<br>об'єкту,<br>нм <sup>3</sup> /час | Трейлер<br>/день<br>1 тр. =<br>= 20 тн. | Період<br>заправ-<br>лення,<br>дні | Об'єм<br>ємкостей<br>ЗПГ, м <sup>3</sup> | Період<br>заправ-<br>лення,<br>дні | Об'єм<br>ємкос-<br>тей<br>ЗПГ,<br>м <sup>3</sup> | Період<br>заправ-<br>лення,<br>дні | Об'єм<br>ємкос-<br>тей<br>ЗПГ,<br>м <sup>3</sup> |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 200                                                          | 0,16                                    | 3                                  | 29                                       | 7                                  | 67                                               | 21                                 | 202                                              |
| 500                                                          | 0,4                                     | 3                                  | 72                                       | 7                                  | 168                                              | 21                                 | 504                                              |
| 1000                                                         | 0,8                                     | 3                                  | 144                                      | 7                                  | 336                                              | 21                                 | 1008                                             |
| 2000                                                         | 1,6                                     | 3                                  | 288                                      | 7                                  | 672                                              | 21                                 | 2016                                             |
| 5000                                                         | 4                                       | 3                                  | 720                                      | 7                                  | 1680                                             | 21                                 | 5040                                             |
| 10000                                                        | 8                                       | 3                                  | 1440                                     | 7                                  | 3360                                             | 21                                 | 10080                                            |



## ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Цикл Лінде (схема,  $T,s$ -діаграма).
2. Цикл Лінде-Хемпсона (схема,  $T,s$ -діаграма).
3. Цикл Лінде-Хемпсона з проміжним охолодженням (схема,  $T,s$ -діаграма).
4. Цикл Клода (схема,  $T,s$ -діаграма).
5. Цикл Капіці (схема,  $T,s$ -діаграма). Цикл Гейландта (схема,  $T,s$ -діаграма).
6. Регазифікації зрідженого природного газу.
7. Схема регазифікаційної установки.

8. Скласти енергетичний баланс установки і виділеного контуру (рис. 4.19). Скласти таблицю з параметрами в точках циклу Лінде-Хемпсона (тиск, температура, ентальпія і витрата) і визначити основний енергетичні показники циклу для робочої речовини – азот.

Вихідні данні:

$$T_{OC} = 300 \text{ K};$$

$$G_K = 0,01 \text{ кг/с};$$

$$P_1 = 1 \text{ атм};$$

$$P_2 = 20 \text{ МПа};$$

$$\eta_K = 0,9.$$

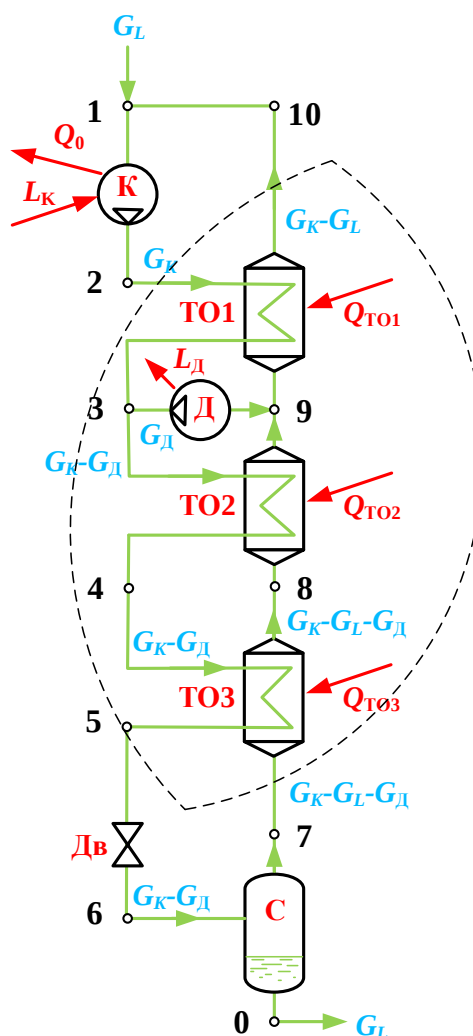


Рис. 4.19. До завдання №8

## **РОЗДІЛ 5. АПАРАТИ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ЗПГ**

### **5.1. Теплоізоляційні матеріали**

Основне призначення ізоляції – зменшувати до мінімуму підвід теплоти конвекцією, теплопровідністю залишкових газів, випромінюванням та теплопровідністю через металічні зв'язки [22-27]. На цей час використовують три основні типи ізоляції: вакуумна, вакуумно-порошкова та багатошарова екрано-вакуумна.

Теплоізоляційні матеріали, які використовуються в техніці низьких температур, можна підрозділити на волокнисті, порошкоподібні (або зернисті) і пористі (або комірчасті).

#### **5.1.1. Волокнисті матеріали**

Волокнисті матеріали використовуються в техніці низьких температур переважно для теплоізоляції апаратури установок зрідження і розділення газів. Одним з найдешевших і доступніших матеріалів цього вигляду є мінеральна (шлакова) вата. Вона складається із скловидних волокон, що отримуються з розплавів гірських порід (граніту, глини, доломіту, кварциту) або шлаків металургійних печей. Волокна мають діаметри 6...10 мкм і довжину від 3 до 20 мм.

Вату слід набивати в ізоляційний простір до максимально можливої щільності (300...400 кг/м<sup>3</sup>), з тим, щоб зменшити конвективні струми. Коефіцієнт теплопровідності мінеральної вати при середній температурі 180...190 К складає 0,03...0,04 Вт/(м К).

Волокна мінеральної вати при монтажних роботах уражують шкіру і дихальні шляхи. Цей недолік значною мірою усунений в гранульованій ваті,

що складається з грудочок розміром 10...15 мм, утворених з волокон механічним способом.

Скляна вата виготовляється двома способами: дуттєвим і способом безперервного витягування. Роздування безперервних скляних волокон потоком гарячих газів дозволяє виготовити вату з діаметром волокон до 0,5 мкм. Коефіцієнт теплопровідності скловати з діаметрами волокон близько 21 мкм при температурі 293 К рівний 0,047 Вт/(м К). Із скла-волокна виготовляють мати і смуги. Такі мати мають щільність 100...110 кг/м<sup>3</sup> і коефіцієнт теплопровідності 0,043 Вт/(м К). Високими теплоізоляційними властивостями володіє вата з ультратонкого волокна (УТВ), що отримується способом гарячого роздування. Щільність такої вати (без навантаження) 5-6 кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнт теплопровідності 0,03...0,032 Вт/(м К). Для низькотемпературної ізоляції застосовують волокно, виготовлене з безлужних стекол. Скловолоконні матеріали застосовують також для вакуумно-багатошарової ізоляції.

### **5.1.2. Порошкоподібні матеріали**

Для ізоляції судів із зрідженими газами (CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar) широко використовуються порошкоподібні матеріали. Ці матеріали мають низький коефіцієнт теплопровідності, як при атмосферному тиску, так і в умовах глибокого вакууму, що привело надалі до створення вакуумно-порошкової ізоляції.

Перліт – скловидний матеріал вулканічного походження. Основу складає двоокис кремнію. При зіткненні з водою і нагріванні перліт спучується і збільшується в об'ємі в 5...15 разів. Щільність спученого перліту вагається від 40 до 300 кг/м<sup>3</sup>, розмір перевищує 3 мм. Для ізоляції апаратів і машин низькотемпературних установок використовується спучений перлітовий порошок з щільністю при вільному насипанні 100 кг/м<sup>3</sup>. Коефіцієнт теплопро-

відності при 183 К вагається в межах 0,025...0,035 Вт/(м К). Спучений перліт дешевий, негорючий, хімічно інертний, мало гігроскопічний, характеризується низькою адсорбційною здатністю по відношенню до парів і газів.

Кремнігель є відходом виробництва суперфосфату. Це один з видів тонко дисперсного порошку двоокису кремнію (містить до 95 %  $\text{SiO}_2$ ). Щільність кремнігелю – 100...150 кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнт теплопровідності складає 0,030...0,035 Вт/(м К) при 190 К.

Найбільш ефективним з відомих в даний час теплоізоляційних порошків є аерогель кремнієвої кислоти, який володіє високою пористістю і дуже тонкою структурою. Завдяки властивостям він має коефіцієнт теплопровідності при 183 К порядку 0,015...0,016 Вт/(м К), тобто нижче за теплопровідність спокійного повітря. Насипна щільність – 60...100 кг/м<sup>3</sup>. Аерогель негорючий, дуже текучий, тобто легко заповнює всі об'єми ізоляційного простору. Недоліком цього матеріалу є необоротна зміна структури і збільшення коефіцієнта теплопровідності при попаданні в нього вологи. Для зменшення гігроскопічності аерогель спеціально обробляють парами кремнійорганічних з'єднань.

### 5.1.3. Пористі матеріали

Піноматеріали можуть бути органічного і неорганічного походження. Теплофізичні властивості ізоляційних матеріалів залежать від температури, щільності, вологості. Крім того, одна з найважливіших характеристик – теплопровідність, залежить від вигляду газу, що заповнює пори.

Найширше використовуються органічні матеріали – пінопласти, зокрема міпора. Міпора – отверділа піна сечовиноформальдегідної смоли складу: С – 33,4 %, N – 29,8 %, O – 29,9 %, H – 6,9 %. Щільність блоків з міпори – 10...20 кг/м<sup>3</sup>. Теплопровідність міпори при 183 К дорівнює 0,023 Вт/(м К). Міпора – гігроскопічний і вогнебезпечний в середовищі кисню матеріал. Для теплоізоляції установок розділення повітря і судів з

рідким киснем використовувати її не рекомендується.

Пінополістирол – пінопласт, що складається з віконць із замкнутими порами. Виготовляється у вигляді плит різними методами. Особливий інтерес представляє метод здобуття цього матеріалу з гранул безпосередньо в ізоляційному просторі. Щільність такого матеріалу –  $20\ldots 60 \text{ кг/м}^3$ . Щільність плит з полістиролу, виготовлених іншими способами –  $150\ldots 200 \text{ кг/м}^3$ , коефіцієнт теплопровідності при 293 К складає  $0,03\ldots 0,052 \text{ Вт/(м К)}$ . Пінополістирол вологостійкий, але має малу термостійкість.

Пінополіуретан – отримують в результаті складних хімічних реакцій у вигляді рідкої суміші, яка після заливки у форму і прогрівання твердне. Залежно від способу виготовлення пінополіуретан може мати щільність  $100\ldots 220 \text{ кг/м}^3$  і коефіцієнт теплопровідності  $0,047\ldots 0,057 \text{ Вт/(м К)}$  при 293 К або щільності  $30\ldots 60 \text{ кг/м}^3$  і коефіцієнт теплопровідності  $0,031 \text{ Вт/(м К)}$ . Перевагою цього матеріалу в порівнянні з іншими є можливість заповнення ізоляційного простору складної конфігурації пінополіуретаном в рідкому вигляді шляхом того, що розпиляло, що значно спрощує (без зниження якості) техніку ізоляційних робіт. Як недолік слід вказати на отруйність одного з компонентів – диізоціанату.

До неорганічних пінопластів відноситься піноскло. Піноскло комірчастий матеріал, що отримується термічною обробкою суміші порошкоподібного скла і газоутворювача. Випускається у вигляді плит і блоків щільністю  $40\ldots 100 \text{ кг/м}^3$ . Матеріал має низьке вологопоглинання і порівняно низький коефіцієнт теплопровідності –  $0,03\ldots 0,1 \text{ Вт/(м К)}$  при 293 К.

#### **5.1.4. Газонаповнена ізоляція**

Це тепла ізоляція, що працює при атмосферному тиску. Цей вид ізоляції використовується для ізолювання кріогенних об'єктів в тому випадку, якщо є вірогідність конденсації атмосферного повітря (81,8 К). Вільний

об'єм ізоляції заповнюється газом (шляхом надування), який не конденсується при цій температурі. Така ізоляція використовується в установках зрідження та розділення природного газу та інших вуглеводневих сполук. Вона використовується також в деяких сосудах для рідкого метану. Основна перевага такого виду ізоляції полягає в тому, що об'єкт не потрібно розташовувати в герметичному кожуху.

#### **5.1.5. Вакуумна ізоляція**

Забезпечується шляхом створення в ізолюючому просторі вакууму з залишковим тиском приблизно  $1,3 \cdot 10^{-2} \dots 1,3 \cdot 10^{-3}$  Па. Ізоляція такого типу дозволяє вилучити конвективний теплообмін. Основні джерела теплоприпливу – випромінювання і теплопровідність залишкових газів. Для зменшення випромінювання внутрішні поверхні ізолюючого простору полірують і роблять з матеріалів з малою мірою чорноти. Для тривалої підтримки вакууму в ізоляційний простір поміщують адсорбент (цеоліт, активоване вугілля і ін.), який поглинає гази, що виділяються з металу стінок. Вакуумна ізоляція широко використовується в невеликих лабораторних сосудах Дьюару.

Тепловий потік випромінюванням можна зменшити, якщо між теплою і холодною поверхнями встановити «плаваючий» (термічно ізольований) екран з матеріалів з високою мірою віддзеркалення.

Якщо тиск газу в ізоляційному просторі достатньо малий, то середня довжина вільного пробігу молекул газу стає більше, ніж відстань між двома поверхнями, і провідність газу значно зменшується.

#### **5.1.6. Вакуумно-порошкова ізоляція**

Створюється вакуумуванням міжстінного простору до  $13 \dots 1,3$  Па і заповненням пористим теплоізолюючим матеріалом (аерогель, перліт, суміш

аерогелю з бронзовою пудрою і ін.).

Механізм передачі теплоти через ізоляційний простір, заповнений порошкоподібним матеріалом, визначається трьома складовими: теплопровідністю газу, теплопровідністю твердих часток і випромінюванням. У діапазоні тиску приблизно від 133 і до 0,13 Па умовний коефіцієнт теплопровідності, що включає всі три види теплових потоків, залежить від тиску. При пониженні тиску нижче величини порядку 0,13 Па перенесення теплоти газом практично припиняється.

При тиску порядку 0,13 Па і нижче і при температурах обмежуючих поверхонь 300 і 80 К (і нижче) основний тепловий потік через вакуумований порошок здійснюється шляхом променистого теплообміну. Подальше зниження теплопровідності ізоляції в 2...3 рази можливо при її екрануванні за допомогою металевих порошків (бронзова або алюмінієва пудра).

При тиску близько 0,13 Па оптимальний коефіцієнт теплопровідності аерогелю, заміряний на промислових зразках цистерн, складає 0,015 Вт/(м К). Той же ізоляційний матеріал при атмосферному тиску має коефіцієнт теплопровідності в 7...10 разів вище.

Для транспортних цистерн важливо, щоб корисна доля продукту, що зберігається, була якомога більше в порівнянні із загальною масою конструкції. З цією метою необхідно при створенні цистерн прагнути до зниження маси металоконструкцій і ізоляції.

#### **5.1.7. Багатошарова ізоляція**

Багатошарові ізоляції складаються з комбінації шарів матеріалів з високою відбивною здатністю, таких, як алюмінієва фольга, мідна фольга або алюмінізований майлар, і прокладок з низькою провідністю, таких, як склопапір, скловолокно або нейлонова сітка. Шари, що відображають, можуть бути виконані у вигляді гофрованих або витиснених листів, так щоб вони стикалися між собою лише в декількох точках, і тоді прокладки не потрібні.

Таблиця 5.1. Основні характеристики теплоізоляції, застосовуваної в кріогенній техніці

| Тип ізоляції                     | Густина при<br>вказаному<br>тискові, кг/м³ | Ефективна тепло-<br>провідність,<br>Вт/(м·К) | Недоліки                                                                                                                |
|----------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Волокнисті матеріали             |                                            |                                              |                                                                                                                         |
| Мінеральна (шла-<br>кова) вата   | 300...400                                  | 0,03...0,04<br>(180...190 К)                 | При монтажних<br>роботах уражує<br>шкіру і диха-<br>льні шляхи                                                          |
| Скловата                         | 100...110                                  | 0,043 (293 К)                                |                                                                                                                         |
| Ультратонке скло-<br>волокно     | 5...6                                      | 0,03...0,032                                 |                                                                                                                         |
| Порошкоподібні матеріали         |                                            |                                              |                                                                                                                         |
| Перліт                           | 40...300                                   | 0,025...0,035<br>(183 К)                     |                                                                                                                         |
| Кремнігель                       | 100...150                                  | 0,03...0,035<br>(190 К)                      |                                                                                                                         |
| Аерогель кремніє-<br>вої кислоти | 60...100                                   | 0,015...0,016<br>(183 К)                     | Необоротна<br>зміна структури<br>і збільшення ко-<br>ефіцієнта теп-<br>лопровідності<br>при попаданні в<br>нього вологи |
| Пористі матеріали                |                                            |                                              |                                                                                                                         |
| Міпора                           | 10...20                                    | 0,023 (183 К)                                |                                                                                                                         |
| Пінополістирол                   | 150...200                                  | 0,03...0,052<br>(293 К)                      | Має малу тер-<br>мостійкість                                                                                            |
| Пінополіуритан                   | 100...220                                  | 0,047...0,057<br>(293 К)                     | Отруйність од-<br>ного з компоне-<br>нтів                                                                               |
|                                  | 30...60                                    | 0,031                                        |                                                                                                                         |



|                                                                                               |                         |                                              |                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Піноскло                                                                                      | 100...140               | 0,03...0,1 (293 K)                           |                                                                                                                                                        |
| Вакуумна теплоізоляція                                                                        |                         |                                              |                                                                                                                                                        |
| Вакуум між емніс-<br>тями з температу-<br>рою навколиш-<br>нього середовища<br>та охолодженою |                         | 0,0013...0,013 Па                            | Необхідність<br>постійного підт-<br>римання глибо-<br>кого вакууму.<br>Граничні повер-<br>хні повинні<br>мати високу ві-<br>дображувальну<br>здатність |
| Вакуумно-порошкова теплоізоляція                                                              |                         |                                              |                                                                                                                                                        |
|                                                                                               | 0,015<br>(300→80 K)     | 1,3...133 Па                                 | При вакууму-<br>ванні необхідні<br>спеціальні філь-<br>три. Може згу-<br>щуватися при<br>вібраціях та<br>термоциклу-<br>ванні                          |
| Тип ізоляції                                                                                  | Густина<br>шару, шар/см | Ефективна тепло-<br>провідність,<br>Вт/(м·К) | Недоліки                                                                                                                                               |
| Багатошарова ізоляція                                                                         |                         |                                              |                                                                                                                                                        |
| Алюмінієва фольга<br>(0,006) + склопапір<br>(0,15 мм)                                         | 20                      | 0,037                                        | Висока вартість<br>на одиницю<br>об'єму. Важко<br>ізолювати пове-<br>рхні складної<br>форми. Про-<br>блеми повздов-<br>жньої теплопро-                 |
| Алюмінієва фольга<br>(0,006) + сітка<br>штучна (2 мм)                                         | 10                      | 0,078                                        |                                                                                                                                                        |
| Алюмінієва фольга                                                                             | 11                      | 0,034                                        |                                                                                                                                                        |

|                                                                |    |       |                                                                      |
|----------------------------------------------------------------|----|-------|----------------------------------------------------------------------|
| (0,006) + нейлонова сітка (2 мм)                               |    |       | відності. Потрібен більш глибокий вакуум ніж для порошкових ізоляцій |
| Гофрована сітка алюмінізованого майлара товщиною 0,006 мм.     | 35 | 0,042 |                                                                      |
| Алюмінієва фольга (0,0087 мм) + склопапір з нитками із вуглецю | 30 | 0,014 |                                                                      |

## 5.2. Ізотермічні ємності для зберігання ЗПГ [20, 28-33]

Під ізотермічним способом зберігання ЗПГ слід розуміти спосіб його зберігання в резервуарах при постійно підтримуваному незначному надлишковому тиску, близькому до атмосферного –  $4,9 \times 10^3$ ;  $6,8 \times 10^3$  Па (500; 700 мм вод. ст.), і відповідною цьому тиску температурі кипіння.

Кількість резервованого для зберігання ЗПГ в резервуарах ізотермічного сховища комплексу у кожному конкретному випадку визначається проектом на стадії техніко-економічного обґрунтування, залежно від функціонального призначення комплексу ЗПГ, конкретної структури і видів вжитку ЗПГ, але рекомендується не більш, ніж 30-ти добовий запас. При організації виробництва ЗПГ на двох і більш незалежних технологічних лініях число доби, що резервується для зберігання ЗПГ, може бути пропорційно знижене до 15 і менше діб.

### 5.2.1. Резервуари для зберігання ЗПГ на суші

Для цього призначені вертикальні циліндричні ізотермічні резервуари, які класифікують по наступних ознаках:

- по конструктивному виконанню стінок резервуару – одностінні, двостінні, з внутрішньою мембраною;
- по конструктивному виконанню внутрішнього даху – самонесучий і підвісний;
- по типу ізоляції – екранна, пориста, засипна, жорстка;
- по вживаному матеріалу – металеві, залізобетонні, комбіновані.

Сховища ЗПГ можуть бути укомплектовані резервуарами наступних основних типів:

- двостінні металеві, з внутрішньою самонесучою ємністю з холодостійкої сталі і зовнішньою (герметизуючою) ємністю з вуглецевої сталі;
- двостінні комбінованого типу, з внутрішньою ємністю з самонесучої холодостійкої сталі і зовнішньою ємністю (циліндровим "стаканом") із залізобетону;
- одностінні комбінованого типу, з внутрішньою герметизуючою тонколистовою гофрованою оболонкою з холодостійкої сталі і зовнішньою, такою, що несе гідростатичне навантаження, ємністю (циліндровим "стаканом") із залізобетону;
- двостінні з внутрішньою ємністю (циліндровим "стаканом") із заздалегідь напруженого залізобетону, з додатковим її облицюванням (при необхідності) тонколистовою холодостійкою або вуглецевою сталлю, і зовнішньою ємністю (циліндровим "стаканом") із звичайного або заздалегідь напруженого залізобетону, з додатковим її облицюванням (при необхідності) тонколистовою вуглецевою сталлю.

Залежно від розташування резервуарів відносно поверхні материкового ґрунту, сховища ЗПГ можуть бути:

- підземними (заглибленими в ґрунт відносно донної поверхні в межах циліндрової частини або на певну її висоту, з додатковим обсипанням незаглибленої циліндрової частини ґрунтом) - якщо найвищий рівень рідини в резервуарі нижче за саму низьку планувальну відмітку прилеглої території не менше, чим на 0,2 м;

- надземними – на паліях або іншій підставі, що забезпечує природну вентиляцію простору між поверхнею ґрунту і донною опорною плитою резервуару.

### 5.2.2. Підземні і надземні резервуари для зберігання ЗПГ (рис. 5.1, 5.2)

Обидва види резервуарів мають високий рівень фактичної безпеки. Підземні резервуари зберігання ЗПГ, безумовно, мають деякі переваги з точки зору охорони довкілля. Такі резервуари зберігання визнані відповідними європейському стандарту EN 1473, і вважаються найбільш безпечним способом зберігання ЗПГ. При землетрусах підземні резервуари зберігання менше страждають від зсуву ґрунту, чим надземні споруди, через що в сейсмонебезпечних зонах підземні резервуари безпечніші.

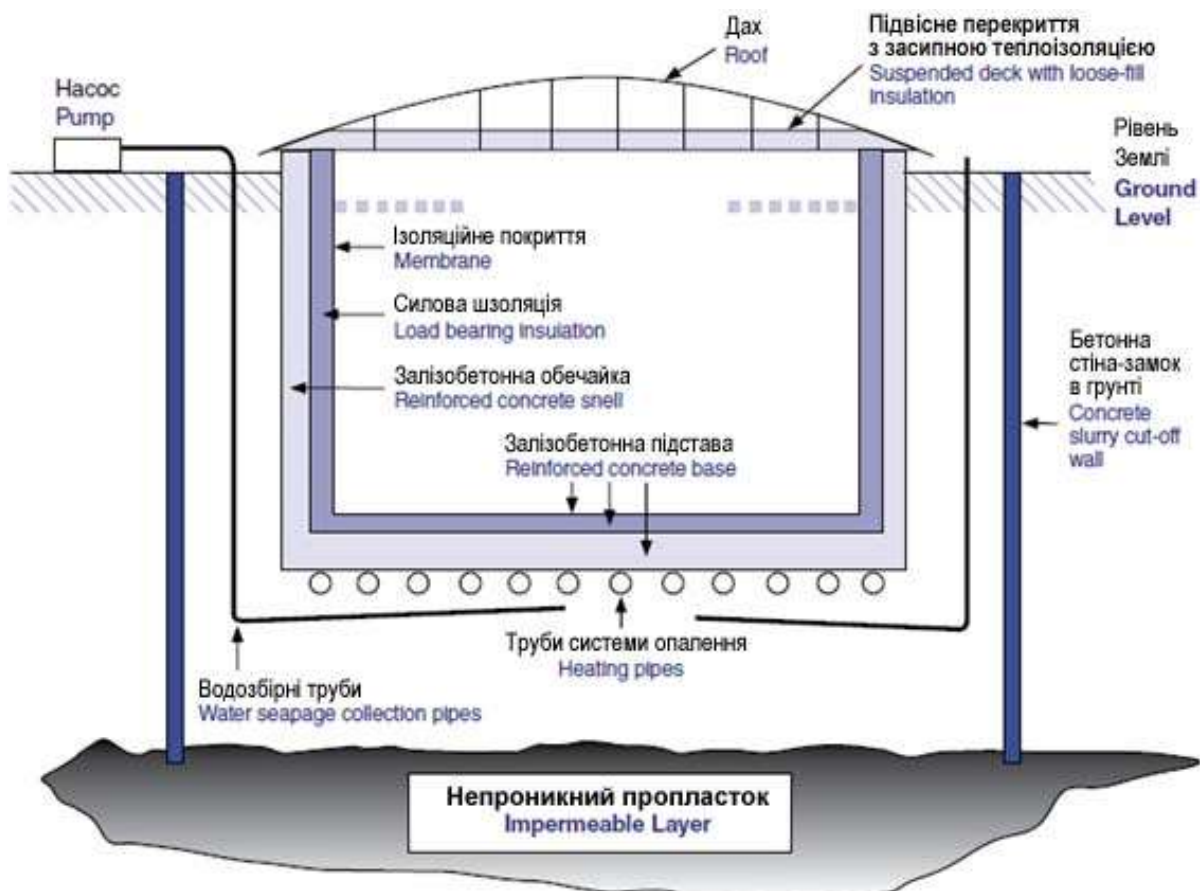


Рис. 5.1. Схематичне зображення конструкції типового підземного резервуару зберігання ЗПГ

Проте, витрати на будівництво підземних резервуарів за певних геологічних умов можуть бути досить високими. З цієї причини, а також на підставі оцінки ризику стосовно місця розташування тих або інших резервуарних парків ЗПГ, більшість резервуарів виконуються надземними. За умови, що при будівництві таких резервуарів використовуються належні матеріали і передбачаються споруди для локалізації розливів ЗПГ, наприклад, греблі обвалування, вони сповна можуть ефективно і безпечно експлуатуватися без серйозних наслідків для безпеки і екології, і, навіть в разі спроб здійснення терористичних актів.

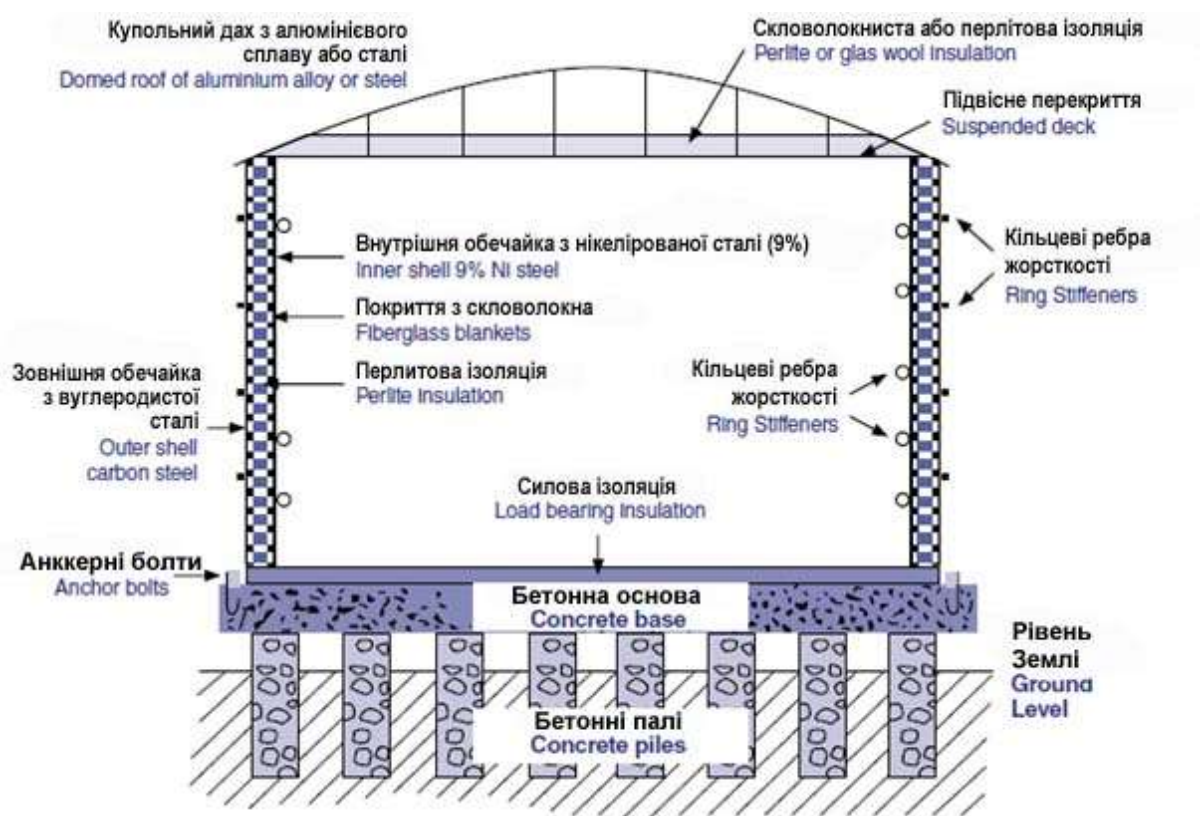


Рис. 5.2. Схематичне зображення конструкції типового надземного резервуару зберігання ЗПГ. Насоси, вимірювальне обладнання, трубна обв'язка, оглядові люки, захист від гідроудару та дефлектори не показані

Резервуари для зберігання зрідженого природного газу виконуються з подвійними стінками: зовнішня стінка призначена для затримки пари ЗПГ,

а довкола внутрішньої стінки є система ізоляції, що містить криогенну рідину. Резервуари виконуються з металів або сплавів з низьким коефіцієнтом теплового розширення, які не холодноламкі при зіткненні з криогенними плинними середовищами (тобто, з алюмінію або сталі з вмістом нікелю не менш, ніж 9 %). Довкола сучасних резервуарів влаштовуються насипи, берми, греблі або обвалування, розраховані на прийом витоків будь-якого об'єму, а саме до 110 % від об'єму відповідного резервуару.

### **5.2.3. Конструкції дахів резервуарів для зберігання ЗПГ (рис. 5.3) [15]**

У зарубіжній практиці найбільшого поширення набули конструкції дахів, що збираються, і зварювані з окремих елементів на днищі резервуару з подальшим пневмопідйомом в проектне положення. У конструкції з внутрішнім самонесучим дахом надлишковий тиск газу сприймається внутрішнім резервуаром. У міжстінний простір подається інертний газ, наприклад, азот, який сушить теплоізоляцію в процесі експлуатації. Для зберігання азоту використовують спеціальний газгольдер.

У світовій практиці також широко поширена конструкція підвісного плоского даху. Принципова відмінність такої конструкції від конструкції з внутрішнім самонесучим дахом полягає в тому, що пари продукту вільно проникають в міжстінний простір через зазор між дахом і стінкою або через спеціальні отвори в підвісному даху.

Різновидом наземних ізотермічних резервуарів є металеві вертикальні циліндричні резервуари, заглиблені в ґрунт, зазвичай на висоту корпусу (це робиться з міркувань безпеки, для того, щоб максимальний рівень заливу продукту не перевищував рівня поверхні землі, рисунки 5.4, 5.5).

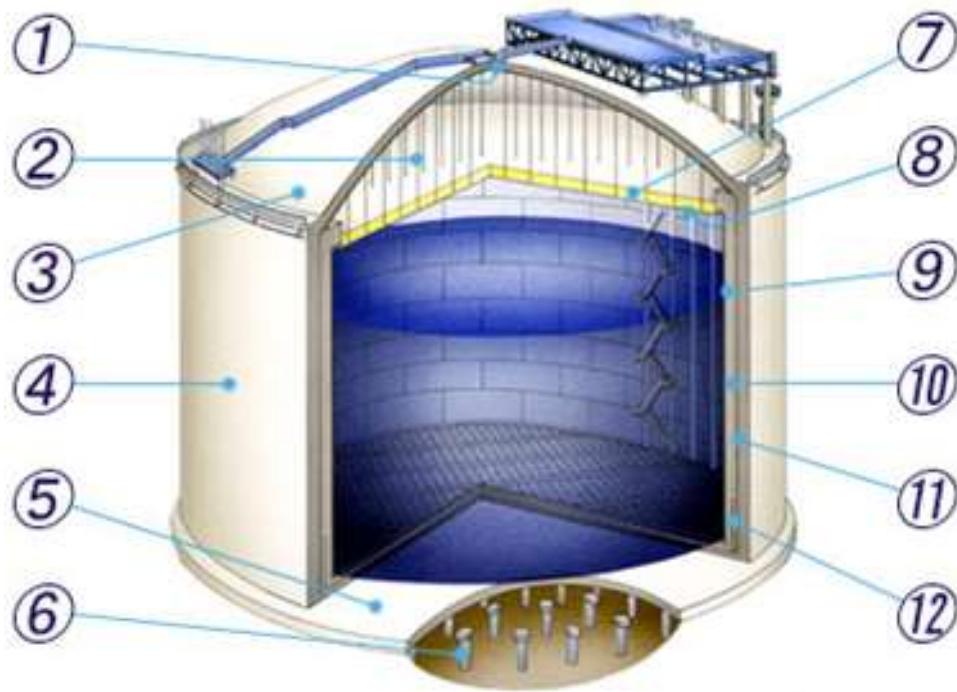


Рис. 5.3. Конструкція широко вживаного в світі залізобетонного резервуару із замкнутою зовнішньою оболонкою:

1 – підкладка даху; 2 – підвіска; 3 – залізобетонний дах; 4 – бічна стінка з портландцементу; 5 – залізобетонна стіна підставки; 6 – залізобетонні палі; 7 – ізоляція даху; 8 – підвісна платформа; 9 – внутрішній корпус; 10 – теплоізоляція стінки резервуара; 11 – підкладка; 12 – вторинна перегородка

Розрізняють двох типів конструкції заглиблених ізотермічних резервуарів: з підвісною платформою і з дахом (рис. 5.4), що має внутрішню ізоляцію (рис. 5.5). Заглиблені резервуари принципово не відрізняються від наземних резервуарів відкритої установки, але із-за необхідності проведення складних і трудомістких земляних робіт, налаштування спеціальних фундаментів з дренажем і гідроізоляцією дорожчі, хоча в той же час надійніші, особливо в районах з підвищеною сейсмічністю. Заглиблені резервуари не потребують обвалування. Обов'язковий простір між резервуарами і об'єктами забезпечення відносно невеликий; це дозволяє зберегти місце.

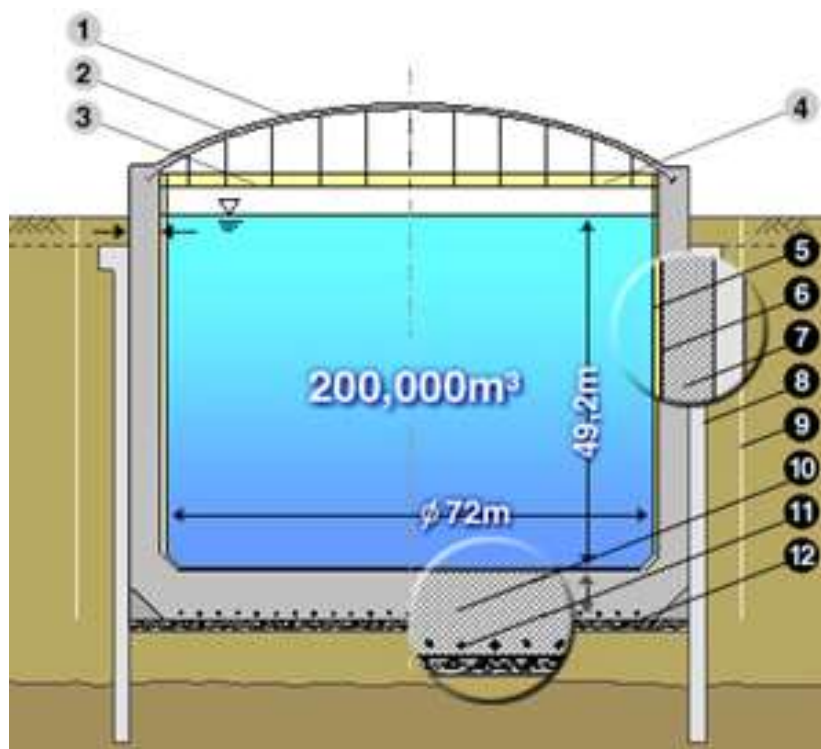


Рис. 5.4. Схема конструкції заглибленого ізотермічного резервуару:

- 1 – залізобетонний дах; 2 – сталевий дах; 3 – підвісна платформа;
- 4 – теплоізоляція із скловати; 5 – тверда поліуретанова ізоляція, що не містить фреону; 6 – мембрана з неіржавіючої сталі, що містить 18 % Cr і 8 % Ni; 7 – залізобетонна стінка; 8 – залізобетонна шпунтова стінка;
- 9 – бічний підігрівач; 10 – залізобетонне дно; 11 – підігрівач підстави;
- 12 – підстава з гравію

З точки зору безпеки резервуари ЗПГ з подвійною стінкою, внутрішній резервуар яких виготовлений із сталі з вмістом нікелю  $> 9$  (рис.5.6) – це ефективне, а також довговічне економічне рішення. Конструкція резервуарів забезпечує підтримку ЗПГ в холодному стані. Розрахункова температура зберігання складає  $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Зовнішнім резервуаром є бетонна споруда, що складається із залізобетонної фундаментної плити, стінки з перенапруженого бетону і залізобетонного даху. Бетонний резервуар додатково фанерований зсередини вуглецевою сталлю, для того, щоб була можливість збору рідини в разі протікання. Нижня частина облицювання може бути виконана із сталі з 9 %-им вмістом



нікелю (з міркувань безпеки). Теплоізоляційний шар між внутрішньою і зовнішньою стінкою запобігає температурній компенсації.

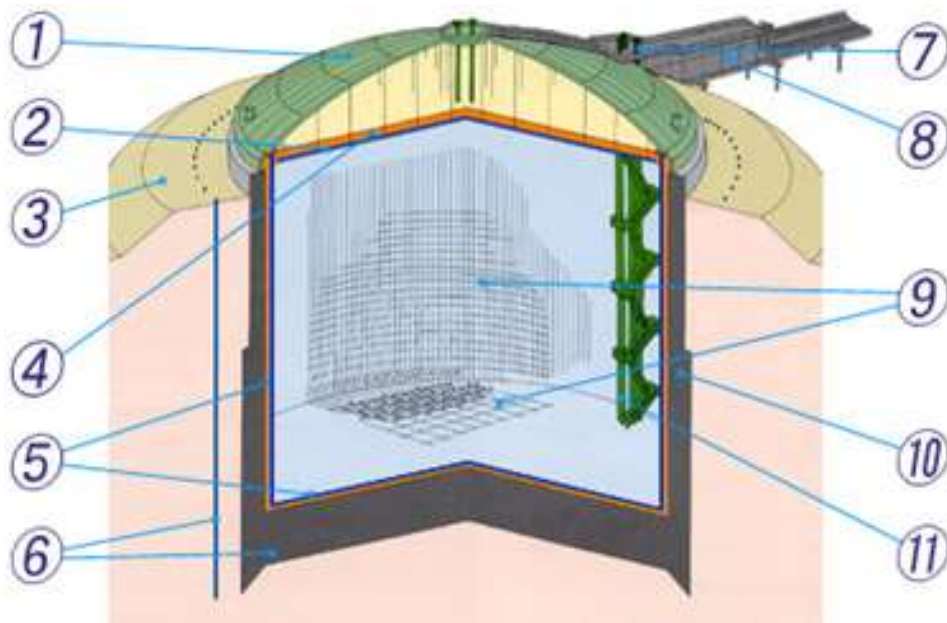


Рис. 5.5. Заглиблений резервуар з підвісною платформою:

1 – купольний дах; 2 – підвісна платформа; 3 – берма (горизонтальний майданчик на ухилі); 4 – ізоляція на підвісній платформі; 5 – ізоляція стінки і днища; 6 – підігрівач; 7 – насосний майданчик; 8 – трубопровідне обв'язування і естакада; 9 – мембрана; 10 – стінка і підстава; 11 – каркас поршневого насоса

#### 5.2.4. Заглиблення резервуарів до ґрунту (табл. 5.1, рис. 5.7)

Заглиблювати до ґрунту або обсипати ґрунтом можна лише резервуари, що мають зовнішній корпус (циліндровий "стакан") із залізобетону.

Обсипання резервуарів повинне виконуватися мінеральним (нерозпученим) однорідним ґрунтом, з пошаровим його ущільненням через кожний метр висоти. Кільцевий майданчик, що примикає до стіни резервуару, і скат насипу повинні мати вимощення з системою направленої дренажу атмосферних опадів або інші пристрої і засоби, що забезпечують захист ґрунту насипу від розмиву і атмосферної ерозії.

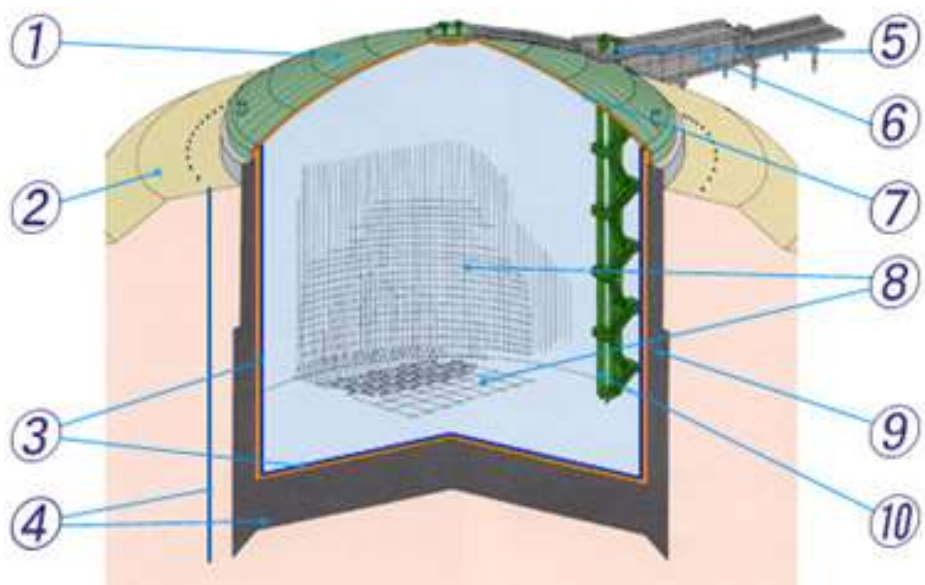


Рис. 5.6. Заглиблений резервуар з дахом, що має внутрішню ізоляцію:

1 – купольний дах; 2 – берма (горизонтальний майданчик на схилі); 3 – ізоляція стінки і днища; 4 – підігрівач; 5 – насосний майданчик; 6 – трубопровідне обв'язування і естакада; 7 – ізоляція даху; 8 – мембрана; 9 – стінка і підстава; 10 – каркас поршневого насоса

На верхньому кільцевому майданчику (по периметру резервуару) і по скату насипу має бути влаштована дорога шириною 3,5 м, з вдосконаленим покриттям полегшеного типу.

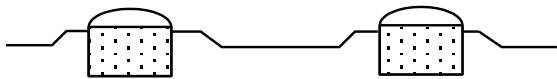
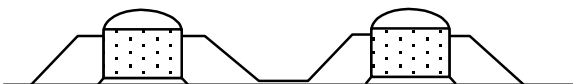
У зоні зберігання, окрім ізотермічних резервуарів ЗПГ, допускається розміщувати технологічне устаткування, безпосередньо пов'язане з резервуарами ЗПГ, що забезпечує їх безпечну експлуатацію:

- ємності для зберігання зрідженого азоту;
- системи, пристрої і засоби протипожежного захисту;
- насоси для відкачування розлитого ЗПГ і атмосферних опадів і т.п.

Надземний ізотермічний резервуар, що стоїть окремо, або група резервуарів повинні мати захисне обгороджування, що запобігає розтіканню ЗПГ на великих площах при його аварійних розливах з резервуарів.

Надземні однотипні резервуари об'ємом до 600 м<sup>3</sup>, що входять до складу ізотермічного сховища ЗПГ, можуть розміщуватися групою, в один ряд, загалом захисному обгороджуванні із загальною ємкістю резервуарів в групі не більше 2000 м<sup>3</sup>. Відстань між стінками резервуарів має бути не менше діаметру більшого з наявних в групі резервуарів, висота загального захисного обгородження приймається, виходячи з розрахунку сумарної місткості ЗПГ.

Таблиця 5.1 – Мінімальні відстані між однотипними ізотермічними резервуарами ЗПГ

| Тип резервуару | Схема розташування                                                                                                     | Геометричний об'єм резервуарів, тис. м <sup>3</sup> |    |    |    |    |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----|----|----|----|
|                |                                                                                                                        | 2                                                   | 5  | 10 | 30 | 60 |
| Підземні       |                                    | 20                                                  | 25 | 30 | 45 | 60 |
|                |                                    | 45                                                  | 55 | 65 | 75 | 80 |
| Надземні       | а) з низькою захисною огорожею<br> | 25                                                  | 35 | 50 | 80 | 12 |
|                | б) з кільцевою огорожею<br>        | 30                                                  | 35 | 45 | 60 | 80 |

Конструкції і матеріали захисних обгороджувань мають бути розраховані:

- на криогенну, гідростатичну і гідравлічну дію ЗПГ (тепловий і гідравлічний удар при швидкоплинному розливі);

- на теплову дію від того, що горить в межах обгороджування розлитого ЗПГ, із збереженням конструктивної стійкості обгородження (функціональної надійності) протягом часу повного вигорання розрахункового об'єму розливу ЗПГ, але не менше 3 годин;
- на зовнішні кліматологічні і інші особливо обумовлені в проекті дії.

Захисні обгородження можуть виконуватися у вигляді:

- залізобетонної стінки, як правило, прямокутної форми в плані, з одно- або двостороннім обсіпанням ущільненим ґрунтом (або у вигляді подвійної залізобетонної стінки із засипкою проміжку ущільненим ґрунтом), шириною по верху не менше 1-го м і висотою не менше 1,5 м, але не більше 3,5 м, що допускає організацію проїзду через верх обгородження техніки для обслуговування;
- кільцевої або прямокутної (у плані) залізобетонної стінки на власній підставі, не пов'язаній з фундаментом резервуару, що виключає організацію проїзду через верх обгороджування техніки.

Висота захисного обгородження і відстань від його внутрішньої підшви до стінки резервуару мають бути визначені проектом з умови виключення переливання ЗПГ за межі обгородження (включаючи випадки витікання ЗПГ з пробойн в корпусі резервуару у вигляді напірного струменя при його максимальному розрахунковому заповненні) але, при цьому, висота захисного обгороджування має бути не менше, ніж на 0,3 м більше висоти рівня рідини, розрахункового об'єму ЗПГ, що утворюється при повному виливанні з сховища.

Кільцеве захисне обгородження слід розташовувати в безпосередній близькості від резервуару на відстані не більш за радіус від його бічної поверхні.

Конструкції захисних обгороджувальних, що використовують композиції ґрунту і залізобетону, повинні унеможливлувати розмиву обгородження зливовими водами.



а)



б)

Рис. 5.7. Зовнішній вигляд ЗПГ резервуарів вертикального типу

З метою зниження випаровуваності ЗПГ при його аварійному розливі з надземного резервуару, поверхня ґрунту, що обмежується кільцевим обгородженням, а також внутрішня поверхня обгородження мають бути покриті шаром негорючою і непроникною для ЗПГ теплоізоляції завтовшки 50 або 70 мм з необхідними засобами її гідрозахисту.

#### **5.2.5. Резервуари для перевезення зріджених газів (рисунки 5.8, 5.9) [32]**

Зріджені промислові гази транспортують у спеціальних герметичних резервуарах, які виконані зі стійких до цих газів матеріалів з надійною тепловою ізоляцією. Горизонтальні резервуари складаються з двох концентрично розташованих ємностей (рис. 5.8, б). Внутрішній резервуар заповнюється зрідженим газом. Між внутрішнім та зовнішнім сосудами розташована теплова ізоляція.

В залежності від умов використання транспортні ємності розділяють на:

- лабораторні сосуди ємністю від 0,5 до 200 л.;
- сосуди, призначені для перевезення зрідженого газу на невеликі відстані та для короткочасного зберігання невеликої кількості рідини – від 200 до 10 000 л;
- цистерни для транспортування зріджених газів на значні відстані ємністю від 10 000 л;
- спеціальні судна – танкери для перевезення зрідженого газу водним шляхом.

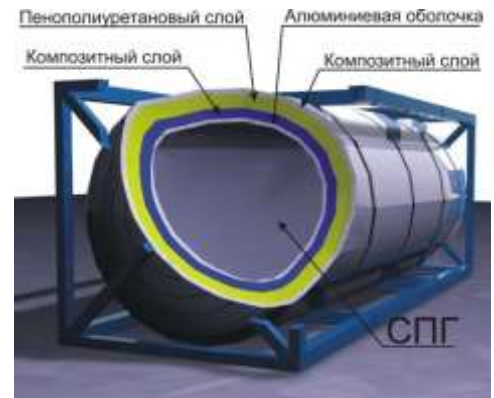
Усі транспортні резервуари, окрім лабораторних, оснащені трубами для заповнення-спорожнення, трубопроводами для скидання парів, що утворюються у наслідок випарювання рідни, запірної арматури, контрольно-вимірювальних приладів та запобіжниками на випадок підвищення тиску у внутрішньому сосуді або ізоляційному просторі.

Принципова схема для резервуара ємністю від 10 000 л показана на рис. 5.8, в.

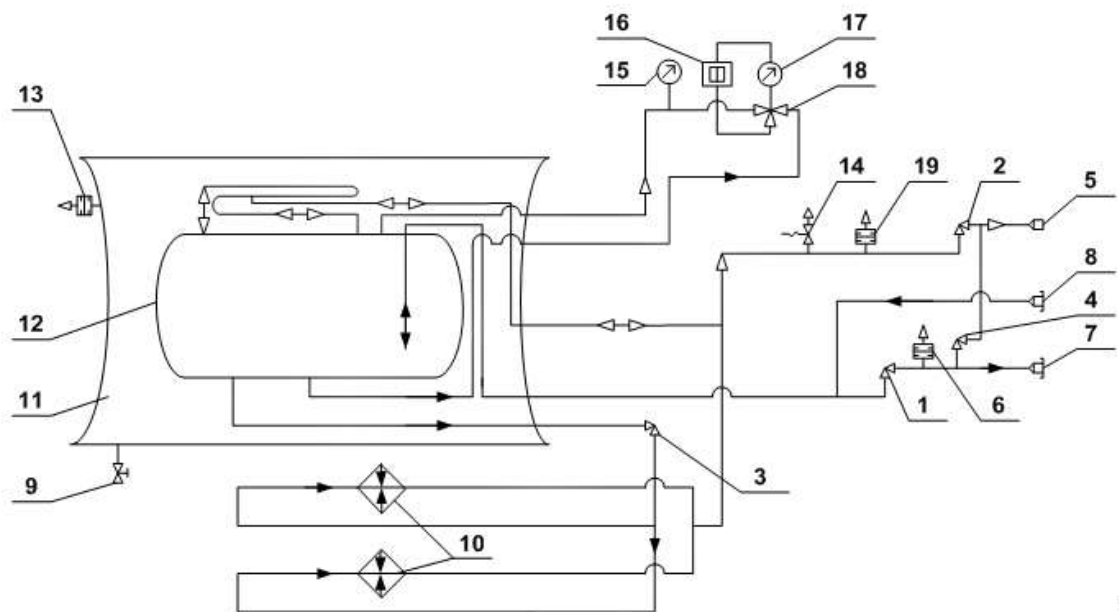




а)



б)



в)

Рис. 5.8. Зовнішній вигляд (а, б) та принципова схема цистерни ЦТК-1,6/0,25 (в) для транспортування ЗПГ автомобільним транспортом [17, 18]: 1 – вентиль заповнення-спорожнення; 2 – вентиль скидання газу; 3 – вентиль випарника для підняття тиску; 4 – вентиль спорожнення шлангу; 5 – штуцер для скидання газу; 6 – мембрана шлангу запобіжника; 7 – гайка РОТ; 8 – штуцер заповнення від АКДС; 9 – вентиль вакуумний сильфонний; 10 – випарник для підняття тиску; 11 – зовнішній кожух; 12 – внутрішня ємність; 13 – мембрана кожуха запобіжна; 14 – клапан цистерни запобіжний; 15 – манометр; 16 – балон-компенсатор; 17 – показчик рівня рідини; 18 – вентиль триходовий; 19 – мембрана цистерни запобіжна

В залежності від ємності резервуари можуть бути встановлені в кузові грузової машини, змонтовані на шасі, причепі або напівпричепі.

Резервуари можуть бути різноманітної форми:

- циліндричної – горизонтальні (рис. 5.8, а) і вертикальні (рис. 5.8, б);
- конічної;
- сферичної (рис. 5.9, в);
- комбінованої.

Найбільш зручними для транспортування є циліндричні резервуари, хоча втрати при випаровуванні найменші у сферичних ємностей.

Внутрішній посуд зазвичай виготовляють з нержавіючої сталі, титану, алюмінію або міді в залежності від типу рідини, зовнішній кожух – з вуглецевої сталі.

Транспортні резервуари для ЗПГ можуть мати ізоляцію з волокнистих матеріалів. Але найбільш перспективною є вакуумно-порошкова ізоляція.

Транспортний резервуар має систему опорних елементів, які втримують внутрішній посуд в підвішеному стані. Зазвичай це стержні, троси, трубчаті елементи або цепи, які кріпляться шарнірно до внутрішнього посуду та кожуху. Опірні елементи є тепловими мостами, по яких йде притік тепла від навколишнього середовища, тому їх виготовляють з матеріалів, які мають низьке значення коефіцієнту теплопровідності та достатньо великої довжини.

Стержні та цепи зазвичай виконують з нержавіючої сталі, опори – з неметалевих матеріалів: текстоліту, стеклотекстоліту або стекловолоконного пластику, які мають високу міцність. Недоліком матеріалу опор є велике газовиділення в умовах вакууму.

Конструкції трубопроводів обв'язки резервуару мають відповідати тим же вимогам – зменшувати притік тепла до внутрішнього резервуару. Тому трубопроводи повинні мати мінімальну площу поперечного перерізу при зберіганні необхідної міцності.





а)



б)



в)

Рис. 5.9. Зовнішній вигляд ізотермічних резервуарів:

а) резервуар горизонтальний циліндричний; б) резервуар вертикальний циліндричний; в) резервуар сферичний

Трубопроводи розташовують всередині ізоляції. Усі трубопроводи розміщують таким чином, щоб газ, який утворюється в наслідок теплоприливів, витісняв рідину у внутрішній посуд. Для збільшення шляху теплового потоку, а також компенсації теплової усадки доцільно використовувати сифони.

### 5.2.6. Транспортування ЗПГ морськими танкерами [34-39]

Перші танкери для транспортування ЗПГ з'явилися на початку ХХ століття. В 1914 р. Г. Кабот вперше запатентував баржу для транспортування зрідженого газу.

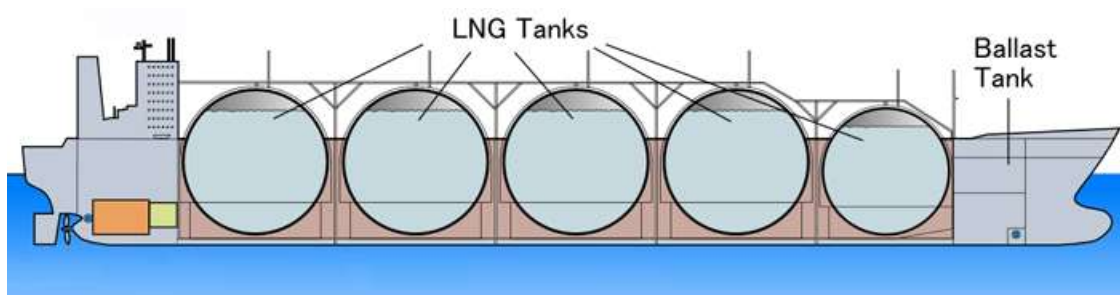
На сьогодні для цієї мети використовуються танкери, які були спроектовані в кінці 50-их років минулого століття. Наприклад, в 1959 р. перший в світі танкер-метановоз «Метан Піонер» – переобладнане вантажне судно з ємністю 5000 м<sup>3</sup> ЗПГ, курсував між Лейк-Чарльзом та Великобританією. Воно мало п'ять алюмінієвих призматичних ємностей на 7000 барелів кожна; основа під кожен ємність була зроблена з дерева, ізоляція була виконана з фанери та поліуретану.

В 1997 г. – флот ЗПГ-танкерів складав 100 судів. За 50 років було побудовано більш, ніж 170 танкерів.

Танкери для транспортування ЗПГ бувають трьох типів. Вони відрізняються конструкцією ємностей для зберігання ЗПГ, які можуть бути сферичними (рис. 5.10), мембранними (рис. 5.11) та призматичними.

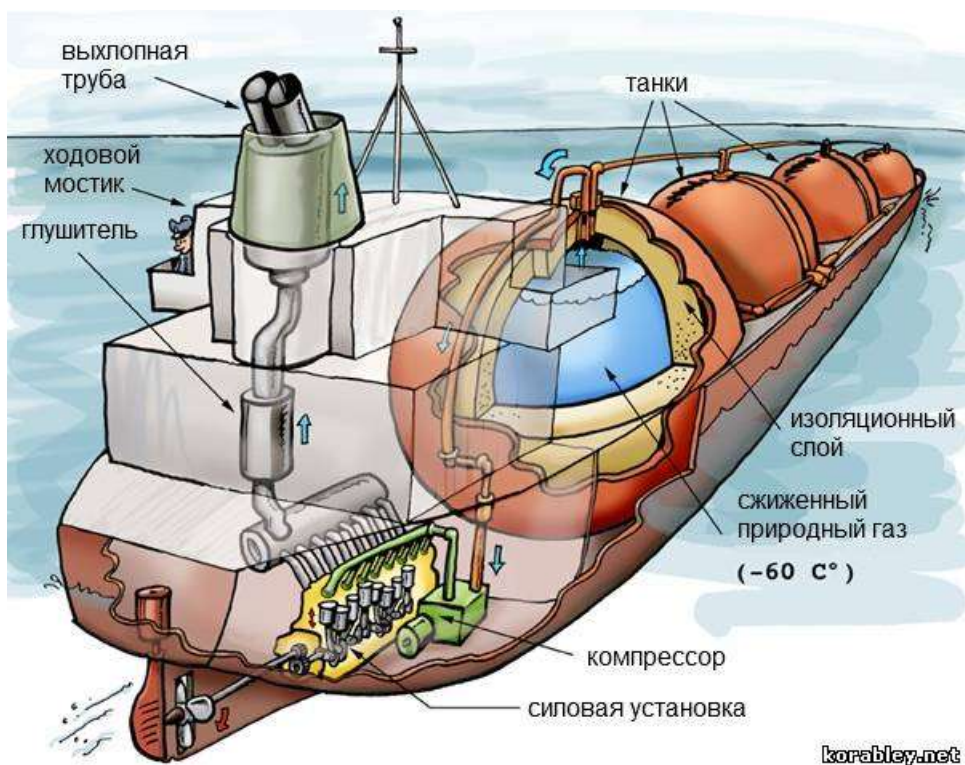
Сферичні резервуари виготовлюються зі сталі з ребрами жорсткості різноманітної ємності. Резервуари мають перлітну ізоляцію товщиною шару 58...85 мм та полівінілхлоридну ізоляцію товщиною 6 мм. У мембранних конструкціях резервуар виготовляється з гофрованих листів нержавіючої сталі товщиною 1,2 мм. В резервуарах з подвійною мембраною використовується ізоляція з перліту, яка розташовується між двома мембранами з інвару. Товщина такої стінки складає 0,5 мм.

Судна з мембранними конструкціями резервуарів мають менші розміри, ніж судна типу «Moss» (рисунки 5.10, 5.11) [17]. Але для виготовлення мембранних резервуарів необхідні більш дорогі сплави.



а

а)



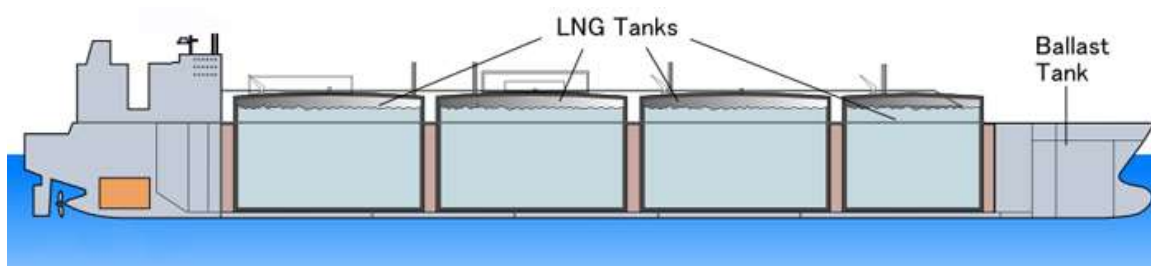
б)



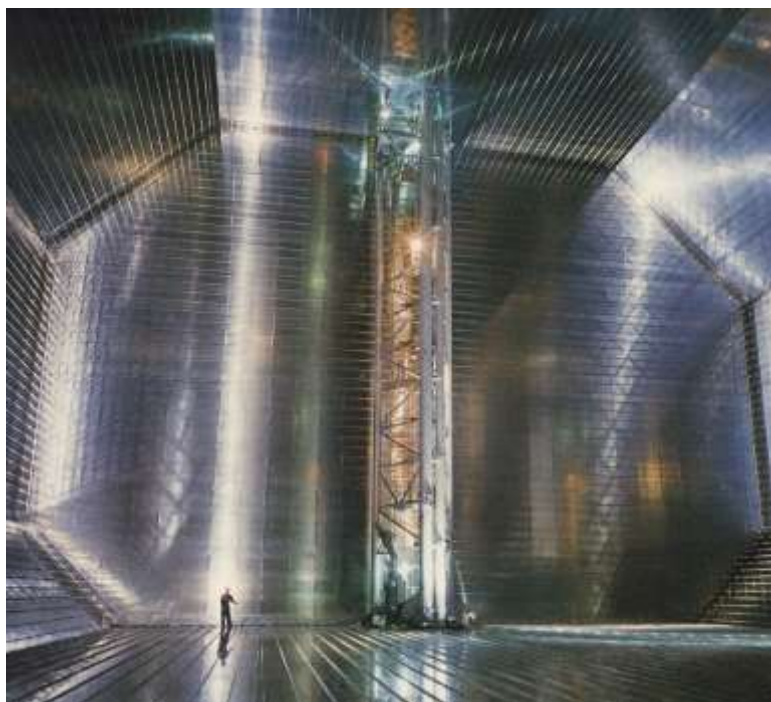
в)

Рис. 5.10. ЗПГ-танкер типа «Moss» (сферичный резервуар)





a)



б)



в)

Рис. 5.11. ЗПГ-танкер Gaz Transport & Technigaz типу «Membrane»  
(мембранный резервуар)

Теплова ізоляція резервуарів танкерів має відповідати наступним вимогам:

- не ущільнюватися при вібраціях, які виникають при транспортуванні;
- оберігати корпус танкеру у випадку витікання рідини;
- забезпечувати доступ до резервуарів для їх огляду;
- мати низький коефіцієнт теплопровідності;
- бути досить міцною.

### **5.3. Теплообмінні апарати [27, 40-46]**

Теплообмінник – це пристрій, в якому тепло переходить з одного середовища до іншого. За принципом дії теплообмінні апарати розділяють на:

- рекуперативні – це пристрої, в яких дві рідини з різноманітними температурами обмінюються теплом та розділені твердою стінкою;
- регенеративні – це апарати, в яких одна і та ж сама поверхня нагріву через задані проміжки часу омивається то гарячою, то холодною рідиною;
- змішувальні – теплопередача відбувається при безпосередньому змішуванні гарячої та холодної рідин.

#### **5.3.1. Рекуперативні теплообмінники**

У рекуперативних теплообмінниках теплоносії омивають стінку з двох сторін і обмінюються при цьому теплотою. Процес теплообміну протікає безперервно і має зазвичай стаціонарний характер. Стінка, яка омивається з обох сторін теплоносіями, називається робочою поверхнею теплообмінника.

Рекуперативні теплообмінники поділяють в залежності від напрямку руху теплоносіїв. Якщо теплоносії рухаються паралельно в одному напрямку,

мку, теплообмінник називають проточним, а при протилежному напрямку руху – протиточним. В теплообміннику з перехресним потоком теплоносії рухаються у взаємно перпендикулярних напрямках, при цьому можливий одноразовий і багаторазовий перехресний потік. Зустрічаються і більш складні схеми руху теплоносіїв.

Конструктивно рекуперативні теплообмінники можуть виконуватися з трубчастими (кожухотрубний теплообмінник) і пластинчастими (пластинчастий теплообмінник) робочими поверхнями.

Можливі також рекуперативні теплообмінники з робочою поверхнею у вигляді обертової труби. У таких апаратах можна отримати значне збільшення коефіцієнта теплопередачі.

Рекуперативні теплообмінники, призначені для утилізації теплоти в газотурбінних установках, називають регенераторами; теплообмінники для розсіювання теплоти гарячої води в навколишній простір називають радіаторами. Призначенням визначаються також назви: підігрівачі повітря, маслоохолоджувачі, пароперегрівачі тощо.

**5.3.1.1. Кожухотрубні теплообмінники** (рисунки 5.12, 5.13) належать до найбільш поширених апаратів. Вони з'явилися на початку XX століття в зв'язку з потребами теплових станцій в теплообмінниках з великою поверхнею, таких, як конденсатори і підігрівачі води, що працюють при відносно високому тиску. Кожухотрубні теплообмінники застосовуються в якості конденсаторів, підігрівачів і випарників. В даний час їх конструкція в результаті спеціальних розробок з урахуванням досвіду експлуатації стала набагато більш досконалою.

З роками кожухотрубні теплообмінники стали найбільш широко застосовуваним типом апаратів. Це обумовлено, перш за все, надійністю конструкції, великим набором варіантів виконання для різних умов експлуатації, зокрема:

- однофазні потоки: кипіння і конденсація по гарячій та холодній сторонам теплообмінника з вертикальним або горизонтальним виконанням;
- спектр тиску від вакууму до високих значень;
- в широких межах змінюються перепади тиску по обидві сторони, внаслідок великої різноманітності варіантів;
- задоволення вимог по термічним напруженням без істотного підвищення вартості апарату;
- розміри від малих до гранично великих (5000 м<sup>2</sup>);
- можливість застосування різних матеріалів відповідно до вимог до вартості, корозії, температурного режиму і тиску;
- використання розвинених поверхонь теплообміну як всередині труб, так і зовні, різних інтенсифікаторів та ін.;
- можливість вилучення пучка труб для очищення та ремонту.

Кожухотрубні теплообмінники складаються з пучків труб, укріплених в трубних дошках, кожухів, кришок, камер, патрубків та опор. Трубний і міжтрубний простір в цих апаратах роз'єднані, причому кожне з них може бути розділене перегородками на кілька ходів. Класична схема кожухотрубного теплообмінника показана на рис 5.12.

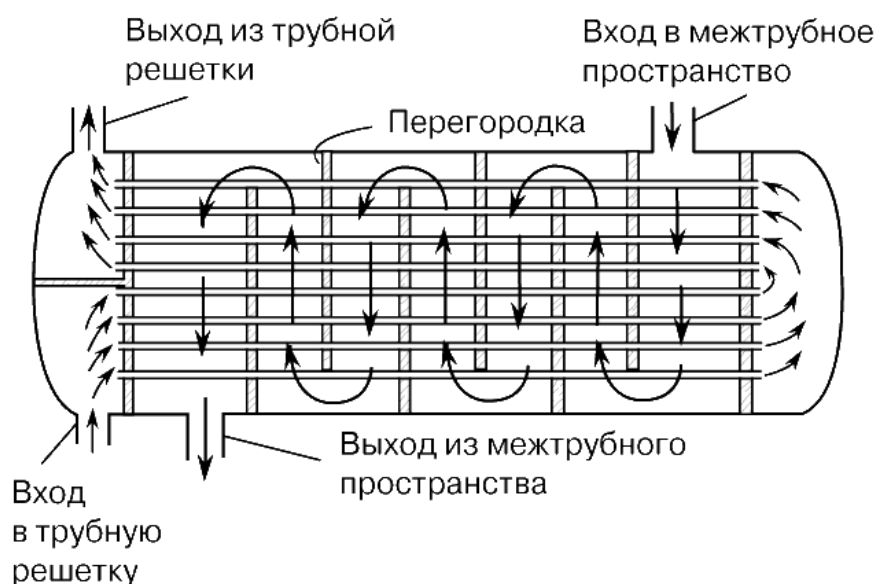


Рис. 5.12. Принципова схема кожухотрубного теплообмінного апарату

Теплопередавальною поверхню апаратів може становити від декількох сотень квадратних сантиметрів до кількох тисяч квадратних метрів. Так, конденсатор парової турбіни потужністю 150 МВт складаються з 17 тисяч труб із загальною поверхнею теплообміну близько 9000 м<sup>2</sup>.

Кожух (корпус) кожухотрубного теплообмінника являє собою трубу, зварену з одного або декількох сталевих листів. Кожухи розрізняються головним чином способом з'єднання з трубною дошкою і кришками. Товщина стінки кожуха визначається тиском робочого середовища і діаметром кожуха, але повинна бути не менше 4 мм. До циліндричних крайків кожуха приварюють фланці для з'єднання з кришками або днищами. На зовнішній поверхні кожуха прикріплюють опори апарату.

Трубчатка кожухотрубних теплообмінників виконується з прямих або вигнутих (U-образних або W-образних) труб діаметром від 12 до 57 мм. Слід надавати перевагу сталевим безшовним трубам.

Трубні решітки служать для закріплення в них пучка труб за допомогою розвальцьовування, розбортування, зварювання, запаювання або сальникових кріплень. Трубні дошки приварюють до кожуха (рис. 5.13, а, в), зажимають болтами між фланцями кожуха і кришки (рис. 5.13, б, г) або з'єднують болтами тільки з фланцем вільної камери (рис. 5.13, д, е). матеріалом дошок служить зазвичай листова сталь товщиною не менше 20 мм.

Кожухотрубні теплообмінники можуть бути жорсткою (рис. 5.13, а, к), нежорсткою (рис. 5.13, г, д, е, з, і) і напівжорсткою (рис. 5.13, б, в, ж) конструкцією, одноходові і багатоходові, прямоточні, протиточні і поперечноточні, горизонтальні, похилі і вертикальні.

У кожухотрубних теплообмінниках прохідний перетин міжтрубного простору в 2-3 рази більше прохідного перетину трубок. Тому при однакових витратах теплоносіїв, що мають однакове агрегатний стан, коефіцієнти тепловіддачі на поверхні міжтрубному простору невисокі, що знижує кое-



фіцієнт теплопередачі в апараті. Пристрій перегородок в міжтрубному просторі сприяє збільшенню швидкості теплоносія і підвищенню коефіцієнта теплопередачі.

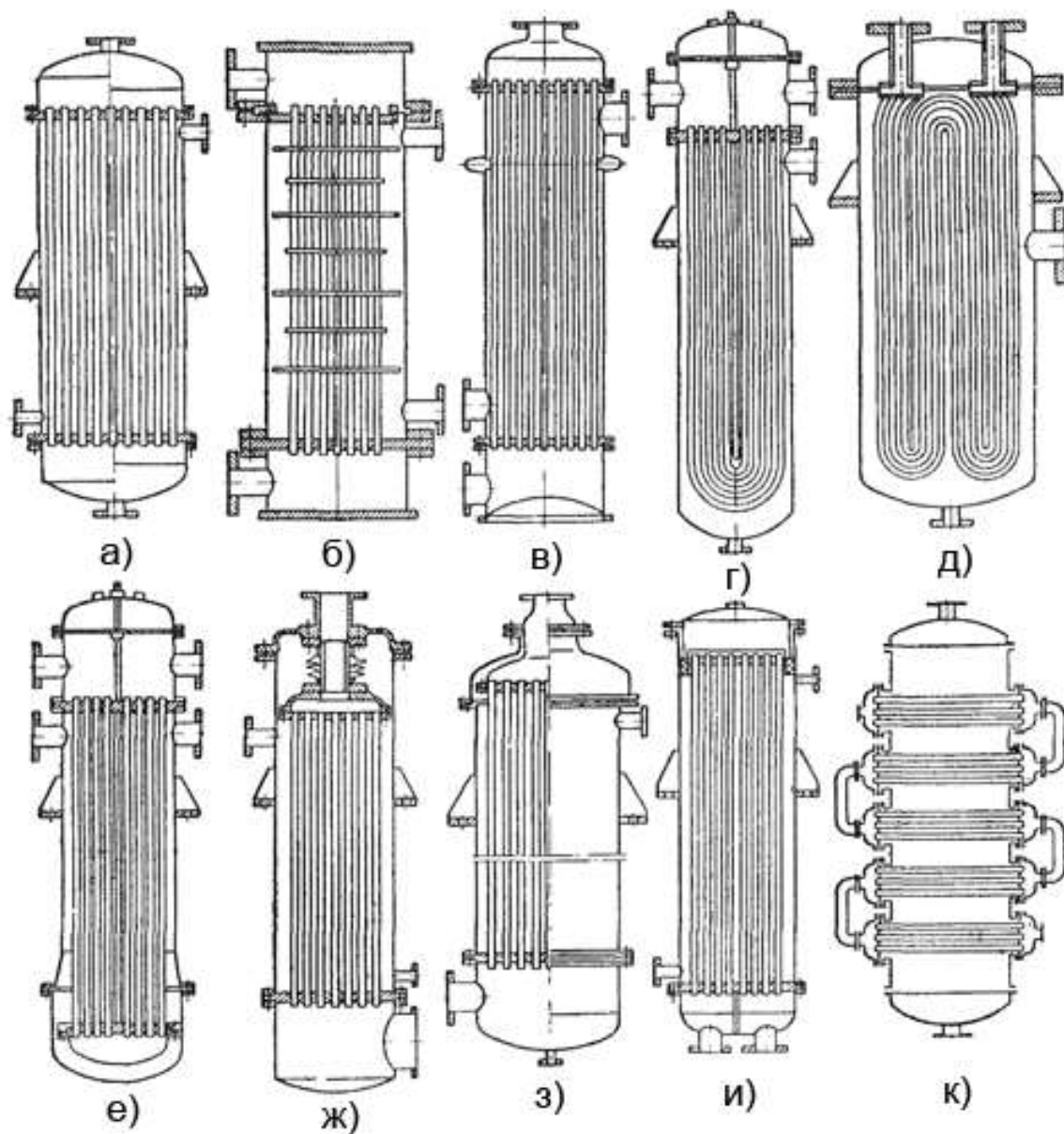


Рис. 5.13. Типи кожухотрубних апаратів

У парорідинних теплообмінниках пар проходить зазвичай в міжтрубному просторі, а рідина - по трубах. Різниця температур стінки корпусу і труб зазвичай значна. Для компенсації різниці теплових подовжень між кожухом і трубами встановлюють лінзові (рис. 5.13, в), сальникові (рис. 5.13, з, і) або сильфонні (рис. 5.13, ж) компенсатори.

**5.3.1.2. Пластинчасті теплообмінники** [44] (рис. 5.14) відносяться до класу рекуперативних теплообмінників і являють собою апарати, теплообмінна поверхня яких утворена набором тонких штампованих металевих пластин (рис. 5.15).

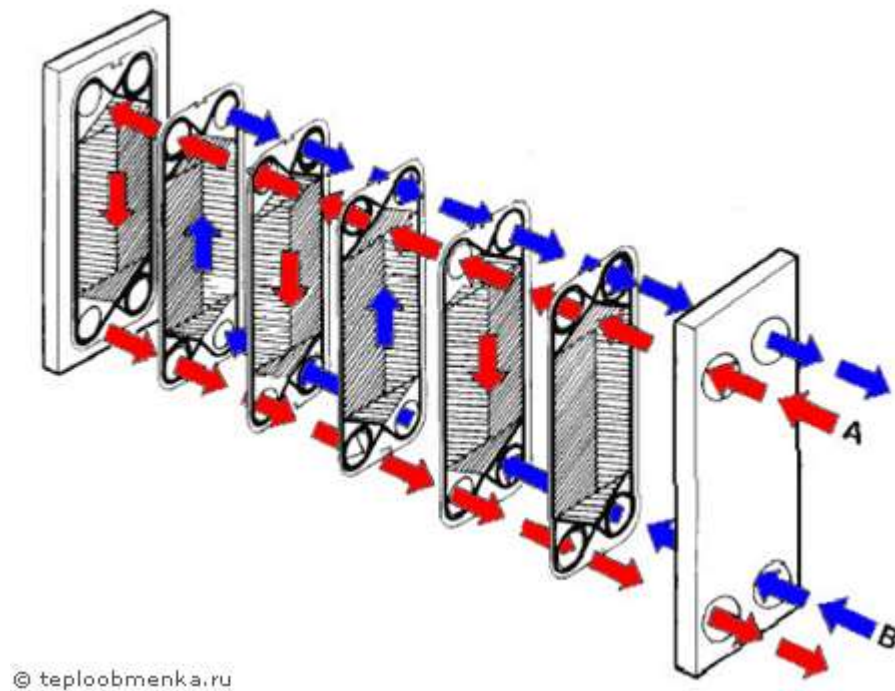


Рис. 5.14. Схема руху потів в пластинчастому теплообмінному апараті

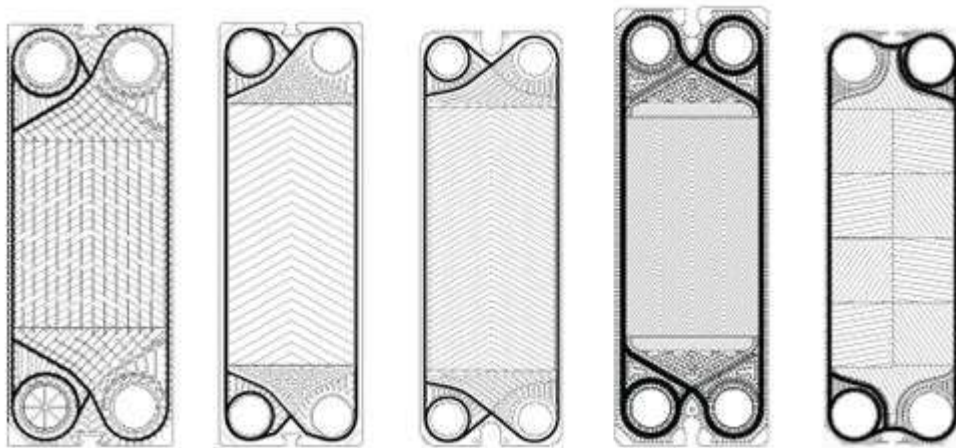


Рис. 5.15. Типи пластин для розбірних пластинчастих теплообмінників

Серійно випускаються пластинчасті теплообмінники укомплектовані пластинами, штампованими з листового металу товщиною до 1 мм

(рис. 5.14). Як матеріал застосовується корозійностійка сталь, титан, спеціальні сплави. Пластини пластинчастого теплообмінника мають гофровану поверхню для турбулізації потоків в каналах, що підвищує ефективність теплопередачі і перешкоджає відкладенню забруднень. Гофри пластин зазвичай мають в перетині профіль рівностороннього трикутника. Чим тупіший кут, під який розташовані гофри пластини, тим більший опір створюється в каналах, ніж гостріше кут, тим менше опір і вище швидкість потоків.

Пластини теплообмінника, зібрані в єдиний пакет, утворюють між собою канали, по яких протікають теплоносії, що обмінюються тепловою енергією. Канали з теплоносіями А і В чергуються між собою.

Основні розміри і параметри найбільш поширених в промисловості пластинчастих теплообмінників визначені ГОСТ 15518-83. Їх виготовляють з поверхнею теплообміну від 2 до 600 м<sup>2</sup> в залежності від типорозміру пластин; ці теплообмінники використовують при тиску до 1,6 МПа і температурі робочих середовищ від –30 до + 180 ° С для реалізації теплообміну між рідинами і парами (газами) в якості охолоджувачів, підігрівачів і конденсаторів.

Пластинчасті теплообмінники поділяють за ступенем доступності поверхні теплообміну для механічного очищення і огляду:

- розбірні;
- напіврозбірні (напівзварювальні);
- нерозбірні (паяні і зварні).

Найбільш широко застосовують розбірні пластинчасті теплообмінники, в яких пластини відділені одна від одної гумовими ущільнювачами. Монтаж і демонтаж цих апаратів здійснюють досить швидко, очищення теплообмінних поверхонь вимагає незначних витрат праці.

### 5.3.2. Регенеративні теплообмінники

В регенеративних теплообмінниках процес перенесення теплоти від гарячого теплоносія до холодного поділяється в часі на два періоди і відбувається при поперемінному нагріванні і охолодженні насадки. Теплообмінники цього типу часто застосовують для регенерації теплоти відхідних газів. Характерним для регенеративних теплообмінників є наявність твердих тіл, які поперемінно стикаються з гарячим і холодним теплоносіями. При зіткненні з гарячим теплоносієм тверде тіло нагрівається; стикаючись з холодним теплоносієм, віддає йому своє тепло.

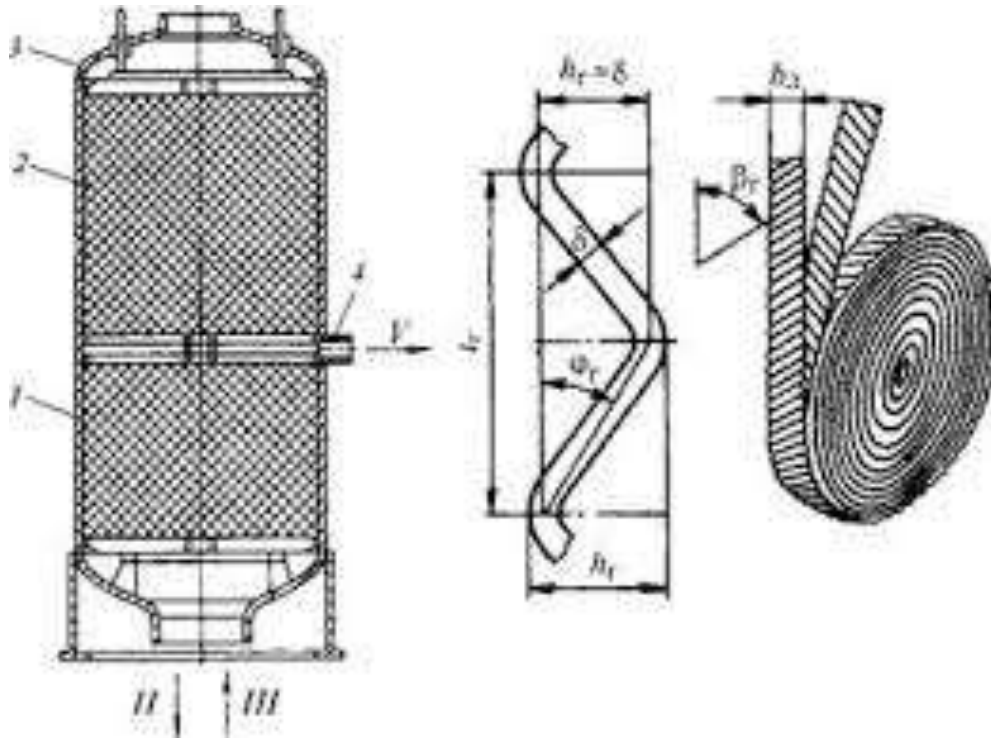


Рис. 5.15. Конструкція регенеративного теплообмінника

Розділяють безперервнодіючі і періодично діючі регенеративні теплообмінники. Безперервно діючими регенеративними теплообмінниками є нагрівальні установки з циркулюючим зернистим матеріалом.

Регенеративний теплообмінник періодичної дії складається з двох циліндричних заповнених насадок. Теплопередача здійснюється в два періоди. У

період охолодження через апарат продувають середу І, яка охолоджує насадку, а сама нагрівається. У період нагрівання через апарат пропускають середу ІІ, яка охолоджується, нагріваючи при цьому насадку. Потoki перемикаються за допомогою засувки і клапанів

### 5.3.3. Атмосферні випарники регазифікаційних установок [27, 45, 46]

Атмосферні випарники (рис. 5.16, табл. 5.2) - це найбільш економічне рішення для газифікації зріджених продуктів розділення повітря (кисень, азот, аргон), ЗПГ і вуглекислоти.



а)



б)

Рис. 5.16. а) Елемент теплообмінної поверхні; б) зовнішній вигляд атмосферних випарників

Для газифікації зріджених газів при використанні атмосферних випарників не потрібні енерговитрати - газифікація і догрів продукту в атмосферних випарниках прямої дії здійснюється за рахунок теплоприливів з навколишнього середовища завдяки розвиненій поверхні теплообміну.

Таблиця 5.2. Основні типи атмосферних випарників

| Найменування | Тип                 | Площа, м <sup>2</sup> | Маса, кг | Продуктивність,<br>нм <sup>3</sup> /ч |
|--------------|---------------------|-----------------------|----------|---------------------------------------|
| ИС 0020-Н    | навісний            | 6                     | 35       | 16                                    |
| ИС 0045-Н    | навісний            | 13                    | 60       | 38                                    |
| ИС 0070-Н    | навісний            | 18                    | 80       | 55                                    |
| ИС 0165-Н    | навісний            | 47                    | 200      | 134                                   |
| ИС 0045-С    | окремо розташований | 13                    | 60       | 38                                    |
| ИС 0070-С    | окремо розташований | 20                    | 85       | 58                                    |
| ИС 0095-С    | окремо розташований | 27                    | 120      | 77                                    |
| ИС 0140-С    | окремо розташований | 40                    | 180      | 114                                   |
| ИС 0190-С    | окремо розташований | 54                    | 215      | 154                                   |
| ИС 0230-С    | окремо розташований | 67                    | 265      | 191                                   |
| ИС 0280-С    | окремо розташований | 80                    | 213      | 232                                   |
| ИС 0350-С    | окремо розташований | 100                   | 385      | 289                                   |
| ИС 0430-С    | окремо розташований | 120                   | 460      | 348                                   |

Продовження табл. 5.2.

| Найменування | Тип                 | Площа, м <sup>2</sup> | Маса, кг | Продуктивність,<br>нм <sup>3</sup> /ч |
|--------------|---------------------|-----------------------|----------|---------------------------------------|
| ИС 0570-С    | окремо розташований | 160                   | 610      | 463                                   |
| ИС 0860-С    | окремо розташований | 240                   | 940      | 696                                   |
| ИС 1100-С    | окремо розташований | 321                   | 1200     | 927                                   |
| ИС 1500-С    | окремо розташований | 428                   | 1580     | 1236                                  |
| ИС 1900-С    | окремо розташований | 562                   | 2000     | 1545                                  |
| ИС 2300-С    | окремо розташований | 669                   | 2470     | 1931                                  |
| ИС 2700-С    | окремо розташований | 772                   | 2800     | 3463                                  |

В даний час розроблений широкий ряд навісних і окремо розташованих продукційних випарників атмосферного типу прямої дії з поздовжньо-орєберенной труби продуктивністю від 20 м<sup>3</sup>/ год до 2700 м<sup>3</sup>/ год. Робочий тиск – 4,0 МПа або 25,0 МПа.

Даний тип випарників може використовуватися як для газифікації продуктів поділу повітря, так і в якості регазифікатора зрідженого природного газу комплексів автономного газопостачання ЗПГ.

#### 5.3.4. Змішувальні теплообмінники

У змішувальних теплообмінниках процес теплообміну супроводжується перемішуванням теплоносіїв, тобто вони безпосередньо стикаються один з одним. За своїм призначенням вони поділяються на: холодильники; нагрівачі; випарники; конденсатори; деаератори (теплообмінники з суміщеними функціями, тобто коли видаляється повітря).

Процес теплообміну в такому апараті має стаціонарний характер і супроводжується випаровуванням рідини. Змішувальний теплообмінник доцільно використовувати для таких теплоносіїв, які легко розділити після теплообмінного апарату. Наприклад, такою парою теплоносіїв є вода і повітря.

Інтенсивність теплообміну в цих апаратах залежить від поверхні контакту теплоносіїв і швидкості їх руху. Чим більше розвинена ця поверхня, тим більше кількості тепла можна передати від одного теплоносія до іншого. Змішувальні апарати відрізняються простотою конструкції, можливістю повного використання потенціалу гарячого теплоносія, високою інтенсивністю теплообміну. Недоліки: зниження концентрації розчинів при обігріві, викиди пару та дрібних крапель рідини.



## ***ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ***

9. Теплова ізоляція (принцип дії).
10. Види теплоізоляційних матеріалів, що застосовуються в техніки низьких температур.
11. Газонаповнена ізоляція.
12. Вакуумна ізоляція.
13. Вакуумно-порошкова ізоляція.
14. Багатошарова ізоляція.
15. Ізотермічні ємності для зберігання зрідженого природного газу.
16. Підземні та надземні резервуари для зберігання зрідженого природного газу.
17. Захисні споруди резервуарів для зберігання зрідженого природного газу (призначення, пристрій).
18. Конструкції дахів резервуарів для зберігання ЗПГ.
19. Принцип роботи ємності для транспортування зрідженого природного газу.
20. Теплові мости.
21. Циліндричні горизонтальні ємності для транспортування зрідженого природного газу.
22. Циліндричні вертикальні ємності для транспортування зрідженого природного газу.
23. Сферичні ємності для зрідженого природного газу.
24. Транспортування зрідженого природного газу морським шляхом.
25. Сферичні ЗПГ-танкери.
26. Циліндричні ЗПГ-танкери.
27. Мембранні ЗПГ-танкери.
28. Типи рекуперативних теплообмінних апаратів.
29. Принцип дії рекуперативних теплообмінних апаратів.
30. Принцип дії регенеративних теплообмінних апаратів.
31. Принцип дії змішувальних теплообмінних апаратів.

## **РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ, ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА, ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Технологія скраплення природного газу є вибухопожежонебезпечним виробництвом категорії А і вимагає дотримання загальних правил техніки безпеки та пожежної безпеки для вибухопожежонебезпечних виробництв, що діють в газовій промисловості, а також специфічних норм і правил, пов'язаних з особливостями виробництва, зберігання і транспортування ЗПГ [29].

### **6.1. Охорона праці**

6.1.1. З метою створення безпечних умов роботи обслуговуючого персоналу комплексу ЗПГ слід передбачати проектом і забезпечувати виконання при експлуатації таких основних заходів:

- підтримку проектного технологічного режиму роботи всіх виробничих блоків, цехів і споруд комплексу з встановленими параметрами (тиск, температура, продуктивність і т.д.);
- широке впровадження систем автоматизації та механізації виробничих процесів і трудомістких робіт;
- зниження рівнів шуму та вібрації під час роботи технологічного обладнання, вузлів редукування і т.д. до значень, встановлених санітарними нормами;
- контроль за герметичністю технологічного обладнання, апаратів, трубопроводів, арматури, резервуарів СПГ і резервуарів із зрідженими газами під тиском, де можливі витіки вибухонебезпечних рідин і газів;
- контроль концентрацій вуглеводневих газів і парів в межах санітарно-захисної зони комплексів ЗПГ (мітки на граничній зоні);
- контроль загазованості виробничих вибухонебезпечних приміщень газоаналізаторами, зблокованими з системами аварійної сигналізації, вентиляції і захисту обладнання;

- підтримання стану готовності пожежної сигналізації, вогнегасних установок і засобів захисту від пожежі;
- дотримання правил техніки безпеки і протипожежної техніки, відповідних виробничих інструкцій на робочих місцях обслуговуючого персоналу;
- дотримання правил і інструкції по експлуатації електроустановок;
- вивчення обслуговуючим персоналом специфічних властивостей ЗПГ і особливостей технології його виробництва, зберігання, регазифікації і транспортування;
- навчання обслуговуючого персоналу правилам роботи із ЗПГ, ЛЗР і ГР, проведення в установленому порядку інструкцій з техніки безпеки та пожежної безпеки;
- забезпечення обслуговуючого персоналу спецодягом, індивідуальними засобами захисту від опіків, обмороження, отруєння токсичними рідинами і газами;
- організація приміщень санітарно-гігієнічного призначення для обслуговуючого персоналу у виробничій зоні комплексу ЗПГ.

6.1.2. Для попередження виникнення пожеж в разі витoku ЗПГ слід позначати небезпечні зони попереджувальними таблицями в радіусі 15 м від границі витoku і приймати спеціальні методи обережності.

Примітка: Слід пам'ятати, що хоча при нормальній температурі природний газ-метан легший за повітря, рідкий природний газ спочатку важчий за повітря і в разі витоків заповнює заглиблення, канали, колодязі та ін. Понижені місця. Першою ознакою витoku ЗПГ є обмерзання місця витoku і конденсація вологи в повітрі, створює видимий туман.

6.1.3. Роботи із застосуванням відкритого вогню (зварювання, різання і т.д.), близько резервуарів, установок або трубопроводів з наявністю природного газу слід проводити тільки після їх продувки інертним газом і проведення аналізів проб навколишнього повітря, з дотриманням відповідних правил та інструкцій.

6.1.4. Для виключення небезпеки гіпотермії при впливі низьких температур обслуговуючий персонал установок ЗПГ повинен бути забезпечений захисним одягом, повсякчасної прогумованої взуттям, азбестовими або шкіряними рукавицями, захисними окулярами.

## **6.2. Пожежна безпека**

6.2.1. Проектом повинні передбачатися заходи, що забезпечують вибухову і пожежну безпеку технологічних процесів, будівель і споруд комплексу ЗПГ, відповідно до вимог діючих загальносоюзних і галузевих нормативних документів з будівництва, норм технологічного проектування, правил пожежної безпеки, а також справжніх норм.

6.2.2. Будинки і споруди комплексу ЗПГ слід обладнати установками автоматичного пожежогасіння відповідно до вимог діючих нормативних документів.

6.2.3. Для захисту від теплового впливу при пожежах зовнішніх споруд комплексу ЗПГ слід передбачати застосування стаціонарних установок водяного зрошення і стаціонарних лафетних стволів.

6.2.4. Джерелом водопостачання стаціонарних установок водяного зрошення і лафетних стволів повинен бути, як правило, протипожежний кільцевий водопровід високого тиску.

6.2.5. Витрата води з мережі протипожежного водопроводу повинен визначатися розрахунком, виходячи з умов двох можливих пожеж на території комплексу ЗПГ: один - у виробничій зоні, інший - в зоні зберігання ЗПГ (парки ізотермічних резервуарів), що вимагають найбільшої витрати води. Додатково до зазначених видатків води слід передбачати не менше 50 л / с на пересувну пожежну техніку.

6.2.6. Витрата води на стаціонарні установки зрошення резервуарів ізотермічного сховища слід приймати за умови одночасного зрошення палаючого резервуара і суміжних з ним.

Інтенсивність подачі води на охолодження ізотермічних резервуарів слід приймати:

- для поверхонь резервуарів - 0,1 л / с на 1 м<sup>2</sup> поверхні, що захищається;
- для місць розташування функціонального обладнання, включаючи запобіжні клапани, для вузлів арматури відключення, розташованих безпосередньо на перекритті резервуара і на майданчиках обслуговування, в межах захисної огорожі (і поза ним) - 0,5 л / с на 1 м<sup>2</sup> поверхні, що захищається.

Розрахункову тривалість охолодження резервуарів стаціонарними установками зрошення слід приймати 3 години, пересувною установкою - 6 годин.

6.2.7. Систему зрошення кожного ізотермічного резервуара слід підключати до кільцевого протипожежного водопроводу резервуарного парку не менше, ніж двома вводами з установкою відповідної арматури з дистанційним керуванням і дублюванням ручного керування за місцем.

6.2.8. Стаціонарна автоматична установка водяного зрошення ізотермічного резервуара повинна включати:

- підвідний водопровідний колектор;
- запірно-пускові пристрої;
- живильний трубопровід, що йде від запірного пристрою до кілець зрошення;
- розташовані на перекритті кільця зрошення з зрошувачами;
- розподільні трубопроводи з зрошувачами для зрошення арматури на робочих майданчиках.

Для наземних резервуарів установка автоматичного водяного зрошення повинна включати також кільцеві трубопроводи зі спеціальними зрошувачами, розташовані на відстані 0,8 м від бічної поверхні, з інтервалом 5...6 м по висоті резервуару, починаючи зверху, від вузла сполучення перекриття і стіни.

6.2.9. Тип, кількість і особливості розстановки зрошувачів, а також режим їх роботи (тиск перед зрошувачами, дисперсність розпилу) повинні

бути визначені проектом з умови рівномірного зрошення всіх поверхонь, що захищаються і надійного теплового захисту конструкції резервуару як в разі розливу і горіння СПГ в межах власної буферної зони, так і при радіаційному тепловому впливі палаючого ЗПГ на сусідньому резервуарі.

6.2.10. Для випадку установки двох і більше наземних резервуарів в ряд схема підключення кільцевих трубопроводів (зрошення) теплового захисту бічної поверхні до системи живлення повинна забезпечувати можливість диференціального зрошення водою поверхні бічної стінки, утвореної половиною довжини окружності кільця і зверненої до найближчого резервуару.

6.2.11. Для систем зрошення слід передбачати автоматичне спорожнення від води при припиненні напірної подачі. Прокладка трубопроводів повинна бути виконана з необхідним ухилом в бік живильного трубопроводу, а живильного трубопроводу - в сторону вузла випорожнення. Додатково рекомендується передбачити можливість продувки зрошувачів і трубопроводів сухим повітрям з живильної системи КВП чи інших джерел.

6.2.12. Стаціонарні установки водяного зрошення сховищ СПГ має мати автоматичне включення, дистанційне з приміщення ЦДП і місцеве з вузлів управління, з обов'язковим дублюванням ручним пуском.

6.2.13. Вузли керування повинні розміщуватися:

- для надземних резервуарів - поза буферної зони на відстані не менше 10 м от захисної огорожі;
- для підземних резервуарів - на відстані не менше 30 м від утворюваної циліндричної поверхні.

Штурвали засувки на підвідному трубопроводі до стояків системи і засувки, вузлів управління повинні бути виведені назовні, над покриттям колодязів.

6.2.14. Для автоматичного пуску стаціонарних установок водяного зрошення повинна застосовуватися заповнена повітрям або інертним газом спо-

нукальна мережа зі зрошувачами спринклерного типу або установка пожежної сигналізації. У спонукальній системі повинен постійно підтримуватися тиск не менше 0,25 МПа (2,5 атм).

6.2.15. Відстань від пожежних сповіщувачів до поверхонь, що захищаються, повинно бути в межах 0,5 ... 1,0 м. Відстань між сповіщувачами належить приймати рівним 2 ... 6 м. Сповіщувачі повинні бути встановлені в першу чергу поблизу систем, що забезпечують функціональну надійність сховища (місця установки арматури, контрольно-вимірювальних приладів).

6.2.16. Для надземних резервуарів, що мають низьку захисну огорожу, на додаток до стаціонарних автоматичних систем водяного зрошення, має бути передбачено зрошення поверхні з лафетних стволів, з умови зрошення кожної точки резервуара одним струменем.

Для підземних резервуарів повинно бути передбачено додаткове зрошення лафетними стволами поверхні купола, з умови зрошення кожної точки одним струменем.

6.2.17. Лафетні стволи для зрошення надземних резервуарів повинні встановлюватися на лафетних вишках висотою не більше 2,5 м від поверхні ґрунту до рівня підлоги вишки, безпосередньо біля доріг, йдуть по периметру за захисним огородженням резервуару (групи резервуарів).

Для підземних резервуарів лафетні стволи повинні встановлюватися на відстані 15 м від твірної зовнішньої поверхні резервуара, на вишках, рівень підлоги яких знаходиться на рівні обсіпання резервуара.

Лафетні стовбури повинні бути обладнані захисними екранами і індивідуальними зрошувальними установками.

6.2.18. Для гасіння відкритого полум'я ЗПГ на ізотермічних резервуарах слід застосовувати автоматичні стаціонарні установки порошкового і пінного пожежогасіння і пересувні засоби порошкового пожежогасіння. Як хімічний засіб рекомендується застосування сухих порошоків на базі бікарбонату натрію або бікарбонату калію. Вид вогнегасного засобу, технологія

і інтенсивність його подачі в потенційну зону горіння визначається при конкретному проектуванні і узгоджується з державними органами пожежного нагляду.

6.2.19. Стаціонарними автоматичними установками порошкового пожежогасіння в резервуарних парках повинні оснащуватися:

- надземні резервуари об'ємом 2000 м<sup>3</sup> і більше;
- підземні резервуари об'ємом 5000 м<sup>3</sup> і більше.

До складу установок повинні входити:

- системи автоматичного виявлення займання, що включають комплекс первинних датчиків, що реагують на тепловий вплив і світлове випромінювання полум'я, засоби ідентифікації від помилкового спрацювання, а також тривожну сигналізацію за місцем з передачею показників на щитовий КВП сховища, в систему управління установки пожежогасіння та на ЦПД комплексу;

- герметичні сосуди для зберігання вогнегасного порошку;
- спонукальна система постійного тиску для надування газом судів з порошком, що спрацьовує від датчиків виявлення займання;
- система приводу керуючої і регулюючої арматури;
- система розподільних трубопроводів і засобів розпилу порошку.

Системи автоматичного спрацювання та управління установок повинні бути продубльовані ручними засобами включення і управління, встановленими в місцях, доступних для обслуговуючого персоналу в аварійних ситуаціях.

6.2.20. Стаціонарні автоматичні установки пожежогасіння резервуарів ЗПГ повинні забезпечувати подачу вогнегасного порошку через систему насадок (сопел) на робочу площу на куполі резервуару для установки заглиблених насосів, арматури та іншого функціонального обладнання, на пастки ЗПГ і обслуговуючі майданчики всередині захисної огорожі (і поза ним), а також подачу порошку в розрахункову зону утворення факелу полум'я на клапанах прямого скидання газу в атмосферу.



Для надземних резервуарів передбачається також установка на захисному огороженні (або на спеціальній вишці біля огорожі) моніторів з ручним керуванням стволом для подачі порошку в можливі зони горіння ЗПГ.

6.2.21. Для надземних резервуарів об'ємом 2000 м<sup>3</sup> і більше (з низьким або кільцевим захисним огороженнями) додатково до засобів порошкового пожежогасіння слід передбачати можливість подачі від стаціонарних установок в зону захисної огорожі воздухомеханічну піну на базі протейнових, фторпротейнових білкових концентратів з кратністю розширення близько 500.

Подачу в зону горіння високократної піни слід розглядати як допоміжний засіб обмеження і контролю за інтенсивністю горіння ЗПГ з відкритої поверхні (висоти полум'я, інтенсивності теплового випромінювання).

6.2.22. Стаціонарні установки пінного пожежогасіння повинні включати: насосну станцію; резервуари для води, піноутворювача або його розчину; змішувачі (дозатори); систему розподільних трубопроводів; піногенератори; засоби автоматизації, контролю та управління.

Піногенератори повинні розміщуватися безпосередньо на захисному огороженні, рівномірно по його периметру, і забезпечувати виробництво і подачу піни на поверхню майданчика при великомасштабних розливах з резервуара і горінні ЗПГ на великій поверхні.

6.2.23. Стаціонарні установки пінного пожежогасіння повинні мати автоматизоване управління з ЦДП комплексу з дублюванням ручним керуванням за місцем. При цьому пункти ручного управління повинні розташовуватися на місцях, доступних для обслуговуючого персоналу при виникненні аварійних ситуацій.

### **6.3. Охорона навколишнього середовища**

6.3.1. У проекті комплексу ЗПГ повинні передбачатися наступні основні заходи з охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання природних ресурсів:

- раціональне рішення генерального плану та вертикального планування;
- охорона ґрунтово-рослинного покриву і відновлення порушених при будівництві земель;
- організація санітарно-захисної зони, озеленення території;
- запобігання забрудненню ґрунту і повітряного басейну вуглеводневими газами та нафтопродуктами, зниження концентрації шкідливих речовин в приземному шарі атмосфери;
- скорочення споживання прісної води, використання систем зворотного водопостачання, повітряного охолодження продуктів в технологічних процесах;
- застосування хімічної і біологічної очистки стічних вод;
- утилізація відходів виробництва.

6.3.2. При виборі майданчика для будівництва комплексу ЗПГ слід передбачати безпечні відстані як між будівлями і спорудами комплексу, так і до оточуючих його об'єктів в відповідності з вимогами цих норм.

6.3.3. Розміщення будівель і споруд за їх призначенням слід проводити у відповідних зонах комплексу (таблиця 1 цих норм), враховуючи при цьому послідовність технологічних операцій, надійність і зручність експлуатації об'єктів, а також раціональне використання земельних площ.

6.3.4. У технологічній частині проекту комплексу ЗПГ повинні розроблятися заходи щодо забезпечення безвідходного процесу виробництва і реалізації ЗПГ, економного витрачання холодоагентів, абсорбентів, адсорбентів, паливного газу, паливно-мастильних матеріалів і запобігання забрудненню ними виробничих ділянок, в тому числі:

- забезпечення високого ступеня герметичності технологічного устаткування, резервуарів, трубопроводів, арматури, наливних пристроїв, транспортних ємностей і т.д. із ЗПГ, ЛЗР і ГР;
- впровадження економних холодильних циклів і ефективних процесів очищення і осушення природного газу перед його зрідженням;
- створення централізованих герметичних систем заправки змащувальними маслами технологічних агрегатів, машин і механізмів, а також систем збору, зберігання і регенерації відпрацьованих масел;
- Розробка та впровадження теплоутилізаційних систем газокompресорних цехів;
- утилізація випаруваного ЗПГ, газів віддуву і природного газу низького тиску для газопостачання.

6.3.5. З метою зниження загазованості території комплексу СПГ, охорони повітряного басейну і приземного шару атмосфери від забруднення вуглеводневими газами слід передбачати в технологічній частині проекту факельну систему централізованого збору і спалювання газів від запобіжних клапанів і продувок, аварійних скидів відповідно до вимог розділу 3.8 цих норм.

6.3.6. Викиди в атмосферу повітря, що містить шкідливі речовини, що видаляється з систем загальнообмінної витяжної вентиляції, і розсіювання цих речовин слід передбачати і обґрунтовувати розрахунком таким чином, щоб їх концентрація в атмосферному повітрі населених пунктів не перевищувала максимальних разових, встановлених "Санітарними нормами проектування промислових підприємств».

6.3.7. Заходи щодо захисту джерел водопостачання від забруднення зрідженими газами, вимоги до створення раціональних систем водопостачання та каналізації, очищення стічних вод передбачені в розділі 7.2. справжніх норм.

### ***ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ***

- 32. Перерахувати заходи з охорони праці.
- 33. Загальні положення пожежної безпеки.
- 34. Особливості систем пожежогасіння надземних резервуарів.
- 35. Особливості систем пожежогасіння підземних резервуарів.
- 36. Охорона навколишнього середовища.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетика в России: взгляд в будущее. – М: Изд. дом «Энергия». – 2010. – 616 с.
2. Новицкий Я.Ю. Природный газ – топливо XXI века // Новаинфо. – 2014. – № 25-1. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://novainfo.ru/article/2172>.
3. Сжиженный метан как транспортное топливо. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lngas.ru/natural-gas-lng/szhizhennyj-metan-transportnoe-toplivo.html>.
4. Салич В.Л. Использование природного газа а технологическом цикле испытаний ракетных двигателей малой тяги для основных отечественных и международных космических программ // Gas word. – 2017. – № 39. – С. 28-29.
5. Ашихмина Т.В., Сармин Д.В., Угланов Д.А., Использование ёмкости высокого давления с криогенной заправкой как хранилища-регазификатора для автономных комплексов газоснабжения и железнодорожного транспорта // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 5 (29). – С. 16-22.
6. BP Statistical Review of World Energy. Acknowledgements Data compilation Centre for Energy Economics Research and Policy. – Heriot-Watt University. – 2016. – 45 p.
7. Максаковский В.П. Географическая картина мира. Книга I. Общая характеристика мира. – М.: Дрофа, 2008. – 1010 с.
8. Высоцкий В.И., Фельдман С.Л. Нефтегазовая промышленность мира. Справочно-информационный обзор. – 2014. – 63 с. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docplayer.ru/26111723-Neftegazovaya-promyshlennost-mira-spravочно-informacionnyy-obzor.html>
9. Некоммерческая организация GIIGNL. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.giignl.com](http://www.giignl.com).

10. Баррон Р.Ф. Криогенные системы / Р.Ф. Баррон. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 408 с.
11. Герш С.Я. Глубокое охлаждение / С.Я. Герш. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – Ч.1. – 392 с.
12. Дорожкин В.Ю., Мастобаев Б.Н. Северные и южные заводы по сжижению природного газа. Сравнение технологий подготовки газа // Башкирский химический журнал. – 2013. – Т. 20. – № 1. – С. 123-134.
13. А.Ю. Баранов. Энергоэффективные циклы сжижения природного газа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2016. – № 1. – С. 1-8.
14. Vink K.J., Nagelvoort R.K Comparison of baseload liquefaction processes. // International conference; 12th, Liquefied natural gas; Douzieme conference internationale & exposition sur le gaz naturel liquefie. – 1998. – Perth, Australia.
15. Bukowski J.D., Liu Yu.N., LNGDr. Pillarella M.R. at al. Natural gas liquefaction technology for floating lng facilities. // Air Products and Chemicals, Inc. Allentown. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.airproducts.com/~media/downloads/white-papers/n/en-natural-gas-liquefaction-tech-for-floating-lng-facilities.pdf>.
16. Mohd Shariq Khan a, \*, I.A. Karimi a, David A. Wood Retrospective and future perspective of natural gas liquefaction and optimization technologies contributing to efficient LNG supply: A review. // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – № 45. – P. 165-188.
17. Установки сжижения природного газа на базе детандерных азотных циклов // Технические газы. – 2010. – № 2. – С. 39-43.
18. Научно-конструкторская база, опыт разработки и производства ОАО «Криогенмаш» – совершенствованию СПГ-оборудования / И.Ф. Кузьменко, А.Л. Довбиш, К.В. Безруков и др. // Технические газы. – 2012. – № 3. – С. 17-23.
19. Каталог ПАО «Криогенмаш». – 2014. – 36 с.

20. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Криогенные комплексы отгрузки СПГ, его приема, хранения и регазификации в системе международной торговли // Технические газы. – 2010. – № 3. – С. 2-19.
21. Давыдов Д. Гигант Prelude FLNG встал на прикол на месторождении Browse. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://teknoblog.ru/2017/08/21/81412>.
22. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения / Под ред. М.П. Малкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
23. Усюкин И.П. Установки, машины и аппараты криогенной техники. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – Ч.2. – 296 с.
24. Архаров А.М. Криогенные системы / Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин В.И. – М.: Машиностроение. – 1996. – Т.1.
25. Криогенная изоляция. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.aerogel-russia.ru/poleznoe/kriogennaya-izolyaciya.html>.
26. Дьяченко Т.В., Колесник О.О. Аэрогель – перспективный материал для изготовления изоляций емкостей для транспортирования сжиженного природного газа // Холодильная техника и технология. – 2015. – Т. 51. – № 5. – С. 52-58. doi: 10.15673/0453-8307.5/2015.44796.
27. Архаров А.М. Криогенные системы / А.М. Архаров, И.В. Марфенина, В.И. Микулин. – М.: Машиностроение. – Т.2. – 1999.
28. Оборудование для производства и использования сжиженного и компримированного природного газа / Ю.Г. Жилиев, Л.М. Кельс., М.В. Подгорная и др. // Технические газы. – 2012. – № 3. – С. 36-41.
29. Оборудование для сжиженных углеводородных газов. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gazovik-lpg.ru>.
30. Ильинский А.А. Транспорт и хранение промышленных сжиженных газов. – М.: Химия, 1976. – 160 с.
31. Резервуары для хранения сжиженного газа. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lngas.ru/lng-storage/rezervuary-xranenie-spg.html>.

32. Домашенко А.М., Лапшин А.Г., Довбиш А.Л. и др. Криогенное оборудование для децентрализованного снабжения потребителей сжиженным природным газом // Технические газы. – 2010. – № 1. – С. 55-60.
33. Цветковска Л.Н., Дьяченко Т.В. Наповнення та спорожнення цистерни для кріогенної рідини. Посібник до лабораторної роботи. – Одеса: ОДАХ. – 2010. – 14 с.
34. Хасанов И.И., Шаммазов А.М., Терегулов М.К. Развитие морского транспорта сжиженный природных газов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 3. – С. 13-18.
35. Левковець П.Р. Моделі вдосконалення процесів інвестування постачальників компаній електроенергетичного сектору. – К.: Український транспортний університет. – 1999. – 147 с.
36. Платонова Е. Сжиженный газ – хорошая альтернатива // Порты Украины. – 2009. – № 86. – С. 61-62.
37. Шутенко Т.Н. Оценка состояния и перспективы развития перевозок сжиженного природного газа // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем. – 2009. – № 8. – С. 232-245.
38. Брагинский О.Б. Коридоры роста СПГ // Нефть, газ и бизнес. – 1995. – № 5. – 320 с.
39. Коваль В.А. Тенденции развития перевозок сжиженного природного газа морем // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем. – 2011. – № 18. – С. 154-164.
40. Справочник по теплообменникам: в 2 т.: [пер. с англ.] / [Под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова]. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т.1. – 560 с.
41. Григорьев В.А. Тепло- массообменные аппараты криогенной техники / В.А. Григорьев, Ю.И. Крохин. – М.: Энергия, 1982. – 311 с.
42. Промышленные тепломассообменные процессы и установки / [Под ред. А.М.Бакластова]. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 228 с.
43. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – 2-е изд.



– М.: Энергия, 1969. – 440 с.

44. Пластинчатые теплообменники – устройство, принцип работы, методика расчета. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-phe>.
45. Иванов К.А., Павлов Н.В. Атмосферные испарители высокого давления для газификации СПГ и жидких продуктов разделения воздуха // Технические газы. – 2012. – № 3. – С. 70-72.
46. Ельчинов В.П. Отечественные атмосферные испарители криогенных жидкостей. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.aparatel.ru>.

**За редакцією Т.В. Дьяченко**

# **ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ЗРІДЖЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

Підписано до друку 14.05.2017 р. Формат 60×84 1/16.

Умовн. друк. арк. х,х. Наклад х прим.

Надруковано видавничий центр ОНАХТ «Технолог».

65039, Одеса, вул. Канатна, 112