

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій  
Кафедра хімії і хімічної технології

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ А. Кустовська  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «БАКАЛАВР»

за спеціальністю: 161 «Хімічні технології та інженерія»

освітньо-професійної програми «Хімічні технології палива та вуглецевих  
матеріалів»

**Тема: «Виробництво скрапленого природного газу»**

Виконавець: студент(ка) 501Бз групи Бова Михайло Сергійович \_\_\_\_\_

Керівник: доцент, к.х.н. Новоселов Є.Ф. \_\_\_\_\_

Нормоконтролер: доцент, к.х.н. Максимюк М.Р. \_\_\_\_\_

Київ 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій  
Кафедра хімії і хімічної технології  
Спеціальність: 161 «Хімічні технології та інженерія»  
ОПП «Хімічні технології палива та вуглецевих матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ А. Кустовська  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021р.

## ЗАВДАННЯ

### на виконання кваліфікаційної роботи

Бови Михайла Сергійовича

1. Тема роботи: «Виробництво скрапленого природного газу», затверджена наказом ректора від 11.01.2021р. № 22/ст
2. Термін виконання роботи: з 04 січня 2021 р. по 28 лютого 2021 р.
3. Вихідні дані до роботи: природний газ, схеми обладнання для виробництва скрапленого природного газу, методи очистки скрапленого природного газу, криогенне зрідження скрапленого природного газу.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Розділ 1. **Ресурси природного газу.** Розділ 2. **Криогенний метод зрідження природного газу.** Розділ 3. **Транспортування зрідженого природного газу.** Висновки. Список бібліографічних посилань використаних джерел.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстраційного) матеріалу. графіки, таблиці, рисунки, технологічні схеми установок та транспортування скрапленого природного газу.

#### 6. Календарний план-графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Одержання теми. Пошук та аналіз літератури за темою дипломної роботи.	04.01.21	
2.	Опрацювання літературних джерел з теми " виробництво скрапленого природного газу "	14.01.21	
3.	Проведення літературно-аналітичних досліджень з теми" виробництво скрапленого природного газу "	05.02.21	
4.	Обробка одержаних результатів	14.02.21	
5.	Узагальнення матеріалу, оформлення дипломної роботи, підготовка доповіді та презентації.	14.02.21	
6.	Захист дипломної роботи	24.02.21	

Дата видачі завдання: « 04 » січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_ к.х.н., доц. Новоселов Є.Ф.

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Бова М.С.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: «Виробництво скрапленого природного газу» містить 59с., 12 рис., 9 табл., 22 літературних джерел.

**Мета роботи:** Виконати огляд сучасних технологій виробництва зрідженого природного газу.

**Об'єкт дослідження:** технологічні процеси виробництв зрідженого природного газу отриманого на основі кріогенного скраплення

**Предмет дослідження:** оцінити методики і процеси виробництва зрідженого природнього газу а також проблеми транспортування цьго продукту

Результати цієї роботи можна використовувати під час підбирання методик та схем технологічних процесів зрідження, а також застосовувати в навчальному процесі.

ЗРІДЖЕНИЙ ПРИРОДНИЙ ГАЗ, КРІОГЕННА ТЕХНОЛОГІЯ  
СКРАПЛЕННЯ, ПРОЦЕС ЛІНДЕ, ПРОЦЕС КЛОДА

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	<b>5</b>
<b>Розділ 1. Ресурси природного газу</b> .....	<b>8</b>
1.1. Джерела викопного природного газу .....	8
1.2. Ресурси сланцевого газу .....	11
1.3. Зріджений природний газ .....	14
1.4. Питомий вміст енергії та густина енергії СПГ .....	17
1.5. Промисловий цикл СПГ .....	18
<b>Розділ 2. Криогенний метод зрідження природного газу.</b> .....	<b>21</b>
2.1. Технологія зрідження СПГ .....	21
2.2. Зріджений природний газ (СПГ) .....	23
2.3. Процеси зрідження газів .....	23
2.4. Процес Лінде .....	25
2.5. Процес Клода .....	26
2.6. Робота турбоекспандеру .....	28
2.7. Установки зрідження .....	30
<b>Розділ 3. Транспортування скрапленого природного газу</b> .....	<b>32</b>
3.1. Морське транспортування скрапленого природного газу .....	32
3.2. Зберігання СПГ .....	33
3.3. Використання СПГ для заправлення позашляхових вантажівок .....	36
3.4. СПГ в двигунах з великим крутним моментом .....	37
3.5. Використання СПГ у морських програмах .....	40
3.6. Регазифікація .....	45
3.6. Носії СПГ .....	49
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>53</b>
<b>СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ</b> .....	<b>54</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Зріджений природний газ отримують із природного газу криогенними методами що вимагає температури  $-163^{\circ}\text{C}$ .

Це дуже енергоємний процес, хоча його ефективність значно покращилася з роками. У регіонах, де його не можна вводити в газову мережу або споживати на місці, біометан (або очищений біогаз) також може бути скрапленим, тому його іноді називають LBG для скрапленого біогазу (скрапленого біогазу) [2].

Новий попит може виникнути у галузі моторизації суден та барж на зеленому паливі цього типу [2].

Яким би не був обраний криогенний процес, зрідження природного газу вимагає значного введення механічної енергії для роботи насосів або компресорів. Таким чином, різні існуючі процеси для проведення кріоніки часто порівнюються з точки зору їх енергоспоживання, часто вираженого в кВт-год (механічний), спожитий на кг виробленого ЗПГ [3].

**Мета роботи:** Виконати огляд сучасних технологій виробництва зрідженого природного газу.

**Об'єкт дослідження:** технологічні процеси виробництв зрідженого природного газу отриманого на основі криогенного скраплення

**Предмет дослідження:** оцінити методики і процеси виробництва зрідженого природнього газу а також проблеми транспортування цього продукту

**Методи дослідження:** літературний аналіз джерел та сучасних світових тенденцій

**Практичне значення одержаних результатів:** Результати цієї роботи можна використовувати під час підбирання методик та схем технологічних процесів зрідження, а також застосовувати в навчальному процесі.

## Розділ 1. РЕСУРИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Природний газ (також званий викопним газом; іноді просто газом), є природним явищем углеводневим газ суміш, що складається в основному з метану, але зазвичай включає різну кількість інших вищих алканів, а іноді і невеликий відсоток вуглекислого газу, азоту, сірководню, або гелію. Він утворюється, коли шари розкладаються рослинних і тваринних речовин піддаються сильному нагріванню і тиску під поверхнею Землі протягом мільйонів років. Енергія, яку рослини, спочатку отримані від сонця, зберігається у вигляді хімічних зв'язків у газі. Природний газ – це викопне паливо[1].

Природний газ – це не відновлюваний вуглеводень який використовується як джерело енергії для опалення, приготування їжі та виробництва електроенергії. Він також використовується як паливо для транспортних засобів, як хімічна сировина при виробництві пластмаси та інші комерційно важливих органічних хімічних речовин.

Видобуток та споживання природного газу є основним і зростаючим фактором зміни клімату. Це сильнодіючий парниковий газ, потрапляючи в атмосферу, і створює вуглекислий газ коли обгоріла. Природний газ можна ефективно спалювати для отримання тепла та електрики; що виділяють менше відходів та токсинів у місці використання щодо інших викопних речовин та біопалива. Однак видалення газу і спалювання, поряд з ненавмисними вимикачі викиди по всьому ланцюг поставок, може призвести до подібного вуглецевий слід загалом.

Природний газ знаходиться в глибоких підземних гірських породах або пов'язаний з іншими вуглеводневими колекторами як у Росії вугільні шари як метан-клатрати. Нафта це ще один ресурс та викопне паливо, знайдене поблизу природного газу та з ним. Більшість природного газу створювалось з часом двома механізмами: біогенним та термогенним. Біогенний газ створюється метаногенними організми в болотах ,звалищах , і неглибоких

відкладення. Глибше в землі, при більшій температурі та тиску, з похованого органічного матеріалу створюється термогенний газ[2].

При видобутку нафти газ іноді спалюється як факельний газ. Перш ніж природний газ можна використовувати як паливо, більшість, але не всі, повинні бути оброблені: видаляти домішки, включаючи воду, щоб відповідати вимогам товарного природного газу. Побічні продукти цієї переробки включають етан, пропан, бутани, пентани та вуглеводні з більшою молекулярною масою, сірководень (який може бути перетворений у чисту сірку), вуглекислий газ, водяну пару, а іноді гелій і азот.

Природний газ був виявлений випадково в Стародавньому Китаї, оскільки він був результатом буріння в розсоли. Вперше природний газ був використаний китайцями приблизно в 500 р. До н. Е. (Можливо, навіть у 1000 р. До н. Е.). Вони виявили спосіб транспортувати газ, що просочується з землі в сирих трубопроводах бамбука туди, де він використовувався для кип'ятіння солоної води до витягнуті сіль в Район Зілюджінгз Сичуань.

Відкриття та ідентифікація природного газу в Америці відбулося в 1626 році. У 1821 році Вільям Харт успішно викопав першу свердловину природного газу в Фредонія, Нью-Йорк, США, що призвело до утворення компанії Fredonia Gas Light Company. Місто Філадельфія створив перше муніципальне підприємство з розподілу природного газу в 1836 році.

### **1.1. Джерела викопного природного газу**

До 2009 року було використано 66 000 км<sup>3</sup> (або 8%) із загальної кількості 850 000 км<sup>3</sup> (200 000 куб. Миль) передбачуваних залишкових запасів природного газу, що відновлюються. Виходячи із прогнозованого в 2015 році рівня світового споживання близько 3400 км<sup>3</sup> (815 куб. Миль) газу на рік, загальна оцінка залишків економічно відновлюваних запасів природного газу триватиме 250 років за нинішніх норм споживання. Щорічне збільшення



використання на 2-3% може призвести до того, що відновлювані в даний час запаси тривають значно менше, можливо, від 80 до 100 років[3].

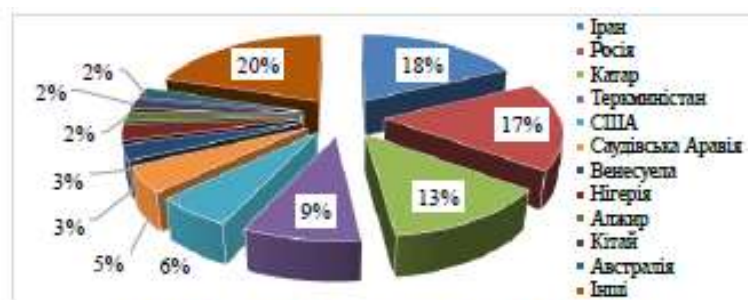


Рис. 3.1. Розподіл світових запасів ПГ на 2015 рік [2]

У 19 столітті природний газ в основному отримували як побічний продукт видобутку нафти. Малі, легкі газові вуглецеві ланцюги виходили з розчину, коли видобуті рідини зазнавали зниження тиску від сховище на поверхню, подібно до відкриття пляшки безалкогольного напою, де знаходиться вуглекислий газ шипить. Газ часто розглядали як побічний продукт, небезпечну та проблему утилізації на активних родовищах нафти. Вироблені великі обсяги не могли бути використані до відносних витрат трубопроводів із берігання були побудовані споруди для доставки газу на споживчі ринки.

До початку 20-го століття більшість природного газу, пов'язаного з нафтою, або просто виділялося, або згоріла на родовищах нафти. Відведення газу і факельне згорання все ще практикуються в сучасний час, але в усьому світі тривають зусилля щодо їх виведення та заміни їх іншими комерційно життєздатними та корисними альтернативами. Небажаний газ (або багатожильний газ\_без ринку) часто повертається у водосховище з "нагнітальними" свердловинами в очікуванні можливого майбутнього ринку або для повторного тиску пласта, що може збільшити швидкість видобутку нафти з інших свердловин. У регіонах з високим попитом на природний газ (наприклад, США) трубопроводи\_будуються тоді, коли економічно доцільно транспортувати газ із місця свердловини до кінцевого споживача.

На додаток до транспортування газу по трубопроводах для використання у виробництві електроенергії, інші кінцеві види використання природного газу включають експорт як скраплений природний газ (ЗПГ) або перетворення природного газу в інші рідкі продукти через газ для рідин(GTL) технології. Технології GTL можуть перетворювати природний газ у рідкі продукти, такі як бензин, дизель або реактивне паливо. Розроблено різноманітні технології GTL, в тому числі Фішер – Тропш (F – T), метанол до бензину (MTG) та синтезатор до бензину плюс (STG +). F – T виробляє синтетичну сировину, яку можна додатково переробляти в готову продукцію, тоді як MTG може виробляти синтетичний бензин із природного газу. STG + може виробляти бензин, дизельне паливо, реактивне паливо та ароматичні хімічні речовини, що потрапляють безпосередньо з природного газу, за допомогою одноконтурного процесу. У 2011 р. Royal Dutch Shell's 140 000 барелів (22 000 м<sup>3</sup>) на добу F-T установка запрацювала в Катарі.

Природний газ може бути "асоційованим" (зустрічається в нафтових родовищах), або "неасоційований" (виділений в родовищах природного газу), а також зустрічається в вугільні шари (як метан з вугільних шарів). Він іноді містить значну кількість етан, пропан, бутан, і пентан- важчі вуглеводні, вилучені для комерційного використання до метан продається як споживче паливо або хімічна сировина для рослин. Невуглеводні, такі як вуглекислий газ, азоту, гелій(рідко), і сірководень його також слід видалити перед транспортуванням природного газу.

Природний газ, що видобувається з нафтових свердловин, називається обсадочним газом (незалежно від того, чи справді він продукується затрубним простором та через вихідний отвір з обсадної труби) або супутнім газом. галузь природного газу видобуває дедалі більшу кількість газу з проблемних типи ресурсів: кислий газ, щільний газ, сланцевий газ, і метан з вугільних шарів.

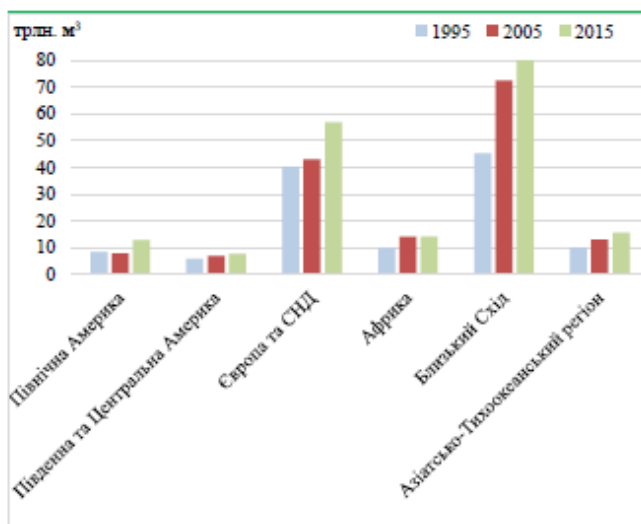


Рис. 3.2. Розподіл доведених запасів природного газу в 1995, 2005 і 2015 роках по регіонах [5]

Існує певна незгода щодо того, яка країна має найбільші розвідані запаси газу[4]. Джерела, які вважають, що Росія на сьогодні має найбільші розвідані запаси, включають ЦРУ США (47 600 км<sup>3</sup>), Управління енергетичної інформації США (47 800 км<sup>3</sup>), та ОПЕК (48 700 км<sup>3</sup>). Однак ВР надає Росії лише 32 900 км<sup>3</sup>, що поставило б його на друге місце, трохи відставши від Ірану (33 100 - 33 800 км<sup>3</sup>, залежно від джерела). С Газпром, Росія часто є найбільшим у світі видобувачем природного газу. Основними перевіреними ресурсами (у кубічних кілометрах) є 187 300 (2013), Іран 33 600 (2013), Росія 32 900 (2013), Катар 25 100 (2013), Туркменістан 17 500 (2013) та США 8500 (2013).

Країни за підтверджені запаси природного газу (2014), на основі даних The World Factbook

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

За підрахунками, існує близько 900 000 км<sup>3</sup> "нетрадиційного" газу, такого як сланцевий газ, з яких 180 000 км<sup>3</sup> може бути видобути. У свою чергу, багато досліджень з MIT, Black & Veatch та ДОУпрогнозують, що природний газ буде приносити більшу частину виробництва електроенергії та тепла в майбутньому.

Найбільше у світі газове родовище - це офшор Південний Парс / Північно-купольне газоконденсатне родовище, який ділиться між Іраном та Катаром. За оцінками, у нього 51 000 кубічних кілометрів (12 000 куб. Миль) природного газу та 50 млрд. Барелів (7,9 млрд. Кубічних метрів) конденсату природного газу.

## 1.2. Ресурси сланцевого газу

Оскільки природний газ не є чистим продуктом, оскільки тиск у пласті падає при видобуванні неасоційованого газу з родовища надкритичний(тиск / температура) компоненти з вищою молекулярною масою можуть частково конденсуватися при ізотермічному розгерметизації - ефект, який називається ретроградна конденсація. Утворена таким чином рідина може потрапити в пастку, коли пори газового резервуара вичерпуються. Одним із методів

вирішення цієї проблеми є повторне закачування висушеного газу, вільного від конденсату, для підтримання підземного тиску та забезпечення можливості повторного випаровування та вилучення конденсатів. Частіше рідина конденсується на поверхні, і це одне із завдань газовий завод полягає у збиранні цього конденсату. Отримана рідина називається рідиною природного газу (NGL) і має комерційну цінність.

### Сланцевий газ

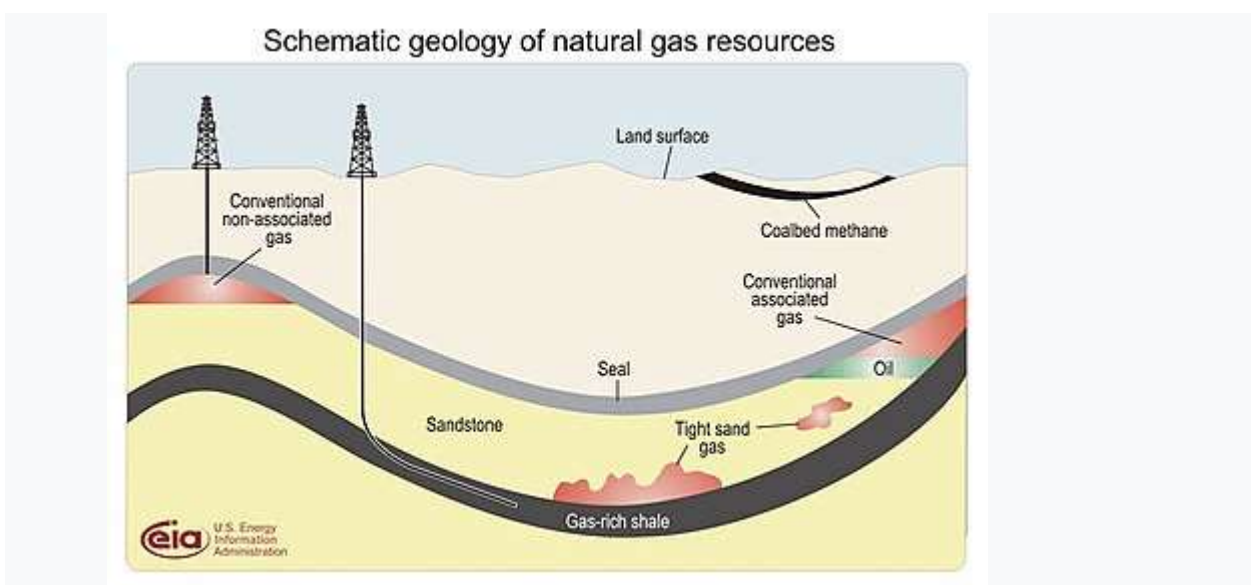


Рис. 1.1. Місцезнаходження сланцевого газу порівняно з іншими видами родовищ газу

Сланцевий газ - це природний газ, що отримується з сланцю. Оскільки сланцева проникність матриці є занадто низькою, щоб газ міг текти в економічних кількостях, свердловини для сланцевого газу залежать від руйнувань, щоб забезпечити газу течію. Ранні сланцеві газові свердловини залежали від природних руйнувань, через які протікав газ; майже всі свердловини сланцевого газу сьогодні потребують тріщин, штучно створених гідророзрив пласта. З 2000 року сланцевий газ став основним джерелом природного газу в США та Канаді. Через збільшення видобутку сланцевого газу Сполучені Штати були в 2014 році виробником природного газу номер

один у світі[5]. Висудбуток сланцевого газу в США було описано як "революцію сланцевого газу" і як "одну із знакових подій у 21 столітті".

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
Іорданія	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		

Після збільшення видобутку в США розпочинається розвідка сланцевого газу в таких країнах, як Польща, Китай та Південна Африка. Китайські геологи визначили Басейн Сичуань як перспективну ціль для буріння сланцевого газу, через схожість сланців до тих, що виявилися продуктивними в США. Видобуток із свердловини Wei Wei 201 становить  $1 \times 10^4 - 2 \times 10^4$  м<sup>3</sup> на добу. Наприкінці 2020 року Китайська національна нафтова корпорація вимагала щоденного видобутку 20 мільйонів кубометрів газу з демонстраційної зони Чаннін-Вейюань.

Хоча Польща має перспективні родовища сланцевого газу, а Польський геологічний інститут оцінює видобувні запаси десь між 350 млрд. 770 млрд.

Куб. М., До 2013 року не було видобуто газу, а значні інфраструктурні, політичні та регуляторні проблеми можуть заважати розвитку.

Головний басейн Кару в Південній Африці визначений можливим ресурсом сланцевого газу, за попередніми оцінками запасів сланцевого газу  $0,4-11 \times 10^9$  м<sup>3</sup>. Однак випробувальні свердловини показали, що органічна речовина в найбільш перспективному пласті, групі Екка, є зрілою, що означає, що органічний вуглець вже виділився з водню і залишається мало потенціалу. Зараз резерви переглянуто на рівні  $0,4 \times 10^9$  м<sup>3</sup>, що є нижчим кінцем початкових оцінок, хоча це не незначно Зріджений природний газ

### **1.3. Зріджений природний газ**

**Зріджений природний газ (СПГ)** є природний газ (переважно метан,  $\text{CH}_4$ , з деякою сумішшю етану,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ), який охолодили до рідкої форми для зручності та безпеки зберігання або транспортування без тиску [6]. Він займає приблизно  $1/600$  обсягу природного газу в газоподібному стані (при стандартні умови температури та тиску). це є без запаху, безбарвний, нетоксичний і некорозійний. Небезпеки включають горючість після випаровування в газоподібний стан, замерзання та асфіксія. Зрідження процес передбачає видалення певних компонентів, таких як пил, кислотні гази, гелій, води та важких вуглеводні, що може спричинити труднощі нижче за течією. Тоді природний газ ущільнений у рідину, близьку до атмосферного тиску, охолоджуючи її приблизно до  $-162^\circ \text{C}$  ( $-260^\circ \text{F}$ ); максимальний транспортний тиск встановлюється на рівні близько 25 кПа (4 psi).

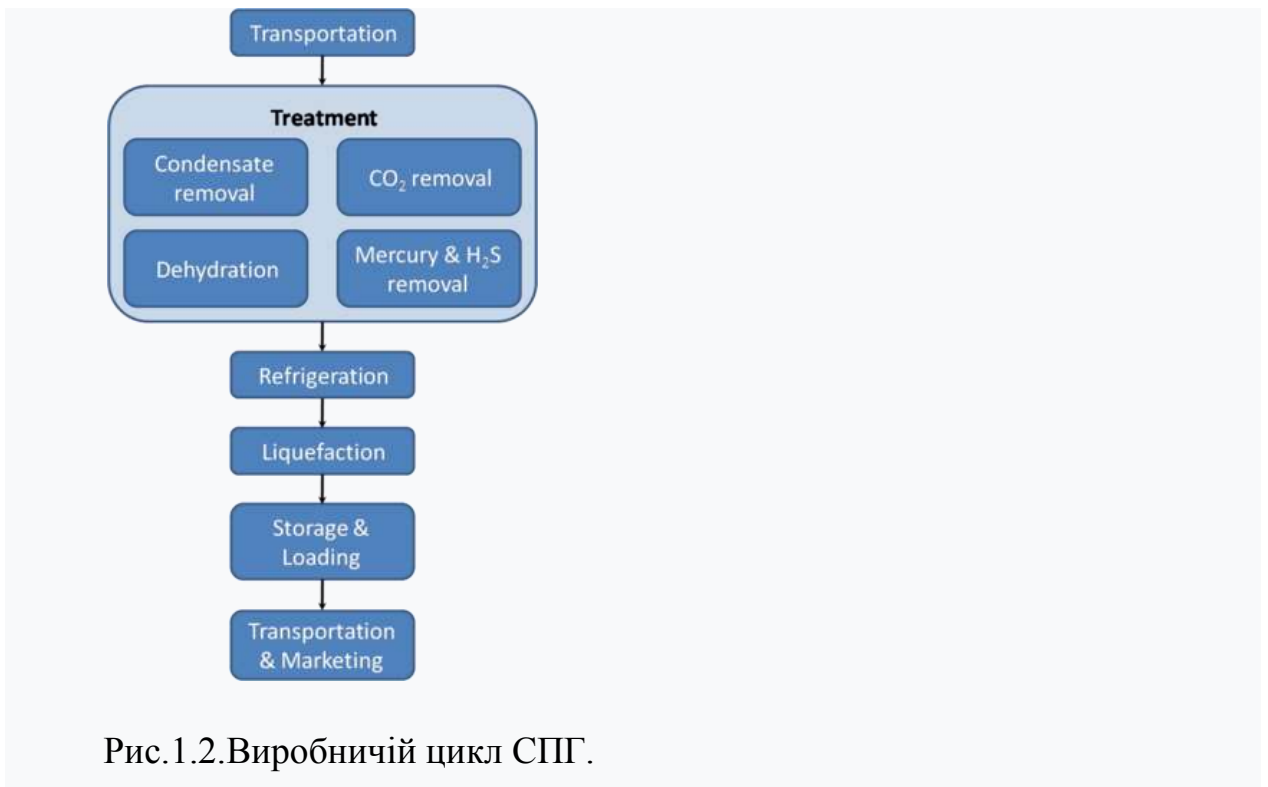


Рис.1.2.Виробничий цикл СПГ.

Газ, що видобувається з родовищ вуглеводнів, зазвичай містить широкий спектр вуглеводневих продуктів, що зазвичай включає метан ( $\text{CH}_4$ ), етан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ),пропан( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) та бутан( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ). Всі ці продукти мають широкі температури кипіння, а також різні значення нагрівання, що дозволяє різні шляхи до комерціалізації, а також різне використання. "Кислі" елементи, такі як сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ) та вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), разом з нафтою, брудом, водою та ртуттю видаляються з газу, забезпечуючи чистий підсолоджені потік газу[7]. Невидалення таких кислотних молекул, ртуті та інших домішок може призвести до пошкодження обладнання. Корозія сталевих труб та змішування ртуті з алюмінієм у криогенних теплообмінниках може спричинити дорогу шкоду.

Потік газу, як правило, розділяється на фракції зрідженої нафти (бутан і пропан), які можуть зберігатися у рідкій формі при відносно низькому тиску, і на більш легкі фракції етану та метану. Потім ці більш легкі фракції метану та етану зріджуються, складаючи основну частину СПГ, що транспортується.

Природний газ вважався економічно неважливим там, де нафтогазовидобувні родовища, що виробляють газ, були віддалені від



газопроводів або розташовані в морських місцях, де трубопроводи були нежиттєздатними. У минулому це зазвичай означало, що природний газ, як правило, спалюється, тим більше, що на відміну від нафти не існувало жодного життєздатного способу зберігання або транспортування природного газу, крім трубопроводів, які вимагали негайного використання кінцевими споживачами того самого газу. Це означало, що ринки природного газу в історичному плані були повністю місцевими, і будь-яке виробництво повинно споживатися в межах місцевої мережі.

Розвиток виробничих процесів, криогенне зберігання та транспортування ефективно створили інструменти, необхідні для комерціалізації природного газу на світовому ринку, який зараз конкурує з іншими видами палива. Крім того, розвиток сховища СПГ також забезпечив надійність мереж, що раніше вважалося неможливим. З огляду на те, що зберігання інших видів палива порівняно легко забезпечується за допомогою простих резервуарів, запас на кілька місяців може зберігатися на зберіганні. З появою великомасштабних криогенних сховищ вдалося створити довгострокові запаси зберігання газу. Ці запаси скрапленого газу можуть бути використані в будь-який момент за допомогою процесів регазифікації, і сьогодні вони є основним засобом для мереж для задоволення місцевих потреб пікового гоління.

Поява комерційного ринку ЗПГ, в основному транспортування за моря, з місць, де родовища газу перевищують місцевий попит на трубопроводи, призвело до величезної комерційної можливості[8]. Зазвичай це економічна стратегія, яка проводиться, особливо там, де трубопровідна інфраструктура є або технічно та економічно нежиттєздатною. СПГ досягає більшого зменшення обсягу, ніж стиснений природний газ(CNG) так, щоб (об'ємна) щільність енергії ЗПГ в 2,4 рази більше, ніж у СПГ (при 200 бар), або в 60 відсотків дизельне паливо. Це робить СПГ економічним у морському транспорті на великі відстані. Однак Судна для перевезення СПГ може

використовуватися економно на середніх відстанях у морському транспорті. Спеціально розроблений криогенний морські судна (Носії СПГ) або криогенні автоцистерни використовуються для транспортування СПГ. СПГ в основному використовується для транспортування природного газу до ринків, де він є регазований і розподіляється як трубопровідний природний газ. Його можна використовувати в транспортні засоби на природному газі, хоча частіше розробляти транспортні засоби для використання СПГ. Відносно висока вартість виробництва СПГ та необхідність зберігати його у дорогих криогенних резервуарах перешкоджають широкому комерційному використанню. Незважаючи на ці недоліки, до 2020 р., Як очікується, виробництво СПГ досягне 10% світового виробництва сировини (див.СПГ торгівля).

#### **1.4. Питомий вміст енергії та густина енергії СПГ**

Значення теплової енергії залежить від джерела газу, який використовується, та процесу, який використовується для зрідження газу. Діапазон значення нагрівання може становити +/- 10-15 відсотків. Типове значення вища тепла потужність ЗПГ становить приблизно 50 МДж / кг або 21 500 БТЕ / фунт. Типове значення нижча тепла потужність ЗПГ становить 45 МДж / кг або 19 350 БТЕ / фунт. [9]

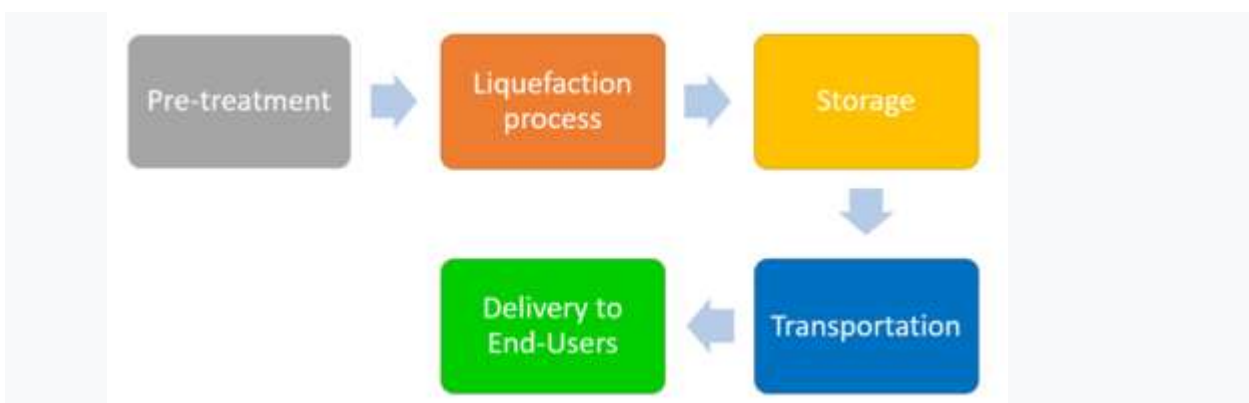
Для порівняння різних видів палива значення нагрівання може бути виражене як енергія на об'єм, яка відома як щільність енергії виражається в МДж / літр. Щільність СПГ становить приблизно 0,41 кг / літр до 0,5 кг / літр, залежно від температури, тиску та складу, порівняно з водою 1,0 кг / л. Використовуючи середнє значення 0,45 кг / літр, типовими значеннями щільності енергії є 22,5 МДж / літр (на основі вищої теплової потужності) або 20,3 МДж / літр (на основі нижчої теплової потужності).

Щільність енергії (на основі обсягу) СПГ приблизно в 2,4 рази більша за СПГ, що робить економічним транспортування природного газу на судні у формі СПГ. Щільність енергії СПГ порівнянна з пропан і етанол але становить лише 60 відсотків від дизель і 70 відсотків від бензин.

Перше широкомасштабне зрідження природного газу в США відбулося в 1918 році, коли уряд США скрапив природний газ як спосіб видобутку гелію, який є невеликим компонентом деякого природного газу. Цей гелій був призначений для використання в британських дирижаблях для Першої світової війни. Рідкий природний газ (СПГ) не зберігався, а регазувався та негайно потрапляв у газопровід.

Існує два процеси зрідження природного газу у великих кількостях. Перший - це процес каскаду, при якому природний газ охолоджується іншим газом, який, у свою чергу, охолоджується ще одним газом, отже, названий "каскадним" процесом. Зазвичай існує два цикли каскаду до циклу рідкого природного газу. Інший метод -Процес Лінде, з варіацією процесу Лінде, яка називається процесом Клода, і яка іноді використовується. У цьому процесі газ охолоджується регенеративним шляхом, постійно пропускаючи його через отвір, поки він не охолоне до температури, при якій він зріджується. Охолодження газу шляхом його розширення через отвір було розроблено Джеймсом Джоулем та Вільямом Томсоном і відоме як Ефект Джоуля – Томсона. Лі Твомі використовував каскадний процес для своїх патентів.

## 1.5. Промисловий цикл СПГ



Промисловий цикл СПГ.

Процес починається з попередньої обробки вихідної сировини природного газу, що надходить у систему для видалення домішок, таких як  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ , ртуть і вищою ланцюгом вуглеводні. Потім вихідний газ надходить у блок зрідження, де він охолоджується до  $-145^{\circ}C$  і  $-163^{\circ}C$ . Хоча тип або кількість циклів нагрівання та / або холодоагенти Використовуваний може варіюватися залежно від технології, основний процес включає циркуляцію газу через алюмінієві трубкові котушки та вплив стисненого холодоагенту. У міру випаровування холодоагенту теплообмін призводить до охолодження газу в котушках. Потім ЗПГ зберігається у спеціалізованому подвійному стіновому теплоізолюваному резервуарі в атмосферний тиск готовий до транспортування до кінцевого пункту призначення[10].

Більшість світових СПГ транспортуються наземним транспортом на вантажівках / причепах, призначених для криогенній температури. Ці блоки складаються з внутрішнього відділення із сталі або алюмінію та зовнішнього відділення з вуглецю або сталі з вакуумною системою між ними для зменшення кількості теплопередачі. Опинившись на місці, СПГ потрібно зберігати у вакуумній ізоляції або з рівним дном резервуари для зберігання. Коли СПГ готовий до розподілу, він надходить у регазифікація установка, де його закачують у випарник та нагрівають назад до газоподібної форми. Потім

газ надходить у систему розподілу трубопроводів і доставляється кінцевому споживачу.

## **Виробництво СПГ**

Природний газ, що подається на завод СПГ, оброблюють для видалення води, сірководень, вуглекислий газ та інші компоненти, які будуть заморозити (наприклад бензол) при низьких температурах, необхідних для зберігання, або можуть бути руйнівними для установки для зрідження. ЗПГ зазвичай містить більше 90% метан. Він також містить невелику кількість етан, пропан, бутан, деякі важчі алкани і азот. Процес очищення може бути розроблений таким чином, щоб отримати майже 100% метан. Одним із ризиків ЗПГ є вибух швидкого фазового переходу (RPT), що виникає при контакті холодного СПГ та води.

### ***Малі установки зрідження***



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

Малі заводи для зрідження підходять для піків на трубопроводах природного газу, транспортуванні палива або для доставки природного газу у віддалені райони, не пов'язані з трубопроводами. Вони, як правило, мають компактні розміри, подаються з трубопроводу природного газу і розташовані поблизу місця, де буде використовуватися СПГ. Ця близькість зменшує транспортні витрати та витрати на СПГ для споживачів. Це також дозволяє

уникнути додаткових викидів парникових газів, що утворюються під час тривалого транспортування[11].

Невеликий завод з зрідженого природного газу також дозволяє локалізованим пікам - збалансувати доступність природного газу під час високого та низького періодів попиту. Це також дозволяє громадам, які не мають доступу до газопроводів природного газу, встановлювати локальні розподільчі системи та забезпечувати їх зберіганням СПГ.

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 	25	35	50	80	12
	б) з кільцевою огорожею 	30	35	45	60	80

## **Розділ 2. КРІОГЕННИЙ МЕТОД ЗРІДЖЕННЯ ПРИРОДОГО ГАЗУ.**

### **2.1. Технологія зрідження СПГ**

---

Існує декілька процесів зрідження, доступних для великих заводів із ЗПГ із базовим навантаженням (у порядку поширеності):

1. AP-C3MR – розроблений Air Products & Chemicals, Inc., (APCI)
2. Каскад - розроблений ConocoPhillips
3. AP-X – розробник Air Products & Chemicals, Inc. (APCI)
4. AP-SMR (Single Mixed Refrigerant) – розроблений Air Products & Chemicals, Inc. (APCI)
5. AP-N (Nitrogen Refrigerant) – Air Products & Chemicals, Inc. (APCI)
6. MFC (змішаний рідинний каскад) – розроблений Linde [12]
7. PRICO (SMR) - розроблений компанією Black & Veatch
8. AP-DMR (подвійний змішаний холодоагент) – розроблений Air Products & Chemicals, Inc. (APCI)
9. Liquefin – розробник Air Liquide

Станом на січень 2016 року глобальна номінальна потужність зрідження СПГ становила 301,5 МТРА (мільйон тонн на рік), а споруджувана потужність зрідження - 142 МТРА.

Більшість із цих циклів використовують або APCI AP-C3MR, або технологію Cascade для процесу зрідження. Інші процеси, що використовуються на невеликій більшості деяких скраплених установок, включають технологію DMR (подвійний змішаний холодоагент) від Shell та технологію Linde.

Технологія APCI є найбільш часто використовуваним процесом зрідження на заводах, що працюють на СПГ: із 100 циклів для зрідження, що

перебувають на стадії будівництва або перебувають у стадії будівництва, 86 циклів загальною потужністю 243 МТРА спроектовано на основі процесу APCI. Процес Philips Cascade - другий за частотою використання, який використовується в 10 поїздах загальною потужністю 36,16 МТРА. Процес DMR Shell застосовувався у трьох поїздах загальною потужністю 13,9 МТРА; і, нарешті, процес Linde / Statoil використовується в одному поїзді Snohvit 4.2 МТРА.

## **2.2. Зріджений природний газ (СПГ)**

---

Зріджений природний газ (ЗПГ) - рідка форма природного газу при криогенній температурі  $-160^{\circ}\text{C}$ . Коли природний газ перетворюється на СПГ, його об'єм зменшується приблизно в 600 разів. Це зменшення обсягу дозволяє економічно транспортувати газ на великі відстані[13].

За останні 30 років склалася значна світова торгівля СПГ. Сьогодні СПГ представляє важливу складову енергоспоживання багатьох країн і був вигідний як країнам, що експортують, так і їх партнерам з енергетичних компаній. Загальна потужність виробництва СПГ станом на 2001 рік становить приблизно 106 мільйонів тонн на рік. На СПГ припадає лише 4% загального споживання газу, але 25% газу, що торгується на міжнародному рівні. Азія залишається домінуючим гравцем на світовому ринку СПГ як як імпортер, так і експортер. Японія є найбільшим у світі імпортером СПГ, маючи 53% загальних виробничих потужностей.<sup>[1]</sup> Індонезія є найбільшою країною-експортером, з 27% всього експорту.



У 1914 році Годфрі Кабот запатентував річкову баржу для переробки та транспортування скрапленого газу. Вже в 1917 р. В США для видобутку гелію застосовували розрідження. Однак лише в 1959–60 рр. Перероблене вантажне судно «Метан Піонер» вперше продемонструвало техніку транспортування насипного ЗПГ, успішно та безпечно перевозячи сім вантажів СПГ від озера Чарльз, штат Луїзіана, США, до острова Канві в Великобританія Перший комерційний завод з зрідженого природного газу в Алжирі запрацював у 1964 році та експортував СПГ у Західну Європу. В даний час у 12 країнах є установки зрідження з 64 поїздами СПГ, а 38 приймальних терміналів працюють у 10 країнах.<sup>[2]</sup>

### 2.3. Процеси зрідження газів

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, моль/моль	0,0708	0,0808	0,0871	0,1183	0,1065	0,1977	0,8079

Зрідження газів - це фізичне перетворення газу в рідкий стан (конденсація). Зрідження газів - це складний процес, який використовує різні стиснення та розширення для досягнення високого тиску та дуже низьких температур, використовуючи, наприклад, турборозширювачі.

Процеси зрідження використовуються в наукових, промислових та комерційних цілях. Багато газів можна перевести в рідкий стан при нормальному атмосферному тиску простим охолодженням; деякі, такі як вуглекислий газ, також потребують наддуву.

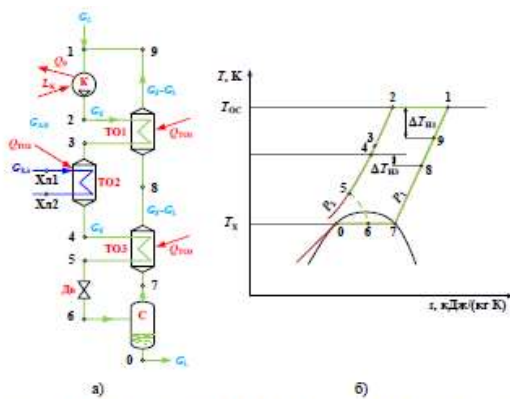


Рис. 4.2. а) Система Лінде-Хемпсона з попереднім охолодженням: К – компресор; ТО – теплообмінний апарат; Дв – дросельний вентиль; С – сепаратор;  $L_k$  – витрачається робота зі стиснення газу,  $Q_k$  – сумарний потік енергії від системи;  $Q_{TO}$  – теплоприток до теплообмінного апарату;  $G_L$  –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

Зрідження використовується для аналізу основних властивостей молекул газу (міжмолекулярних сил) або для зберігання газів, наприклад: зрідженого газу, а також для охолодження та кондиціонування. Там газ скраплюється в конденсаторі, де виділяється теплота випаровування, і випаровується у випарнику, де тепло випаровування поглинається. Аміак був першим таким холодоагентом і все ще широко використовується в промисловому холодильному виробництві, проте його в основному замінили сполуками, отриманими з нафти та галогенів у побутових та комерційних цілях.

Рідкий кисень надається лікарням для перетворення на газ для пацієнтів з проблемами дихання, а рідкий азот використовується в медичній галузі для кріохірургії, осіменівачами для заморожки сперми, а також польовими та лабораторними вченими для збереження зразків. Зріджений хлор транспортується для розчину у воді, після чого використовується для очищення води, санітарії промислових відходів, стічних вод та басейнів, відбілювання целюлози та текстилю та виробництва чотирихлористого вуглецю, гліколю та багатьох інших органічних сполук, а також фосгену газ.

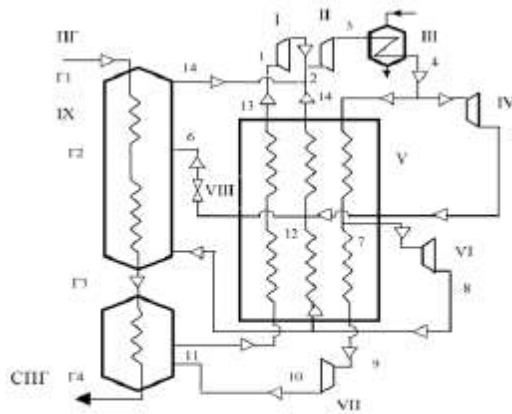


Рис 4.9. Зріджувач природного газу з рефрижератором на базі азотного детандерного циклу [16, 17]

Зрідження гелію ( $4\text{He}$ ) за допомогою попередньо охолодженого циклу Гампсона – Лінде призвело до Нобелівської премії Хайке Камерлінгх Оннесу в 1913 році. При навколишньому тиску температура кипіння зрідженого гелію становить  $4,22\text{ K}$  ( $-268,93\text{ }^\circ\text{C}$ ). Нижче  $2,17\text{ K}$  рідини  $4\text{He}$  стає надрідкою (Нобелівська премія 1978, Петро Капіца) і виявляє такі властивості, як теплопровідність через другий звук, нульова в'язкість та ефект фонтану[13].

Зрідження повітря використовується для отримання азоту, кисню, аргону та інших атмосферних благородних газів шляхом розділення компонентів повітря фракційною перегонкою при кріогенному відділенні повітря

#### 2.4. Процес Лінде

Гази зріджуються за допомогою процесу Лінде, при якому повітря по черзі стискається, охолоджується і розширюється, кожне розширення призводить до значного зниження температури. При нижчій температурі молекули рухаються повільніше і займають менше місця, тому повітря змінює фазу і стає рідким.

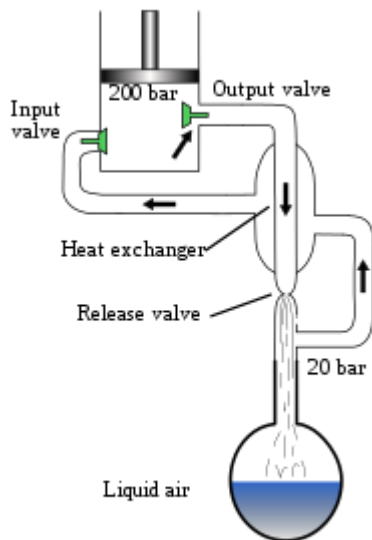
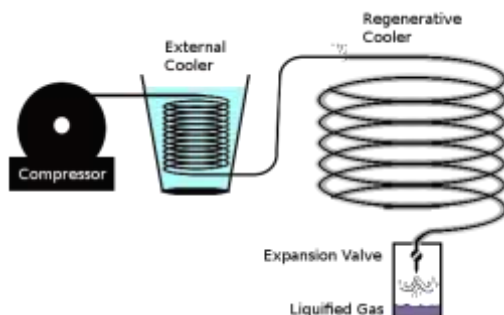


Схема процесу Лінде

## 2.5. Процес Клода

Повітря також може зріджуватися за допомогою процесу Клода, при якому газу дозволяється двічі ізоентропічно розширюватися в двох камерах. Розширюючись, газ повинен виконувати роботу, оскільки його ведуть через розширювальну турбіну. Газ ще не рідкий, оскільки це призведе до руйнування турбіни. Комерційні установки зрідження повітря обходять цю проблему, розширюючи повітря при надкритичному тиску. Остаточне зрідження відбувається шляхом ізоентальпічного розширення в терморозширювальному клапані.

### Процес Лінде:



Цикл охолодження по Лінде триває в кілька етапів[14]:

1) Газ стискається, що додає в газ зовнішню енергію, щоб надати йому те, що потрібно для проходження циклу. Патент США Лінде наводить приклад із низьким боковим тиском 25 стандартних атмосфер (370 фунтів на квадратний дюйм; 25 бар) і високим бічним тиском 75 стандартних атмосфер (1100 фунтів на квадратний дюйм; 76 бар).

2). Потім газ високого тиску охолоджується зануренням газу в більш прохолодне середовище; газ втрачає частину енергії (тепла). Патентний приклад Linde наводить приклад розсолу при 10 ° C.

3). Газ високого тиску додатково охолоджується протитоковим теплообмінником; охолоджуючий газ, що виходить з останньої стадії, охолоджує газ, що йде до останньої стадії.

4). Далі газ охолоджується шляхом пропускання газу через отвір Джоуля – Томсона (розширювальний клапан); зараз газ знаходиться під нижчим тиском.

5). Нацьому етапі газ із низьким тиском є найхолоднішим у поточному циклі.

6). Частина газу конденсується і стає вихідним продуктом.

7). Газ низького тиску направляється назад до теплообмінника проти струму для охолодження теплого газу високого тиску, що надходить.

8). Після виходу з протиточного теплообмінника газ стає теплішим, ніж був у найхолоднішому, але прохолодніший, ніж починався на етапі 1.

9). Газ відправляється назад до компресора, змішується з теплим вхідним підпиточним газом (для заміни конденсованого продукту) і повертається до компресора, щоб здійснити чергову поїздку через цикл (і стати ще холоднішим).

У кожному циклі чистого охолодження більше, ніж тепла, доданого на початку циклу. Коли газ проходить більше циклів і стає холоднішим, досягнення нижчих температур на розширювальному клапані (у турбоекспандер) істає важчим.

## 2.6. Робота турбоекспандеру

Турбоекспандер, який також називають турбодетандером або розширювальною турбіною, - це відцентрова турбіна або турбіна з осьовим потоком, за допомогою якої газ високого тиску розширюється для отримання роботи, яка часто використовується для приводу компресора або генератора.

Оскільки робота витягується з розширюваного газу високого тиску, розширення апроксимується ізентропним процесом (тобто процесом з постійною ентропією), а відпрацьований газ низького тиску з турбіни знаходиться при дуже низькій температурі,  $-150^{\circ}\text{C}$  або менше, залежно від робочого тиску та властивостей газу. Часткове зрідження розширеного газу не рідкість.

Турбодетандери широко використовуються як джерела охолодження в промислових процесах, таких як вилучення етану та природних газових рідин (НГЛ) із природного газу, зрідження газів (таких як кисень, азот, гелій, аргон та криптон) та інші низькотемпературні процеси.

Розміри турборозширювачів, що експлуатуються в даний час, становлять приблизно від 750 Вт до 7,5 МВт (від 1 к. С. До 10000 К.)

Хоча турборозширювачі зазвичай використовуються в низькотемпературних процесах, вони використовуються в багатьох інших процесах. Наприклад у добування вуглеводневих рідин із природного газу

В даному процесі іррий природний газ складається переважно з метану ( $\text{CH}_4$ ), найкоротшої та найлегшої молекули вуглеводнів, а також різної кількості важчих вуглеводневих газів, таких як етан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), звичайний бутан ( $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ ), ізобутан ( $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ ), пентани і навіть вуглеводні з

вищою молекулярною масою. Сирий газ також містить різну кількість кислих газів, таких як діоксид вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ) та меркаптани, такі як метантиол ( $\text{CH}_3\text{SH}$ ) та етантиол ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$ ).

При переробці на готові побічні продукти ці важчі вуглеводні в сукупності позначаються як NGL (рідини природного газу). Для вилучення NGL часто використовується турбодетандер та низькотемпературна дистиляційна колона (так звана деметанізатор), як показано на малюнку.

Вхідний газ до деметанізатора спочатку охолоджується до приблизно  $-51\text{ }^\circ\text{C}$  в теплообміннику (іменованому холодною коробкою), що частково конденсує вхідний газ. Потім отриману газорідинну суміш поділяють на потік газу та потік рідини.

Потік рідини з сепаратора газ-рідина протікає через клапан і зазнає дросельного розширення від абсолютного тиску від 62 бар до 21 бар (6,2-2,1 МПа), що є процесом ізентальпічного (тобто процесом з постійною ентальпією), призводить до зниження температури потоку приблизно з  $-51\text{ }^\circ\text{C}$  до приблизно  $-81\text{ }^\circ\text{C}$ , коли потік потрапляє в деметанізатор.

Потік газу з газорідинного сепаратора потрапляє в турбодетандер, де він зазнає ізентропного розширення від абсолютного тиску від 62 бар до 21 бар (6,2-2,1 МПа), що знижує температуру газового потоку приблизно з  $-51\text{ }^\circ\text{C}$  приблизно до  $-91\text{ }^\circ\text{C}$  при надходженні в деметанізатор, який служить дистиляційним зворотним холодильником.

Рідина з верхнього лотка деметанізатора (приблизно при  $-90\text{ }^\circ\text{C}$ ) проходить через холодну коробку, де нагрівається до приблизно  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , охолоджуючи вхідний газ, а потім повертається в нижню секцію деметанізатора. Інший потік рідини з нижньої секції деметанізатора (при температурі близько  $2\text{ }^\circ\text{C}$ ) проходить через холодильну коробку і повертається в деметанізатор приблизно при  $12\text{ }^\circ\text{C}$ .

Фактично вхідний газ забезпечує тепло, необхідне для «повторного кип'ятіння» дна деметанізатора, а турбодетандер відводить

тепло, необхідне для забезпечення зворотного холодильника у верхній частині деметанізатора.

Надлишковий газовий продукт від деметанізатора приблизно при  $-90^{\circ}\text{C}$  - це оброблений природний газ, який має належну якість для розподілу по кінцевому споживачеві трубопроводом. Він проходить через холодну коробку, де нагрівається, охолоджуючи вхідний газ. Потім він стискається в газовому компресорі, що приводиться в дію турборозширювачем, і надалі стискається в газовому компресорі другого ступеня, що приводиться в дію від електродвигуна, перед входом у розподільний трубопровід.

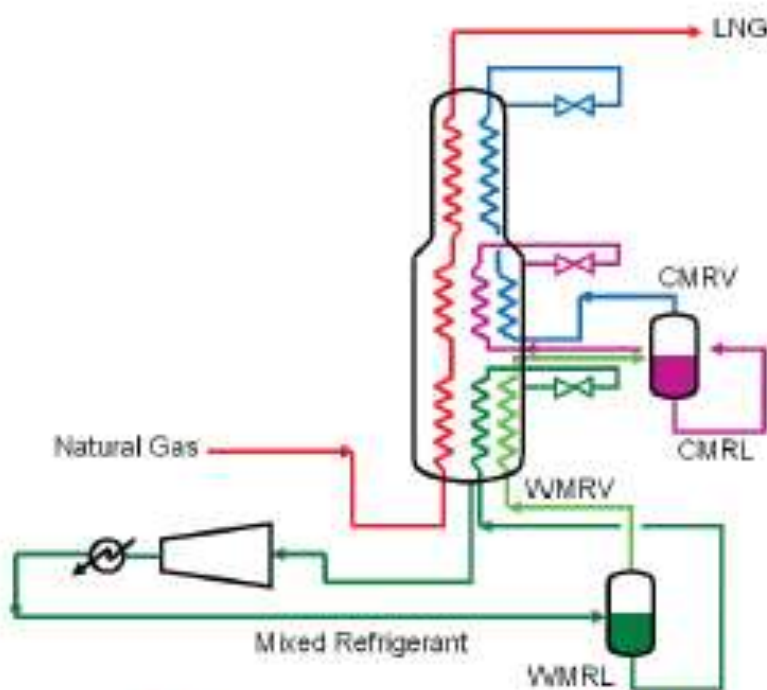


Рисунок 4.12. Схема технології AP-SMR™ [14-16]

## Процес СПГ

Ключові компоненти ланцюга СПГ включають газове родовище, установку для зрідження, носії СПГ, термінал прийому та регазифікації та зберігання.



## 2.7. Установки зрідження

**Рис. 1.** показані основні компоненти типової установки зрідження СПГ. Заводи для зрідження СПГ, як правило, класифікуються як базове навантаження або пікове гоління залежно від їх призначення та розміру.<sup>[3]</sup>Ця дискусія спрямована на базові установки СПГ. Процес зрідження природного газу за своєю суттю такий самий, як і в сучасних побутових холодильниках, але масово. Газ-холодоагент стискається, охолоджується, конденсується і скидається під тиском через клапан, що знижує його температуру за допомогою ефекту Джоуля-Томсона. Потім холодоагент використовується для охолодження подаючого газу. З часом температура подаваного газу знижується до  $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура, при якій зріджується метан, основний компонент природного газу. При цій температурі всі інші вуглеводні природного газу також будуть у рідкій формі. У процесі СПГ компоненти природного газу (пропан, етан та метан) зазвичай використовуються як холодоагенти або окремо, або як суміш. Попередня обробка корму та відновлення компонентів холодоагенту, як правило, включаються до установки зрідження СПГ. ЗВГ і конденсат можуть бути вилучені як побічні продукти[15].

### **Ключові компоненти установки зрідження СПГ.**

Існує три основних типи циклів зрідження: каскадний, змішаний холодоагент та цикл розширення. Більшість комерційно доступних процесів зрідження базуються на цих циклах або на їх комбінації. Ці процеси включають каскадний цикл із чистою складовою, цикл попередньо охолодженого пропаном змішаного холодоагенту, подвійний цикл змішаного холодоагенту, одиночний цикл змішаного холодоагенту, каскадний процес із змішаною рідиною, компактну технологію СПГ та інтегрований вбудований каскад (СП™).

**Таблиця 1. Викиди ПГ та ПДК від дизельного палива та природного газу**

	<b>Дизель</b>		
	<b>Вуглекислий газ(кг / м3)</b>	<b>Метан(кг / м3)</b>	<b>Закис азоту(кг / м3)</b>
Виробництво дизеля	138	10.9	0,004
Горіння дизеля	2663	0,133	0,4
<b>Всього</b>	2801	11.03	0,404
	<b>Природний газ</b>		
Видобуток природного газу	0,043	$2,3 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-6}$
Переробка природного газу	0,090	$3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-6}$
Спалювання природного газу	1.918	$3,7 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-5}$
<b>Всього</b>	2.051	$2,64 \times 10^{-3}$	$4,2 \times 10^{-5}$

## Розділ 3. ТРАНСПОРТУВАННЯ СКРАПЛЕНОГО ПРИРОДОГО ГАЗУ

### 3.1. Морське транспортування скрапленого природного газу

Установки (FLNG) плавають над морським газовим родовищем і виробляють, зріджують, зберігають та передають СПГ (і, можливо, ЗПГ та конденсат) у морі, перш ніж перевізники відвантажують його безпосередньо на ринки. Перша установка для збору природного газу зараз розробляється компанією Shell, термін завершення у 2018 році.

### 3.2. Зберігання СПГ



Бак для зберігання СПГ в EG LNG

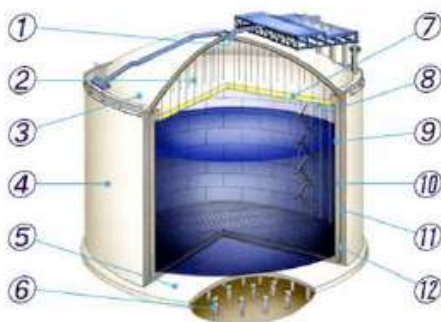


Рис. 5.3. Конструкція широко вживаного в світі залізобетонного резервуару із замкнутою зовнішньою оболонкою:

1 – підкладка даху; 2 – підвіска; 3 – залізобетонний дах; 4 – бічна стінка з порцеляноцементу; 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

Сучасні резервуари для зберігання СПГ зазвичай мають повний тип утримання, який має а попередньо напружений бетонз овнішня стіна та внутрішній резервуар із високонікелевої сталі з надзвичайно ефективною ізоляцією між стінами. Великі резервуари мають низьке співвідношення сторін (висота до ширини) і циліндричну конструкцію з куполоподібною сталевую або бетонною покрівлею. Тиск зберігання в цих резервуарах дуже низький, менше 10 кілопаскалі (1.5psi). Іноді для зберігання використовують більш дорогі підземні резервуари. Менші кількості (скажімо, 700 кубічних метрів і менше) можна зберігати в горизонтальних або вертикальних вакуумних сорочках під посудиною під тиском. Ці резервуари можуть знаходитися під тиском від 50 до 1700 кПа (7,3–246,6 psi).

ЗПГ потрібно тримати в холоді, щоб залишатися рідиною, незалежно від тиску. Незважаючи на ефективну ізоляцію, неминуче відбуватиметься деякий витік тепла в СПГ, що призведе до випаровування СПГ. Цей викидний газ діє, щоб підтримувати СПГ холодним (див. "Холодильне обладнання "нижче". Газ, що википає, зазвичай стискається і експортується як природний газ, або його повторно зварюють та повертають на зберігання.

СПГ транспортується на спеціально розроблених кораблях з подвійним корпуси захист вантажних систем від пошкоджень або витоків. Існує кілька спеціальних методів випробування на герметичність для перевірки цілісності мембранних вантажних цистерн судна СПГ.

Вартість танкерів складає близько 200 мільйонів доларів США кожен.

СПГ перевозиться за допомогою обох автоцистерн, вагони-цистерни, і спеціально побудовані кораблі, відомі як Носії СПГ. Іноді приймають СПГ кріогенний температури для збільшення місткості танкера. Перший комерційний передача корабель-корабель (STS) передачі були здійснені в лютому 2007 року на заводі Флотта в Скапа Флоу з 132 000 м<sup>3</sup> СПГ, що проходить між суднами Екскалібур та Ексельсіор. Трансфери також були здійснені Ексмар управління кораблями, Бельгійський власник бензовоза в

Мексиканська затока, який передбачав перенесення СПГ із звичайного носія СПГ на судно для регазифікації СПГ (LNGRV). До цього комерційного навчання СПГ лише коли-небудь передавались між кораблями лише кілька разів як необхідність після інциденту. ОЗНАКА- Товариство міжнародних операторів газових танкерів та терміналів є відповідальним органом для операторів СПГ у всьому світі і прагне поширити знання щодо безпечного транспортування СПГ у морі[16].

Окрім суден для СПГ, СПГ також використовується в деякі літаки.

### ***Термінали***

Зріджений природний газ використовується для транспортування природного газу на великі відстані, часто морським транспортом. У більшості випадків термінали СПГ - це спеціально створені порти, що використовуються виключно для експорту або імпорту СПГ.

### **Холодильне обладнання**

Ізоляція, настільки ефективна, якою вона є, не буде тримати СПГ досить холодною. Неминуче витoki тепла зігріють та випаровують СПГ. Галузева практика полягає у зберіганні СПГ як кипіння кріоген. Тобто рідина зберігається на своєму Точка кипіння для тиску, при якому він зберігається (атмосферний тиск). Коли пари википають, нагрівайте для зміна фази охолоджує залишок рідини. Оскільки ізоляція є дуже ефективною, для підтримання температури необхідна лише відносно невелика кількість кипіння. Це явище також називають автоматичне охолодження.

Викид газу з наземної бази Резервуари для зберігання СПГ зазвичай стискається і подається природний газ трубопроводні мережі. Дещо Носії СПГ використовуйте викидний газ для палива.

### **СПГ порівняно з дизелем**

Хоча дизель має вищу щільність енергії, ніж СПГ, об'єм парниковий газ (ПГ) і критерії викидів забруднювачів повітря (САС) пов'язаний як з

висхідним, так і з нижчим сектором, є більшим для дизель ніж це для природний газ.

Основне використання СПГ полягає у спрощенні транспортування природного газу від джерела до пункту призначення. У великих масштабах це робиться, коли джерело та пункт призначення знаходяться через океан один від одного. Він також може використовуватися, коли недостатня пропускна здатність трубопроводу відсутня. Для великомасштабних транспортних потреб СПГ, як правило, регасифікується на приймальному кінці і вводиться в місцеву інфраструктуру газопроводу.

СПГ також може бути використаний для задоволення пікового попиту, коли звичайна трубопровідна інфраструктура може задовольнити більшість потреб, але не пікові потреби. Ці рослини зазвичай називають установками для гоління піку на СПГ, оскільки їх метою є відсіювання частини пікового попиту від того, що потрібно з трубопроводу подачі.

СПГ може використовуватися для підживлення двигунів внутрішнього згоряння. ЗПГ знаходиться на ранніх стадіях і стає основним паливом для транспортних потреб. Він оцінюється та випробовується для дорожніх вантажних перевезень, бездоріжжя, морські та тренувальні програми. Відомі проблеми з паливними баками та подачею газу до двигуна, але, незважаючи на ці занепокоєння, почався перехід до СПГ як транспортного палива. СПГ конкурує безпосередньо з стиснений природний газ як паливо для транспортні засоби на природному газі оскільки двигун ідентичний. Можуть бути додатки, де вантажні автомобілі, автобуси, поїзди та катери можуть бути економічно вигідними, щоб регулярно розподіляти енергію СПГ разом із загальними вантажами та / або пасажирями меншим ізольованим громадам без місцевого джерела газу або доступу до трубопроводів.

### **3.3. Використання СПГ для заправки великих позашляхових вантажівок**

Китай є лідером у використанні транспортних засобів, що працюють на СПГ станом на вересень 2014 року на дорозі перебуває понад 100 000 транспортних засобів, що працюють на ЗПГ [17].

У Сполучених Штатах починають існувати загальнодоступні можливості для заправки СПГ. Станом на грудень 2016 року на сайті відстеження альтернативних пунктів заправки показано 84 громадські центри палива для зрідженого природного газу. Великі вантажівки можуть здійснювати кросові поїздки, такі як Лос-Анджелес до Бостона, та заправлятися на громадських автозаправних станціях кожні 500 миль. У Національному довіднику автоперевізників 2013 року перелічено приблизно 7000 вантажних авто, таким чином, приблизно 1% американських вантажівок мають доступний СПГ.

Незважаючи на те, що станом на грудень 2014 р. Паливо та зріджене паливо в Європі не вивозили дуже швидко, і було сумнівно, чи стане СПГ колись паливом вибору серед операторів флоту останні тенденції, починаючи з 2018 року, показують іншу перспективу. Протягом 2015 року Нідерланди представили вантажівки, що працюють на СПГ, у транспортному секторі. Австралійський уряд планує розробити шосе СПГ для використання СПГ місцевого виробництва та заміни імпортного дизельного палива, що використовується міждержавними транспортними засобами.

У 2015 році Індія також почала з невеликого початку транспортуванням СПГ автоцистернами, що працюють на СПГ, у штаті Керала. У 2017 році Петронет СПГ встановлює 20 станцій зрідженого газу на шосе уздовж західного узбережжя Індії, що з'єднують Делі з Тіруванантапурамом на загальній відстані 4500 км через Мумбаї та Бенгалуру. У 2020 році Індія планує встановити 24 заправні станції для ЗПГ уздовж 6000 км Золотий

чотирикутник автомагістралі, що з'єднують чотири метро, оскільки ціни на СПГ різко впали.

Японія, найбільший у світі імпортер СПГ, має намір використовувати СПГ як паливо для дорожнього транспорту.

### **3.4. СПГ в двигунах з великим крутним моментом**

Об'єм двигуна є важливим фактором сили двигун внутрішнього згоряння. Таким чином, двигун об'ємом 2000 куб. См, як правило, буде потужнішим, ніж двигун об'ємом 1800 куб повітряно-паливна суміш використовується.

Якщо, наприклад, на прикладі турбокомпресора, менший двигун використовує повітряно-паливну суміш з більш високою щільністю енергії, тоді він міг би виробляти більше енергії, ніж більший, що спалює менш енергетично щільну повітряно-паливну суміш. На жаль, турбокомпресори є і складними, і дорогими. Таким чином, для двигунів із високою потужністю та високим крутним моментом переважно паливо, яке створює більш енергетично щільну повітряно-паливну суміш, оскільки менший та простіший двигун може виробляти однакову потужність.

У традиційних бензинових та дизельних двигунів щільність енергії повітряно-паливної суміші обмежена, оскільки рідке паливо погано змішується в балоні. Крім того, є бензин та дизельне паливо температури самозаймання і тиски, що стосуються конструкції двигуна. Важливою частиною традиційної конструкції двигуна є проектування таких циліндрів, ступеня стиснення та форсунок палива попереднє запалювання запобігає, але в той же час можна впорскувати якомога більше палива, добре перемішуватися і все одно встигати завершити процес згоряння під час силового удару.

Природний газ не запалюється автоматично при тисках і температурах, що відповідають традиційним конструкціям бензинових та дизельних двигунів, що забезпечує більшу гнучкість у конструкції двигуна на



природному газі. Метан, основний компонент природного газу, має температуру samozаймання  $580^{\circ}\text{C}$  ( $1076^{\circ}\text{F}$ ), тоді як бензин та дизельний автоінгіт приблизно при  $250^{\circ}\text{C}$  ( $482^{\circ}\text{F}$ ) та  $210^{\circ}\text{C}$  ( $410^{\circ}\text{F}$ ) відповідно.

З двигуном на стисненому природному газі (СПГ) змішування палива та повітря є більш ефективним, оскільки гази, як правило, добре змішуються за короткий проміжок часу, але при типових тисках стиснення СПГ саме паливо менше енергії, ніж бензин або дизель таким чином кінцевим результатом є низько енергетична щільна повітряно-паливна суміш. Таким чином, для одного двигуна з об'ємом циліндрів двигун без турбонаддува, що працює на СПГ, зазвичай менш потужний, ніж бензиновий або дизельний двигун подібного розміру. З цієї причини турбокомпресори популярні серед європейських автомобілів на СПГ. Незважаючи на це обмеження, 12-літровий двигун Cummins Westport ISX12G є прикладом двигуна, здатного до СПГ, призначеного для тягання вантажів до тракторів / причепів вагою до 80000 фунтів, що показує, що СПГ можна використовувати в більшості, якщо не у всіх дорожніх додатках для вантажних автомобілів. Оригінальні двигуни ISX G включали турбокомпресор для підвищення щільності енергії повітря-паливо.

СПГ пропонує унікальну перевагу перед СПГ для більш вимогливих додатків з високою потужністю, усуваючи необхідність у турбокомпресорі. Оскільки СПГ закипає приблизно при  $-160^{\circ}\text{C}$  ( $-256^{\circ}\text{F}$ ), за допомогою простого теплообмінника невелика кількість ЗПГ може перетворюватися у свою газоподібну форму при надзвичайно високому тиску з використанням малої або відсутності механічної енергії. Правильно сконструйований двигун з високою потужністю може використовувати це надзвичайно високий тиск енергії, щільного газоподібного палива, щоб створити більш високу енергетичну щільність повітряно-паливної суміші, ніж можна ефективно створити за допомогою двигуна, що працює на СПГ. Кінцевим результатом у порівнянні з двигунами на СПГ є більша загальна ефективність у застосуванні

двигунів із високою потужністю, коли використовується технологія прямого впорскування під високим тиском. Westport HDM12 паливна система є прикладом технології прямого впорскування високого тиску, яка не потребує турбокомпресора, якщо вона поєднана з відповідною технологією теплообмінника СПГ. 13-літровий СПГ двигун Volvo Trucks є ще одним прикладом двигуна, що працює на ЗПГ, використовуючи передові технології високого тиску.

Westport рекомендує СПГ для двигунів об'ємом 7 літрів або менше, а СПГ із прямим впорскуванням - для двигунів від 20 до 150 літрів. Для двигунів від 7 до 20 літрів рекомендується обидва варіанти. Дивіться слайд 13 звітти NGV Bruxelles - Презентація секції інноваційних галузей

Розроблені або розробляються високопотужні двигуни на нафтових бурових, гірничих, локомотивних та морських родовищах. Пол Бломерус написав статтю укладаючи до 40 мільйонів тонн СПГ на рік (приблизно 26,1 мільярда галонів / рік або 71 мільйон галонів / день) може знадобитися лише для задоволення глобальних потреб високопотужних двигунів до 2025-2030 року.

Станом на кінець 1-го кварталу 2015 року Prometheus Energy Group Inc стверджує, що протягом попередніх 4 років поставив на промисловий ринок понад 100 мільйонів галонів СПГ, і продовжує додавати нових клієнтів.

### **3.5. Використання СПГ у морських програмах**

У деяких портах вантажівкою встановлено бункерування СПГ для заправки палива. Цей тип підживлення СПГ просто встановити, припускаючи, що поставки СПГ доступні[19].

З кінця 2017 року компанія Feeder та судноплавна компанія Unifeeder експлуатують перше у світі контейнерне судно, що працює на ЗПГ, Wes Amelie, здійснюючи транзит між портом Роттердам та Балтією за тижневим графіком. Контейнерна судноплавна компанія Maersk Group вирішила

запровадити контейнерні судна, що управляються паливом на СПГ. DEME Group уклала контракт з Wärtsilä на поставку земснаряду нового класу «Antigoon» із двопаливними двигунами (DF). Кроулі Морськийз Джексоувілл, Флорида запусив два кораблі ConRo, що працюють на СПГ, Coquí та Taino у 2018 та 2019 роках відповідно.

У 2014 році Shell замовив спеціальне бункерне судно для СПГ. Планується введення в експлуатацію в Роттердамі влітку 2017 року

Міжнародна конвенція про запобігання забрудненню з суден (MARPOL), прийнята ІМО, постановив, що морські судна не повинні споживати паливо (бункерне паливо, дизель тощо) із вмістом сірки більше 0,5% з 2020 року в межах Міжнародних вод і прибережних районів країн, що приймають той самий регламент. Заміна високо сірки бункерне паливо з без сірки СПГ необхідний у великих масштабах у секторі морського транспорту, оскільки рідке паливо з низьким вмістом сірки дорожче, ніж СПГ. Японія планує використовувати СПГ як бункерне паливо до 2020 року.

ВНР, одна з найбільших гірничих компаній у світі, прагне ввести в експлуатацію кораблі для транспортування корисних копалин, що працюють на СПГ до кінця 2021 року.

### **Використання СПГ на залізниці**

Залізниця Східного узбережжя Флориди має 24GE ES44C4 локомотиви, пристосовані для роботи на СПГ-паливі.

Світове виробництво СПГ у 2014 році становило 246 тонн, більшість з яких використовувалася в торгівлі між країнами. Протягом наступних кількох років відбудеться значне збільшення обсягу торгівлі СПГ. Наприклад, близько 59 МТРА нових поставок СПГ з шести нових заводів вийшли на ринок лише в 2009 році, в тому числі:

- Північно-західний шельфовий поїзд 5: 4,4 МТРА
- Сахалін-II: 9,6 МТРА

- ЗПГ в Ємені: 6,7 МТРА
- Танггух: 7,6 МТРА
- Катаргас: 15,6 МТРА
- Расгас Катар: 15,6 МТРА

У 2006 році Катар став найбільшим у світі експортером СПГ. Станом на 2012 рік Катар є джерелом 25 відсотків світового експорту СПГ. Станом на 2017 рік Катар, за оцінками, постачав 26,7% світового СПГ[19].

Інвестиції в експортні потужності США збільшувались до 2013 року, ці інвестиції стимулювались збільшенням сланцевий газ видобуток у США та велика різниця в цінах між цінами на природний газ у США та в Європі та Азії. Cheniere Energy стала першою компанією в США, яка отримала дозвіл та експортувала СПГ у 2016 році.

### **Перенаправлення вантажу**

Виходячи зі СПЗ СПГ, СПГ призначений для попередньо узгоджених напрямків, і перекидання цього СПГ заборонено. Однак, якщо продавець і покупець укладають взаємну угоду, то переадресація вантажу дозволена - за умови розподілу додаткового прибутку, створеного такою диверсією. У Європейському Союзі та деяких інших юрисдикціях заборонено застосовувати положення про розподіл прибутку в СПЗ СПГ.

### **3.6.Регазифікація**

---

**Регазифікація** це процес перетворення скраплений природний газ(LNG) при температурі  $-162^{\circ}\text{C}$  ( $-260^{\circ}\text{F}$ ) назад до природного газу при атмосферній температурі. Заводи з газифікації СПГ можуть бути розташовані як на суші, так і на плавучих баржах. Плавучі заводи, встановлені на баржах, мають ту перевагу, що їх можна буксирувати в нові офшорні місця для кращого використання у відповідь на зміни в діловому середовищі. У

звичайному завод по перегазифікації, ЗПГ нагрівається морською водою для перетворення його на природний газ /метан газ.

### **Побічні продукти СПГ**

Окрім регазифікації, багато цінних промислових побічних продуктів можна отримати, використовуючи холодну енергію СПГ. Холодна енергія утилізації СПГ для вилучення рідини кисень і азоту газ із повітря, робить установки для регазифікації СПГ більш життєздатними, коли вони знаходяться поблизу інтегровані металургійні заводи та / або рослини сечовини. Холодна енергія використання СПГ замість масивних та енергоємних кріогенних холодильних установок у переробка природного газу рослини також є більш життєздатним з економічної точки зору. Природний газ, оброблений холодною енергією СПГ, та імпортований СПГ можна легко вводити в звичайну систему розподілу природного газу для досягнення кінцевих споживачів.

---

Холодна енергія СПГ може бути використана для охолодження відпрацьованої рідини газова турбіна який працює в закритому режимі джоулів цикл з Аргон газ як рідина. Таким чином, майже 100% ефективності перетворення в електроенергію досягається для СПГ / природного газу, який споживається газовою турбіною, оскільки його відпрацьоване тепло повністю використовується / поглинається для газифікації СПГ[18].

Однак велика доступність природного газу, а також зріла технологія та її прийнятність при безпосередньому використанні СПГ (без регазифікації) в автомобільних та залізничних транспортних засобах призведуть до зменшення попиту на установки для регазифікації СПГ.

## Перевізник СПГ



*Річки СПГ*, носій типу Мосс ємністю 135000 кубічних метрів (4770000 куб. футів)

Перевізник СПГ – це танкове судно призначений для транспортування скраплений природний газ(СПГ). Оскільки ринок СПГ швидко зростає, флот перевізників СПГ продовжується відчутти колосальний ріст.

### **Цистерни для системи Мох (сферичні резервуари для СПГ типу В ІМО)**



Танкер типу СПГ Мох, вид збоку

Сферичні резервуари для СПГ типу В із сферичною формою ІМО типу В, названі на честь компанії, яка їх спроектувала, норвезької компанії Moss Maritime, мають сферичну форму. Більшість суден типу Moss мають 4 або 5 резервуарів.

Зовні ємність має товстий шар пінопластової ізоляції, яка або вмонтована в панелі, або в більш сучасних конструкціях, намотаних навколо бака. Над цим утеплювачем знаходиться тонкий шар «станіоліту», який дозволяє утримувати ізоляцію сухою в атмосфері азоту. Цю атмосферу постійно перевіряють на наявність метану, який би свідчив про витік бака.

Також зовнішня частина резервуара перевіряється з інтервалом у 3 місяці на наявність холодних плям, які могли б свідчити про поломку ізоляції.

Танк підтримується по колу екваторіальним кільцем, яке підтримується великою круглою спідницею, відомою як пара даних, що являє собою унікальну комбінацію алюмінію та сталі, яка відводить вагу танка на конструкцію кораблів. Ця спідниця дозволяє баку розширюватися і стискатися під час операцій охолодження та розминки. Під час охолодження або прогрівання бак може розширюватися або стискатися приблизно на 60 см (24 дюйма). Через це розширення та стискання всі трубопроводи в резервуарі надходять зверху і з'єднуються з лініями кораблів за допомогою гнучких сільфонів.

Усередині кожного резервуара є набір розпилювальних головок. Ці головки встановлені навколо екваторіального кільця і використовуються для розпорошення СПГ на стінки резервуару для зниження температури.

Зазвичай резервуари мають робочий тиск до 22 кПа (3,2 фунта на квадратний дюйм), але він може бути підвищений для аварійного розряду. Якщо обидва основні насоси виходять з ладу, тоді для видалення вантажу запобіжні клапани резервуара регулюються для підйому при 100 кПа. Потім лінія розливу, яка йде до дна резервуара, відкривається разом із лініями наповнення інших цистерн на борту. Потім тиск підвищується в резервуарі дефектними насосами, які штовхають вантаж в інші цистерни, де його можна відкачати.

### **ІНІ (Призматичні резервуари для СПГ типу В ІМО)**

Спроектований Ishikawajima-Harima Heavy Industries, самонесучий призматичний танк типу В (SPB) в даний час використовується лише на двох судах. Танки типу В обмежують проблеми з розбиттям, покращення в порівнянні з мембранними цистернами для СПГ, які можуть зламатися через удари, що впливають, і, таким чином, руйнують корпус корабля. Це також є першочерговим для FPSO СПГ (або СПГ) [19].

Крім того, резервуари для зрідженого газу типу В ІМО можуть зазнати внутрішніх випадкових пошкоджень, наприклад, через випуск внутрішніх обладнання. Це було включено в конструкцію після кількох інцидентів, що сталися всередині мембранних резервуарів для СПГ.

### **TGZ Mark III**



Внутрішня частина сферичної мембрани з нержавіючої сталі Technigaz Mark III, резервуар для СПГ

Спроектований Технігаз, ці резервуари мають мембранний тип. Мембрана складається з нержавіючої сталі з "вафлями", щоб поглинати скорочення тепла при охолодженні бака. Основним бар'єром, виготовленим з гофрованої нержавіючої сталі товщиною близько 1,2 мм (0,047 дюйма), є той, який безпосередньо контактує з вантажною рідиною (або парами в порожньому резервуарі). Далі слідує первинна ізоляція, яка, в свою чергу, покрита вторинним бар'єром, виготовленим з матеріалу, званого «триплекс», який, по суті, являє собою металеву фольгу, затиснуту між листами скловата і стиснуту між собою. Це знову покрите вторинною ізоляцією, яка, в свою чергу, підтримується корпусом корабля ззовні.

З внутрішньої сторони резервуару назовні шари:

- СПГ
- Основний бар'єр з гофрованої / вафельної нержавіючої сталі 304L товщиною 1,2 мм
- Первинна ізоляція (також звана міжбар'єрним простором)



- Вторинний бар'єр у триплексній мембрані
- Вторинна ізоляція (також звана ізоляційним простором)
- Будова корабельного корпусу.

## **GT96[20]**

Спроектований Газтранспорт, резервуари складаються з первинної та вторинної тонкої мембрани, виготовленої з матеріалу Інвар яка майже не має термічного скорочення. Ізоляція виготовляється з фанерних коробок, заповнених перлітом і безперервно промиваних азотом. Цілісність обох мембран постійно контролюється шляхом виявлення вуглеводню в азоті. Еволюцію пропонує NG2, із заміною азоту аргоном як промитий інертний та ізоляційний газ. Аргон має кращу ізоляційну здатність, ніж азот, що може заощадити 10% викидного газу.

## **CS1**

CS1 розшифровується як Комбінована система номер один. Він був розроблений об'єднаним зараз Газтранспорт і Технігаз компанії і складається з найкращих компонентів як систем МКІІІ, так і NO96. Первинний бар'єр зроблений з інвару 0,7 мм (0,028 дюйма), а вторинний - з Triplex. Первинна та вторинна ізоляція складається з пінополіуретанових панелей.

Було побудовано три судна з технологією CS1 одним суднобудівним заводом, але створені суднобудівні заводи вирішили підтримувати виробництво МКІІІ та NO96.

## **Повторне зрідження та кип'ятіння**

---

Щоб полегшити транспорт, природний газ охолоджується до приблизно  $-163^{\circ}\text{C}$  ( $-261^{\circ}\text{F}$ ) при атмосферному тиску, в цей момент газ конденсується до рідини. Танки на борту СПГ-носія фактично функціонують як гігантські термоси щоб рідкий газ залишався холодним під час зберігання. Проте жодна ізоляція не є ідеальною, і тому рідина постійно кипить під час плавання.

За даними WGI, в типовому плаванні щодня 0,1–0,25% вантажу перетворюється на газ щодня, залежно від ефективності ізоляції та шорсткості плавання. У типовому 20-денному плаванні може бути втрачено від 2 до 6% від загального обсягу спочатку завантаженого СПГ.

Зазвичай цистерна для СПГ працює від парових турбін з котлами. Ці котли мають подвійне паливо і можуть працювати як на метані, так і на маслі або в комбінації обох.

Газ, що утворюється при википанні, традиційно направляється до котлів і використовується як паливо для судна. Перед використанням цього газу в котлах його слід нагріти приблизно до 20 ° C за допомогою газових нагрівачів. Газ або подається в котел тиском у баку, або тиск збільшується через LD компресори.

На якому паливі працює судно, залежить від багатьох факторів, серед яких тривалість плавання, бажання мати п'яту для відновлення, ціна нафти проти ціни на СПГ, та вимоги порту до чистіших вихлопів.

Доступні три основні режими:

**Мінімум википання / максимум масла:** - У цьому режимі тиск у резервуарі підтримується високим, щоб зменшити кипіння до мінімуму, і більшість енергії надходить від мазуту. Це максимізує кількість доставленого СПГ, але дозволяє підвищити температуру бака через відсутність випаровування. Високі темпи вантажу можуть спричинити проблеми зі зберіганням та розвантаженням.

**Максимум кип'ятіння / мінімум масла:** - У цьому режимі тиск у резервуарі підтримується низьким, і у вас є більший кипіння, але все одно використовується велика кількість мазуту. Це зменшує кількість доставленого СПГ, але вантаж доставлятиметься холодним, що віддають перевагу багатьом портам.

**100% газ:** - Тиск у резервуарі підтримується на такому ж рівні, щоб максимально закипіти, але цього може бути недостатньо для забезпечення всіх потреб котлів, тому ви повинні почати "змушувати". Невеликий насос запускається в одному резервуарі для подачі СПГ на примусовий випарник, де СПГ нагрівається і випаровується назад у газ, який можна використовувати в котлах. У цьому режимі не використовується мазут.

Останній досягнення технологічних установок для повторного зрідження, що встановлюються на судах, дозволяючи перекинути окропу і повернути його в резервуари. Через це оператори та будівельники суден змогли подумати про використання більш ефективних повільних швидкостей дизельні двигуни (раніше більшість перевізників СПГ були парова турбіна-потужні). Виняток становлять СПГ-носій Navfru (побудований як Venator в 1973 р.), Який спочатку мав двопаливні дизельні двигуни, та його споріднений корабель Century (побудований як Lucian у 1974 р.), Також побудований на подвійних паливних газових турбінах до перетворення на дизельний двигун система в 1982 р.

Зараз на озброєнні є судна, що використовують подвійні або трипаливні дизельні електричні, відповідно DFDE / TFDE,

Останнім часом спостерігається зацікавленість у поверненні до двигуна за допомогою викидного газу. Це результат ІМО 2020 регламент проти забруднення, який забороняє використовувати морський мазут із вмістом сірки більше 0,5% на судах, не обладнаних очисною установкою для димових газів. Космічні обмеження та проблеми безпеки, як правило, перешкоджають встановленню такого обладнання на носіях СПГ, змушуючи їх відмовитися від використання дешевого мазуту з високим рівнем споживання та перейти на паливо з низьким вмістом сірки, яке коштує дорожче та має менший запас. За цих обставин газ, що викидається, може стати більш привабливим варіантом.

### **3.6.Носії СПГ**

ЗСПГ комерційно постачається у повністю охолодженому рідкому стані. Принципова відмінність між перевізниками СПГ та іншими цистернами - система зберігання та обробки вантажів. [21] Поєднання металевого резервуару та ізоляції, необхідного для зберігання СПГ, називається "системою зберігання". Існує два основних типи систем утримання: самонесуча цистерна та мембранні резервуари. Сучасні судна для СПГ мають 135 тис. МЗ вантажопідйомності (приблизно 60 тис. Метричних тонн) і коштують приблизно 160 млн. Доларів США. Ці перевізники або споживають перепускний газ, або перезріджують газ і використовують дизель як паливо.

#### **Термінал прийому, регазифікації та зберігання**

Функція терміналу для імпорту СПГ полягає в отриманні вантажів СПГ, зберіганні СПГ та повторному використанні СПГ для продажу у вигляді газу. Введення одоранту може знадобитися, якщо газ потрібно експортувати через транспортну мережу. Існує дві основні системи, що використовуються для випаровування СПГ: випарники із зануреним згорянням та випарники з відкритою стійкою (ORV). У занурених випарниках згоряння СПГ проходить через трубки, занурені у водяну баню, яка нагрівається зануреними пальниками. У ОРВ вода стікає по зовнішній стороні випарних труб (зазвичай вертикальних) у вигляді плівки. Зазвичай використовується річкова або морська вода.

Витрати на доставку великої кількості газу трубопроводом швидко зростають із відстанню. У якийсь момент стає більш економічним транспортування газу як СПГ. Було опубліковано кілька порівнянь трубопроводу та СПГ, які вказують на той факт, що СПГ конкурентоспроможний трубопроводам на відстані більше 2500 км. Порівняно з трубопроводами, СПГ має переваги модульного накопичення та невелику кількість кордонів / переваги. Розмір заводу СПГ можна визначити за розміром газового родовища. Орієнтовно, 1 Тфц вихідного газу потрібно для

виробництва 0,8 мільйона тонн річного (mtpa) СПГ протягом 20 років. Отже, 5 мільйонів тонн щорічного видобутку СПГ потребуватимуть розміру газового родовища приблизно 6 Тф. Типове споживання газу для виробництва СПГ із вихідного газу на установці для зрідження може бути розраховане на основі 10% подаваного газу, що використовується для внутрішнього споживання палива. Загальна енергія, необхідна для установки, надходить від самого кормового газу. У таблиці 2 узагальнено втрати вихідного газу як палива в ланцюзі СПГ (за винятком об'єкта з видобутку газу, який може включати видобуток рідин та неуглеводневих газів):

### **Довгострокові контракти СПГ**

ЗПГ є зрілою галуззю промисловості і створила собі нішу, встановивши відповідні дистанційні поставки газу на ринки, на яких немає власних запасів газу. В даний час більшість СПГ не торгуються як товар. Торгівля СПГ вимагає координації принципалів у виробничому, експортному, судноплавному та імпортовому сегментах торгівлі. Як результат, довгострокові контракти на СПГ домінують у галузі. Потреба у довгострокових (від 20 до 25 років) контрактах розглядається деякими як можлива перешкода у потенціалі зростання СПГ[20].

### **Економіка ланцюга СПГ**

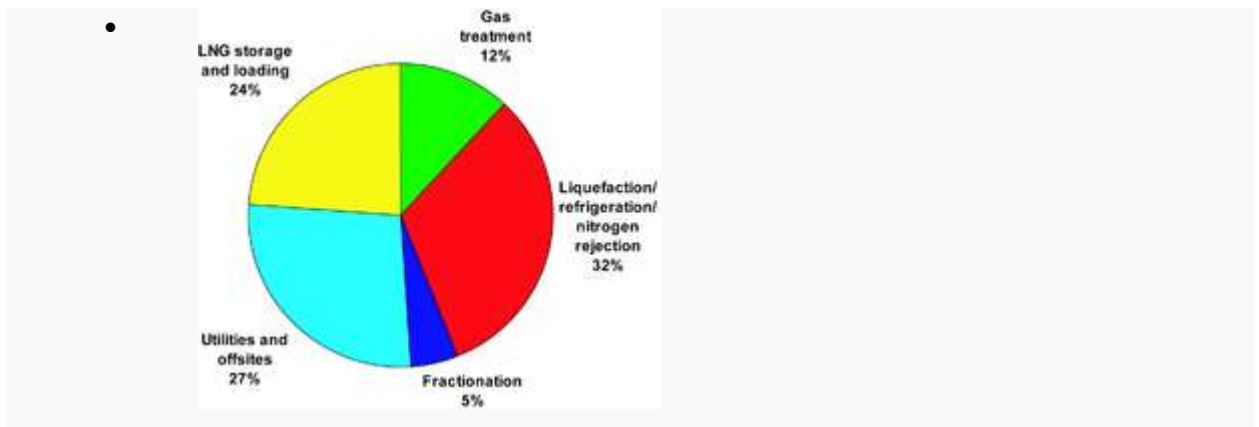
Витрати на виробництво та постачання СПГ можна розділити між основними елементами, що складають ланцюг поставок.

- Газовиробничі об'єкти з огляду на високу вартість зрідження та транспортування ЗПГ, важливо мати недорогий кормовий газ для конкурентоспроможності СПГ. Вартість видобутку газу, як правило, коливається від 0,25 дол. США / млн. Btu до понад 1,0 USD / млн. Btu. Виробнича вартість менше 1,0 дол. США / млн. Btu бажана, щоб зробити варіант СПГ економічно вигідним.

- Установка для зрідження базового навантаження із сховищами та експортом. Проекти СПГ за своєю суттю є капіталомісткими. Завод зрідження є найбільшим компонентом витрат, на який припадає приблизно 50% загальної вартості ланцюга СПГ. На рис. 2 показана типова розбивка капітальних витрат на установці для зрідження природного СПГ. Капітальні витрати на установки для зрідження залежать від кількох факторів, таких як розташування заводу, розмір заводу, умови майданчика та якість подаваного газу. Внесок вартості заводу зрідження у вартість доставки СПГ коливається від 1,5 до 2,0 доларів США / мільйон Btu. Вартість установки зрідження є значною складовою вартості ланцюга СПГ; отже, зниження витрат на установку для зрідження є важливим питанням. Термодинаміка процесів зрідження добре розвинена. Таким чином, подальший прогрес та зменшення витрат у цій галузі відбувається від вдосконалення обладнання до кращого обслуговування (підвищення ефективності) процесу зрідження та / або інфраструктури підтримки (комунальні послуги). У кількох публікаціях обговорюється зменшення витрат на установках зрідження.

- Судна-цистерни для СПГ (транспортування). Парк танкерів для проекту СПГ становить значну частину загальної вартості ланцюга СПГ. Кількість суден і, отже, вартість доставки залежить від відстані між установкою для зрідження та ринком. Типовий внесок вартості доставки у вартість поставленого СПГ становить приблизно 0,5-1,2 доларів США / мільйон Btu.

- Імпортний термінал із засобами зберігання та регазифікації. Приймальні термінали з резервуарами, обладнанням для випаровування та комунальними послугами вносять приблизно 0,3-0,4 дол. США / млн Btu до ціни доставки СПГ. Ці витрати сильно залежать від практики проектування (особливо конструкції резервуарів для зберігання) та конкретних умов майданчика.



**Рис. 2 - Типовий розподіл капітальних витрат на установку для зрідження СПГ.**

### **Майбутні тенденції**

Щоб СПГ став вибором енергії, вартість ланцюга СПГ повинна бути конкурентоспроможною з альтернативними джерелами палива. Тенденція спрямована на великі розміри циклів для зрідження та придатних для використання установок, щоб зменшити капітальні витрати на установки для зрідження. З боку терміналу існує високий рівень інтересу до переміщення об'єктів в офшори через проблеми довкілля та дозволів. Кілька компаній запропонували концепції офшорних терміналів зберігання та регазифікації. Інші сфери інтересів - інтеграція приймальних терміналів з такими об'єктами, як електростанції або установки для розділення повітря[21].

## ВИСНОВКИ

1) Споживання зрідженого газу в Україні і в наші дні є перспективним та може полегшити розв'язання питання диверсифікації джерел постачання природного газу в Україну без прив'язки до існуючої мережі магістральних газопроводів. Поставки скрапленого газу в Україну через термінал в одному з портів Чорного моря передбачені «Концепцією диверсифікації джерел постачання газу та нафти в Україну [22]

2) Найбільш наближеними до України і альтернативно пріоритетними для її

диверсифікаційних інтересів є газonosні райони Середньої Азії та Середнього Сходу. За експертними оцінками ціна скрапленого газу для України може скласти \$110–155 за 1000 м<sup>3</sup>.

3) З ростом пропозицій по можливості переоснащенню дизельних двигунів на метан, а саме скраплений природний газ (LNG), в Україні починають

проектуватись проекти з внутрішнім виробництвом СПГ на територіях крупних підприємств, з метою подальшого використання LNG як газомоторного палива.



## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Резервуары для хранения сжиженного газа. – [Электронный ресурс].  
Режим доступа: <http://lngas.ru/lng-storage/rezervuary-xranenie-spg.html>.
2. 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.
3. Цветковска Л.Н., Дьяченко Т.В. Наповнення та спорожнення цистерни для криогенної рідини. Посібник до лабораторної роботи. – Одеса: ОДАХ. – 2010. – 14 с.
4. 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.
5. Левковець П.Р. Моделі вдосконалення процесів інвестування постачальників компаній електроенергетичного сектору. – К.: Український транспортний університет. – 1999. – 147 с.
6. Платонова Е. Сжиженный газ – хорошая альтернатива // Порты Украины. – 2009. – № 86. – С. 61-62.
7. Шутенко Т.Н. Оценка состояния и перспективы развития перевозок сжиженного природного газа // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем. – 2009. – № 8. – С. 232-245.
8. Брагинский О.Б. Коридоры роста СПГ // Нефть, газ и бизнес. – 1995. – № 5. – 320 с.
9. Коваль В.А. Тенденции развития перевозок сжиженного природного газа морем // Методи та засоби управління розвитком транспортних систем. – 2011. – № 18. – С. 154-164.
10. Справочник по теплообменникам: в 2 т.: [пер. с англ.] / [Под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова]. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т.1. – 560 с.
11. Григорьев В.А. Тепло- массообменные аппараты криогенной техники / В.А. Григорьев, Ю.И. Крохин. – М.: Энергия, 1982. – 311 с.

12. Промышленные теплообменные процессы и установки / [Под ред. А.М.Бакластова]. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 228 с.
13. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – 2-е изд. 105 – М.: Энергия, 1969. – 440 с.
14. Пластинчатые теплообменники – устройство, принцип работы, методика расчета. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-phe>.
15. 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.
16. Ельчинов В.П. Отечественные атмосферные испарители криогенных жидкостей. – [Электронный источник]
17. Ходорков И. Мини-завод по производству СПГ на базе совмещённого комплекса АГНКС-ГРС// Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2004. — № 3. — С. 50-51.
18. Техничко-экономический анализ способов очистки природных газов со значительным содержанием CO<sub>2</sub> для установок СПГ небольшой производительности/ В. Герасимов, В. Передельский, А. Ляпин и др.// Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. — 2004. — № 3. — С. 52-55.
19. Сжиженный природный газ: Справочник по физико-химическим, энергетическим и эксплуатационным свойствам/ Под редакцией И.Л. Ходоркова. — С.-П.: Химиздат, 2003. — 66 с.
20. Natural gas liquefier/ В.Д. Krakovsky, V.A. Martynov, O.M. Popov et al.// Proc. VIII Cryogenics 2004 IIR International Conference (Praha Czech Republic). — 2004. — P. 203-209.
21. «Способ сжижения природного газа и установка для его реализации». Заявка на изобретение ООО «ВНИИГАЗ» № 2007. 125.077.106 от 04.07.2007 г.

22. Альтернативні палива: підручник : підручник / А. Д. Кустовська, С. В. Іванов, Є. О. Бережний. — К. : НАУ, 2014. — 624 с.