



# ТЕХНОЛОГИИ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

# Термодинамические и технологические основы сжижения газов



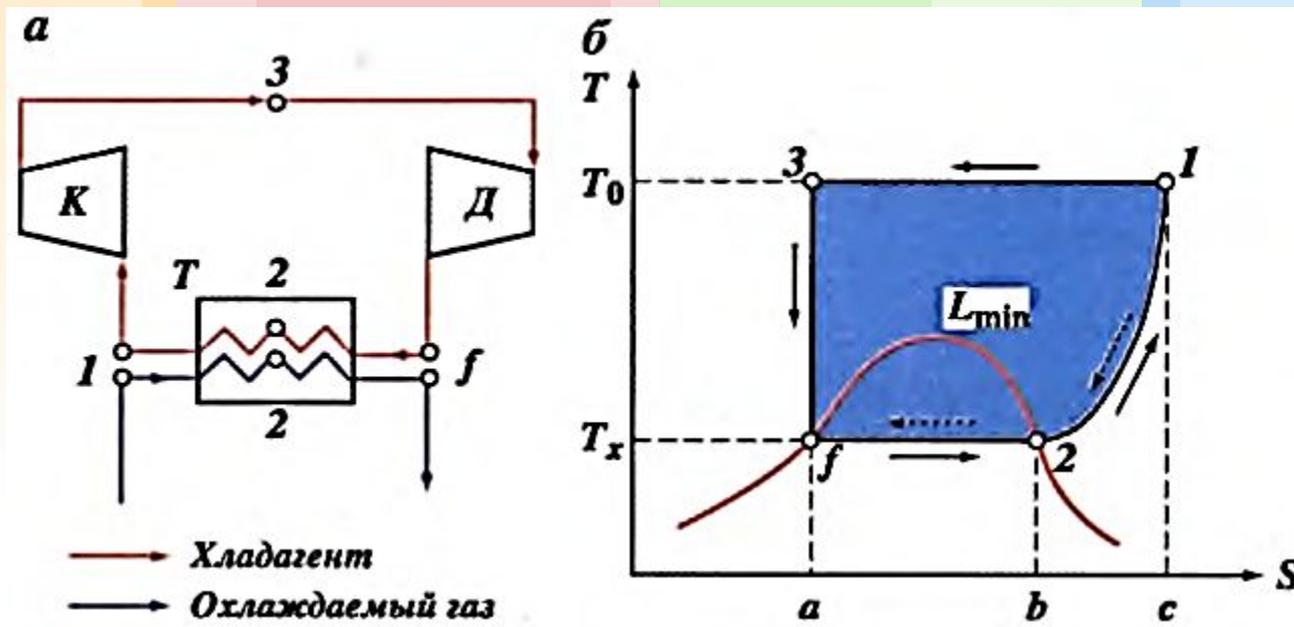
## ПРОЦЕСС СЖИЖЕНИЯ ГАЗА



# Термодинамические и технологические основы сжижения газов



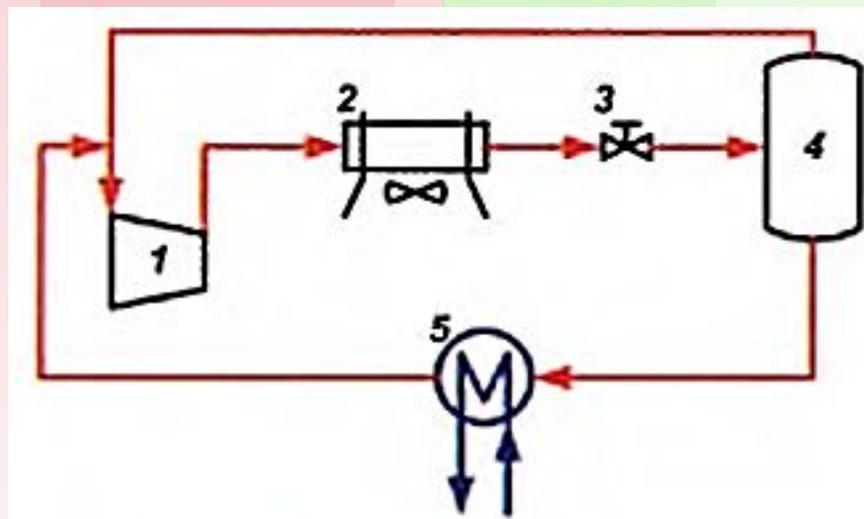
## ИДЕАЛЬНЫЙ ЦИКЛ СЖИЖЕНИЯ ГАЗА



# Холодильные циклы



## СХЕМА ПРОСТОГО ДРОССЕЛЬНОГО ЦИКЛА



# Холодильные циклы



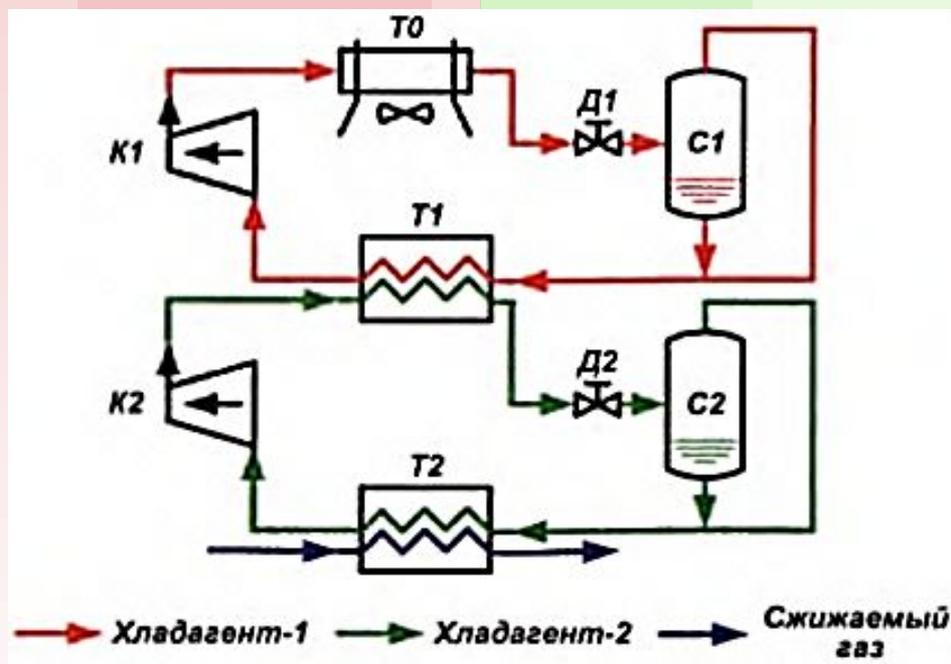
## ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ

Компонент	Температура кипения, °С	Критическая температура $T_k$ , °С
Метан	-161,5	-82,3
Этан	-88,6	32,27
Этилен	-103,7	9,7
Пропан	-42	97
Бутан	-0,5	152,01
Пентан	36,07	196,9
Кислород	-183	-118
Азот	-196	-149,9
Гелий	-269	-267,95
Водород	-252,77	-239,91

# Холодильные циклы



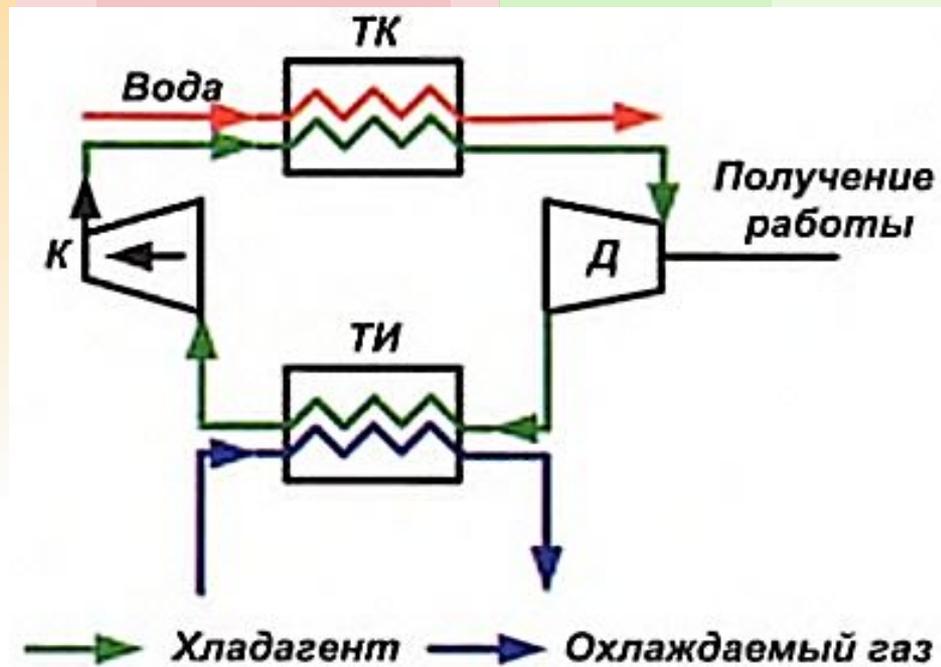
Каскадный принцип построения холодильных циклов



# Холодильные циклы



## СХЕМА ДЕТАНДЕРНОГО ЦИКЛА



# Технологии производства СПГ



## КРИВАЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

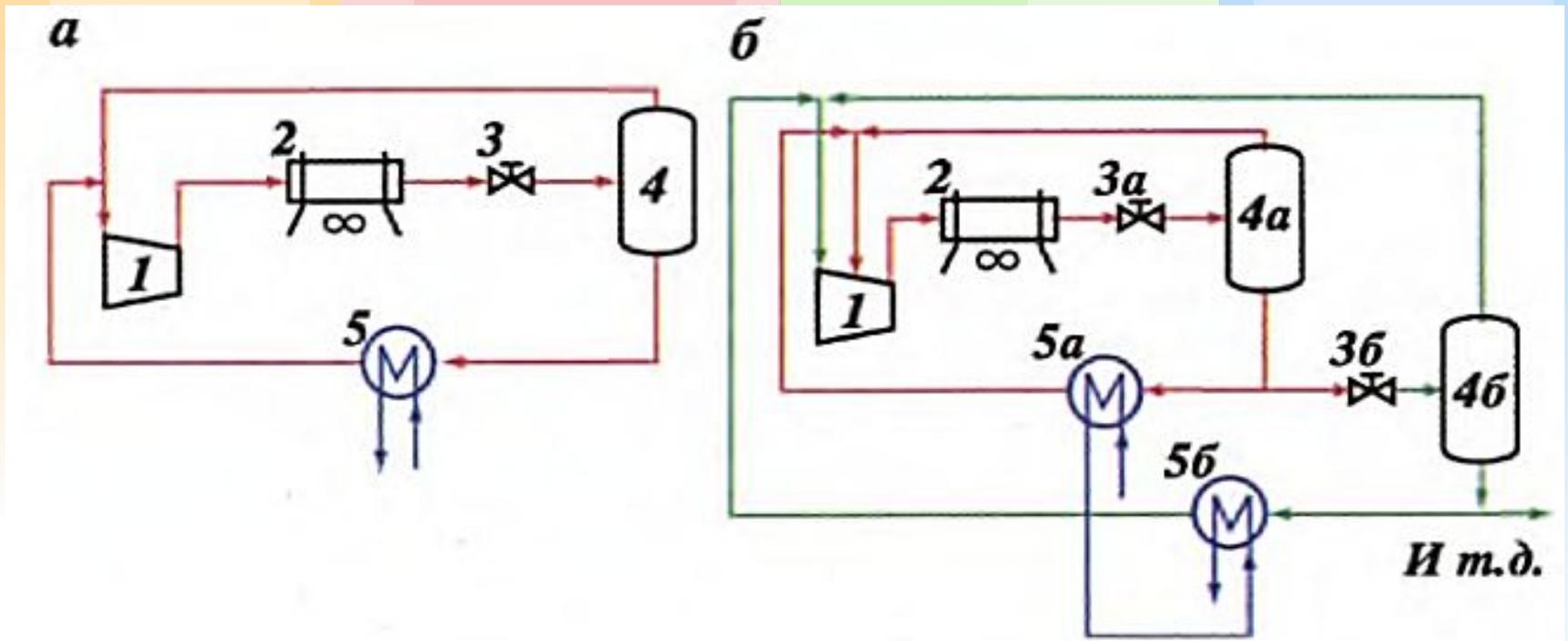




# Технологии производства СПГ



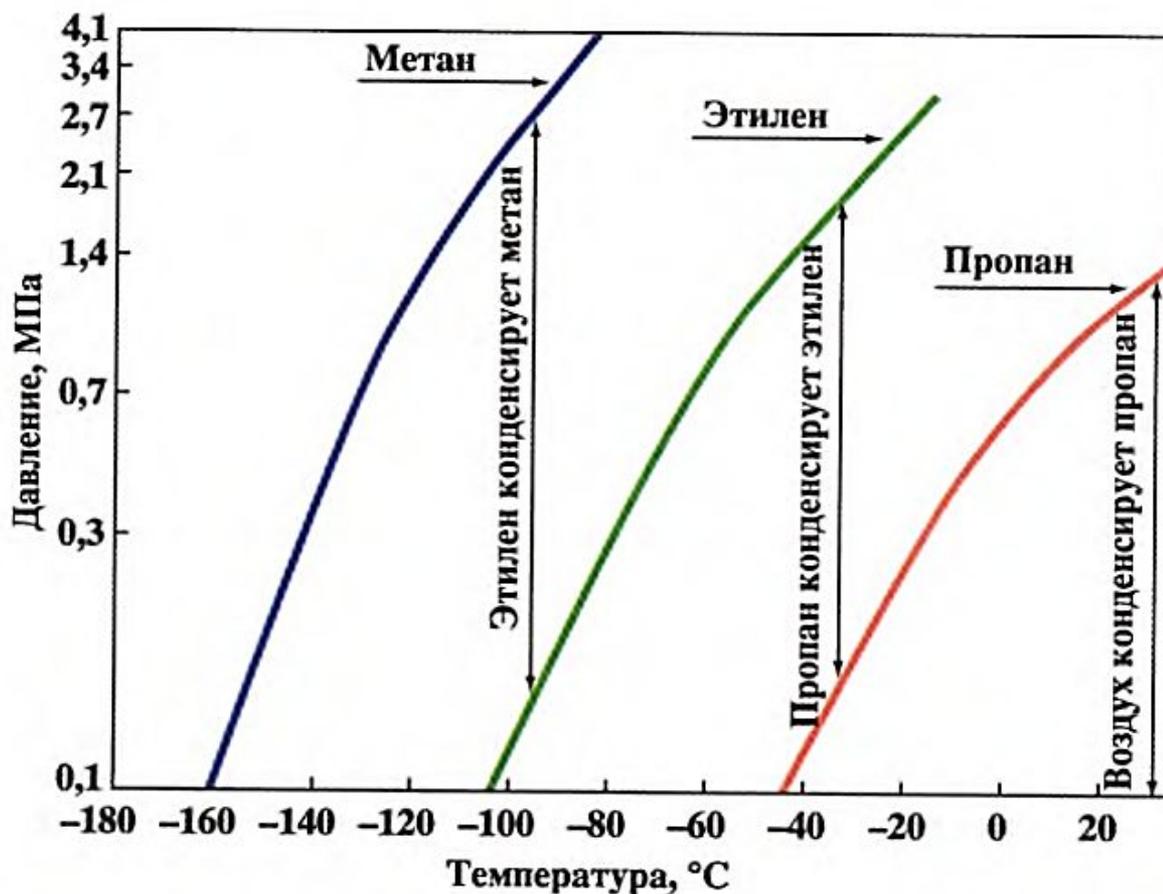
## ЦИКЛЫ ОХЛАЖДЕНИЯ



# Технологии производства СПГ



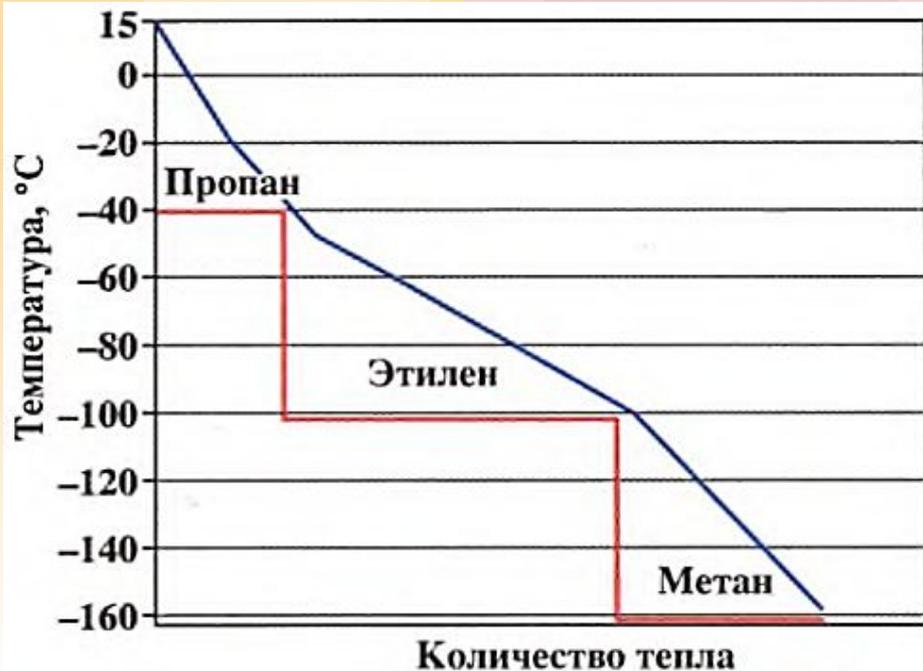
ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЙ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ МЕТАНА, ЭТИЛЕНА И ПРОПАНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ



# Технологии производства СПГ



а



Кривые охлаждения природного газа чистых хладагентов при использовании **одноступенчатых** циклов охлаждения

б



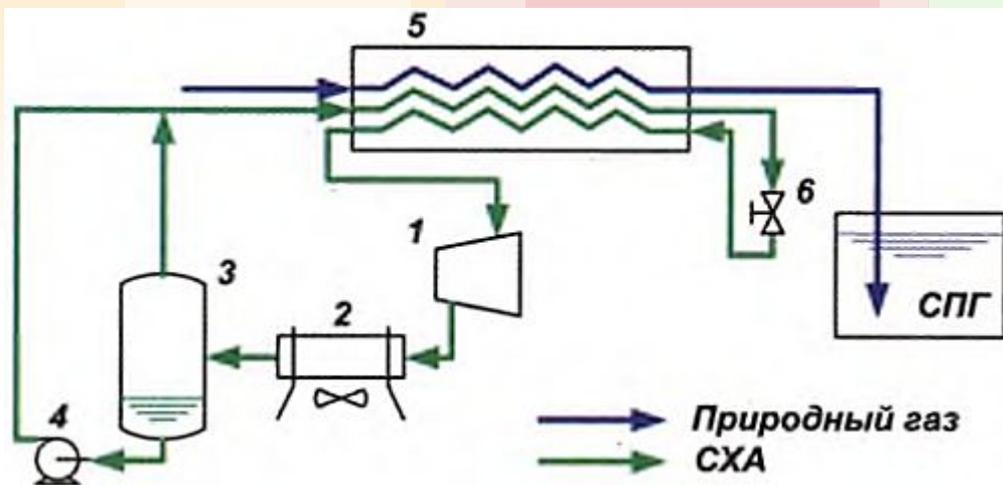
Кривые охлаждения природного газа чистых хладагентов при использовании **трехступенчатых** циклов охлаждения

# Технологии производства СПГ

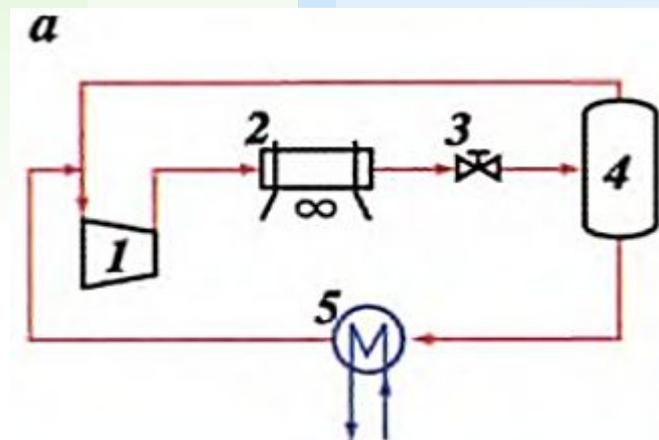


## ТЕМПЕРАТУРЫ КИПЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ СХА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Компонент	Температура, °С	Компонент	Температура, °С
Азот	-195,8	Пропан	-42,1
Метан	-161,5	И-бутан	-11,7
Этилен	-103,7	Н-бутан	-0,5
Этан	-88,6	И-пентан	27,9
Пропилен	-47,2		



Цикл охлаждения со смешанным хладагентом

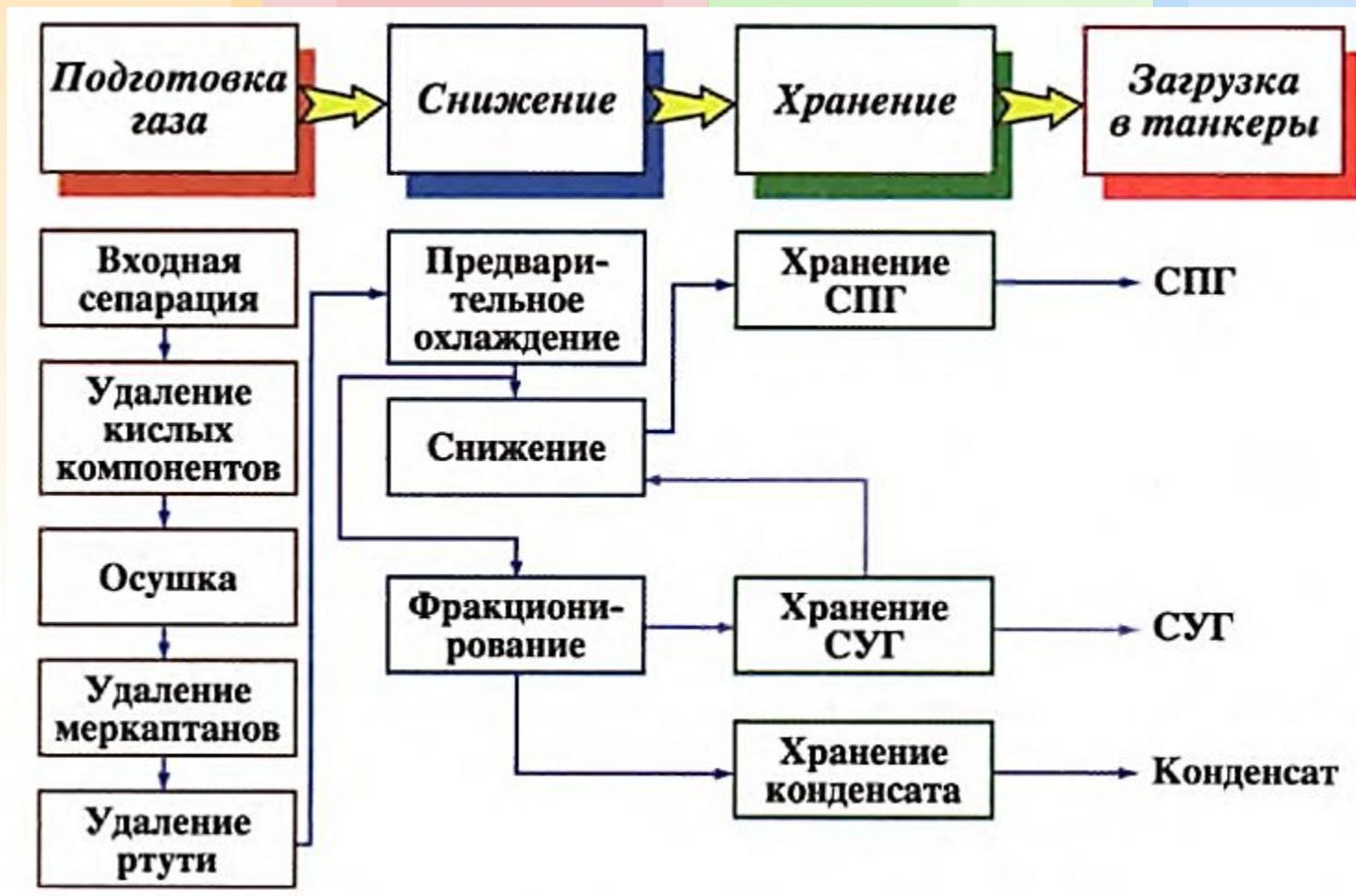


Охлаждение с пропановым циклом

# Технологии производства СПГ



## СХЕМА ЗАВОДА СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА



# Сжижение природного газа



## ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЖИЖЕНИЯ ГАЗА



# Сжижение природного газа



КРИВЫЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА И ХЛАДАГЕНТА



# Сжижение природного газа



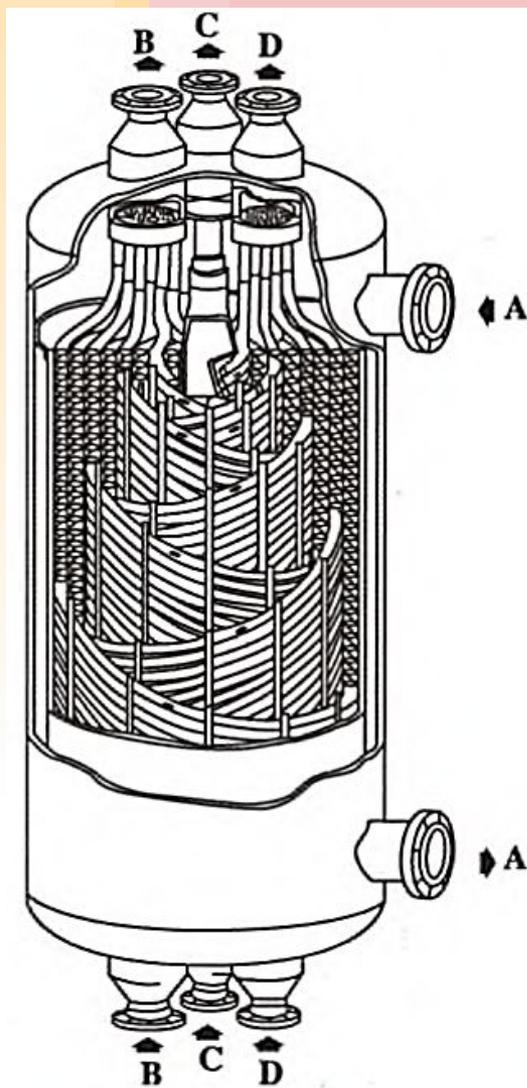
## КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО ЧИСЛУ ЦИКЛОВ СЖИЖЕНИЯ ГАЗА

	Число ХЦ	Компания-разработчик	Процесс	Холодильный агент	Теплообменники
малотоннажные	1	Black & Veatch	PRICO	СХА	РПТО
		Shell, APCI	SMR	СХА	СВТО
		Linde	BHP/Linde	Азот	РПТО
			SMR	СХА	СВТО
		Крыopak	Kryopak's EXP	-	РПТО
			PCMR/SCMR	СХА/СХА	РПТО
		Technip	TEALARC	СХА	РПТО
крупнотоннажные	2	APCI	C3-MR, C3MR/SplitMR	C3/СХА	КТИ/СВТО
		Shell	C3/MR (PMR)	C3/СХА	СВТО
			DMR	СХА/СХА	СВТО
		IFP/Axens	Liquefin	СХА/СХА	РПТО/РПТО
	3	APCI	AP-X	C3/СХА/N2	КТИ/СВТО/РПТО
		Phillips	Cascade	C3/Этилен/C1	КТИ/РПТО
			Optimised Cascade	C3/Этилен/C1	КТИ/РПТО
		Statoil/Linde	MFC	СХА/СХА/СХА	СВТО

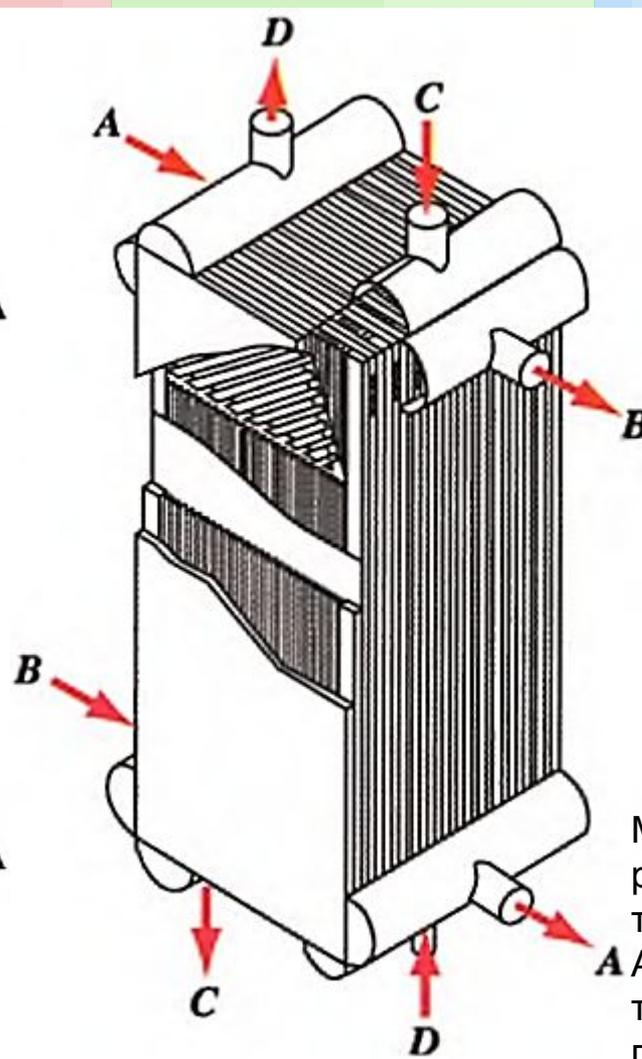
СВТО – спирально-витые теплообменные аппараты; РПТО – ребристо-пластинчатые теплообменные аппараты; КТИ – кожухотрубчатые испарители с паровым пространством; СХА – смешанный хладагент.



# Теплообменники



Спирально-витой теплообменник:  
A, B, C, D – теплообменивающиеся потоки



Многопоточный ребристый пластинчатый теплообменник:  
A, B, C, D – теплообменивающиеся потоки

# Теплообменники



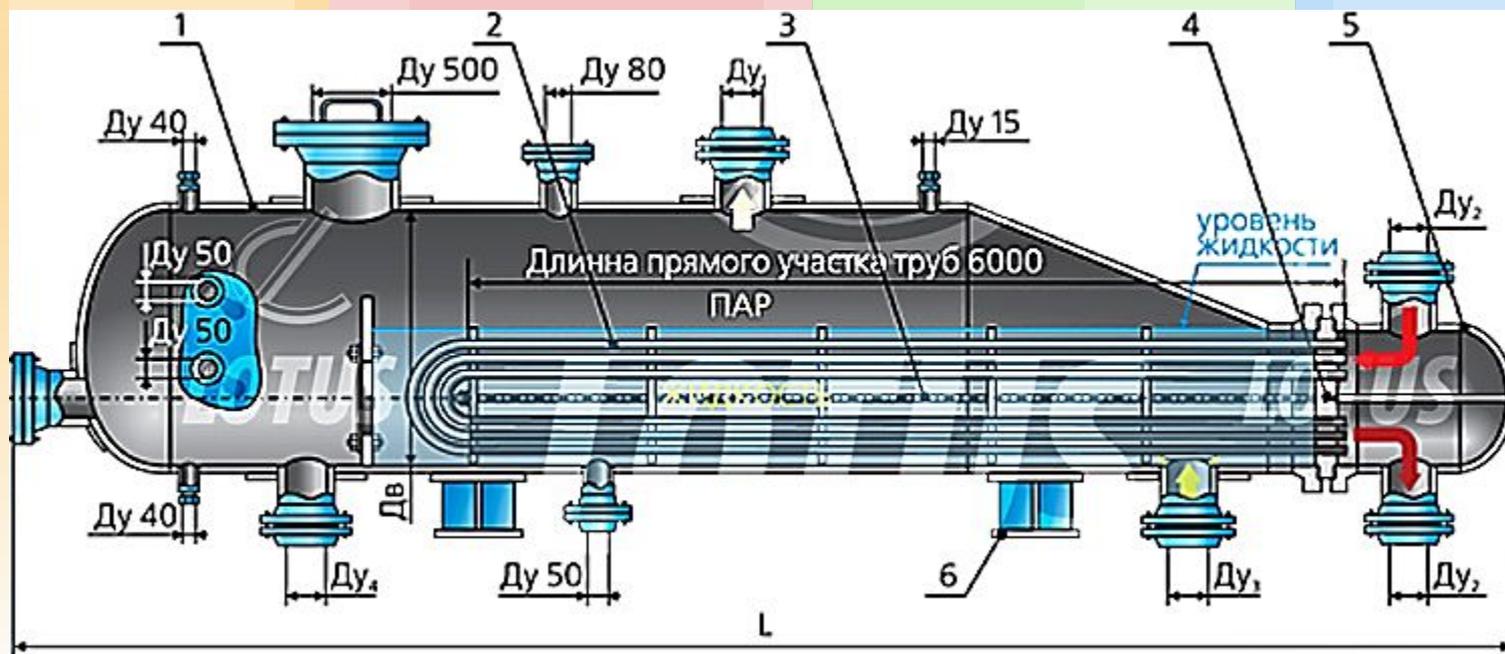
Спиральноновитой теплообменник



Многопоточный ребристо-пластинчатый теплообменник



# Теплообменники



## Кожухотрубчатый испаритель с паровым пространством

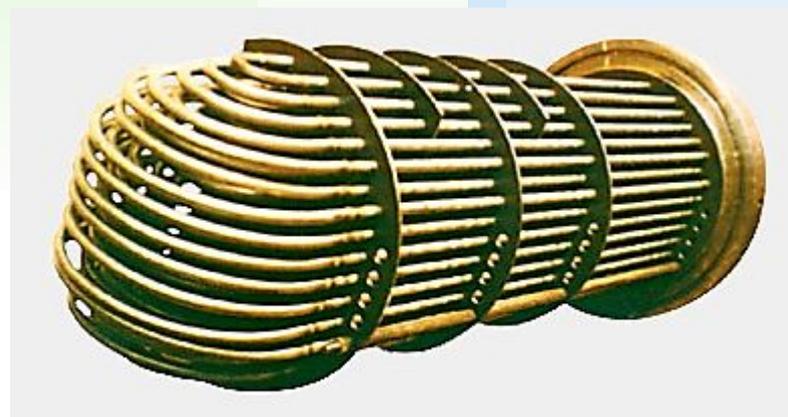
1 — кожух испарителя; 2 — пучок трубный U-образный; 3 — стяжка; 4 — решетка трубная; 5 — крышка распределительной камеры; 6 — опора.

Ду 200 мм — для монтажа пучка; Ду 40 мм — для регулятора уровня; Ду<sub>4</sub> — выход остатка продукта; Ду 50 — дренаж; Ду<sub>3</sub> — вход жидкого продукта; Ду<sub>2</sub> — выход пара или жидкости; Ду<sub>2</sub> — вход пара или жидкости; Ду 15 мм — для манометра; Ду<sub>1</sub> — выход паров продукта; Ду 80 мм — для предохранительного клапана; Люк Ду 500 мм; Ду 50 мм — для указателя уровня.

# Теплообменники



Кожухотрубчатый испаритель с паровым пространством



Трубный пучок

# Компрессоры



## КОМПРЕССОРЫ

### АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ (ТУРБОКОМПРЕССОРЫ)

Центробежные  
(радиальные)

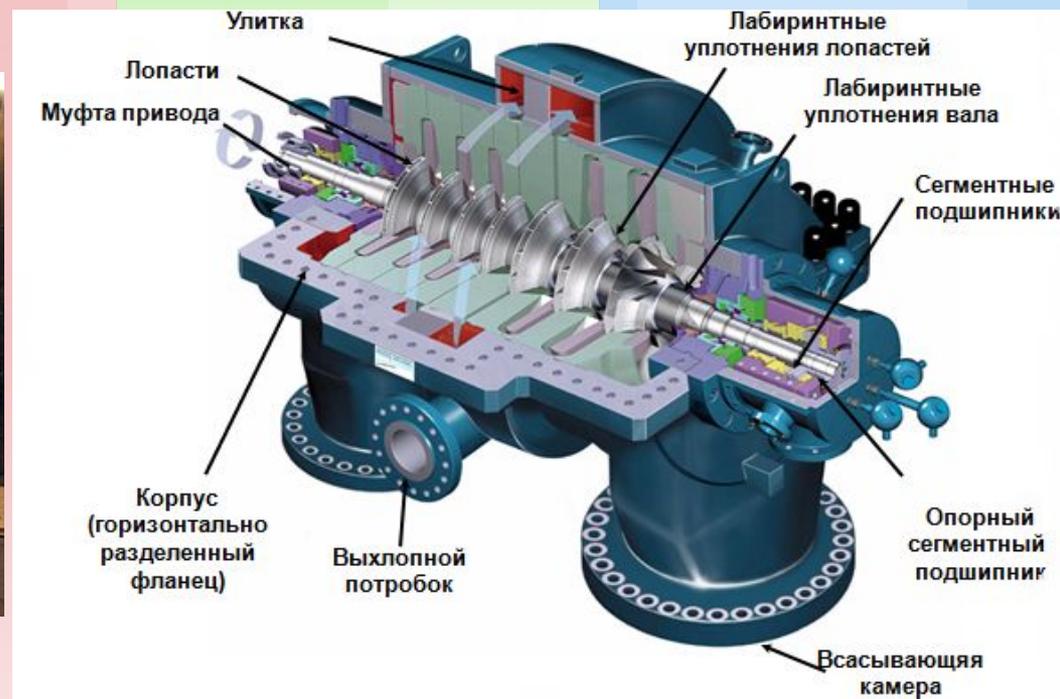
Осевые

### ОБЪЕМНЫЕ

Поршневые

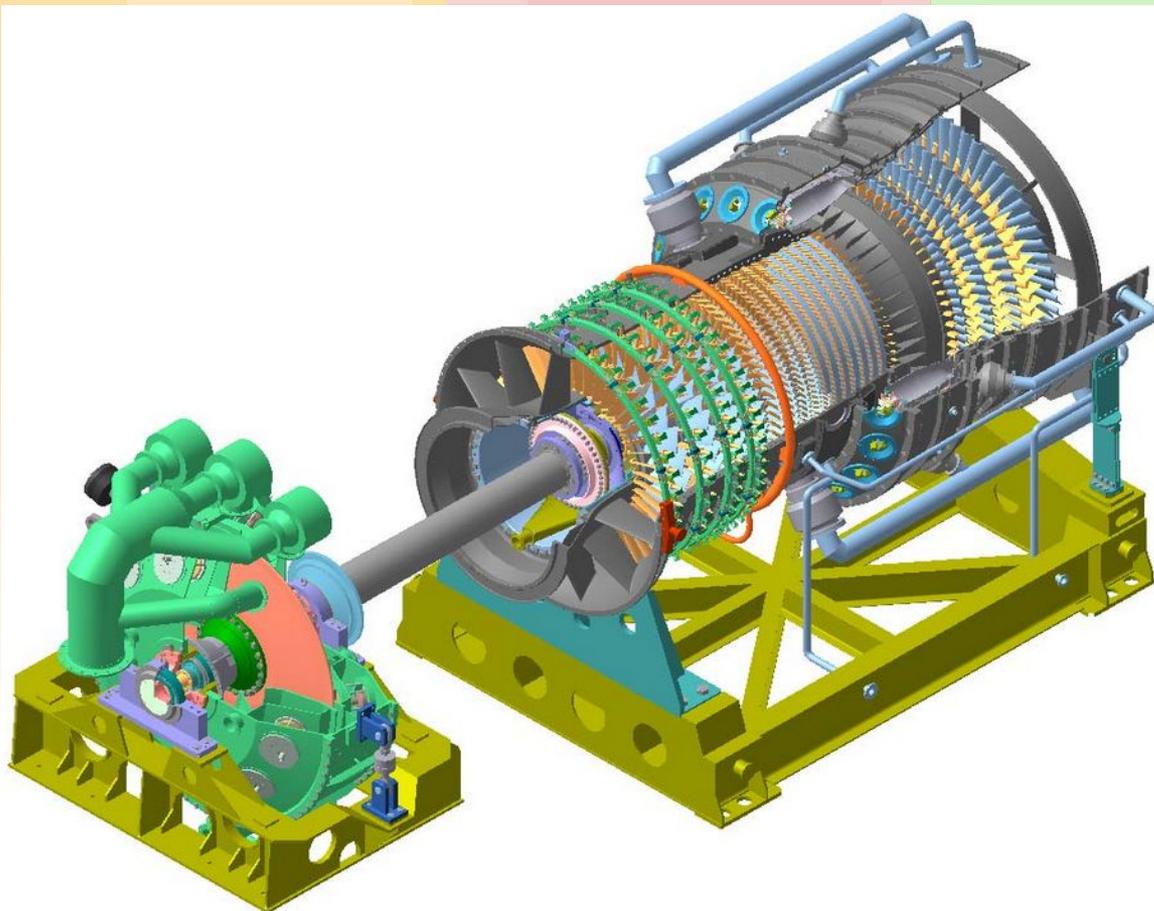
Роторные

# Компрессоры

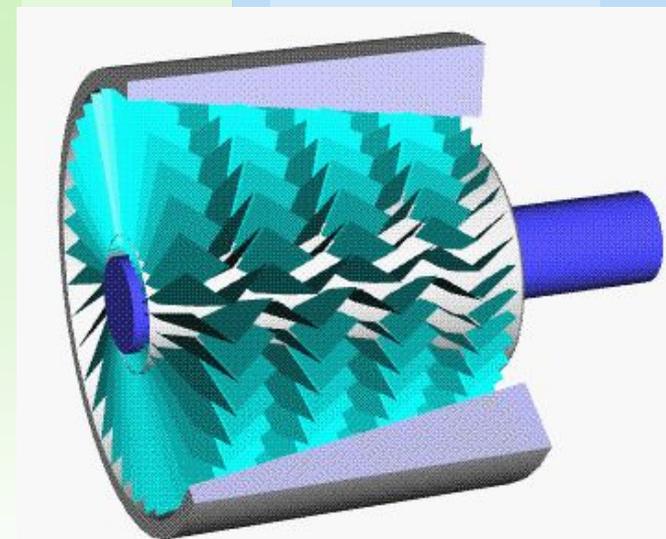


Центробежный компрессор

# Компрессоры



Осевой компрессор



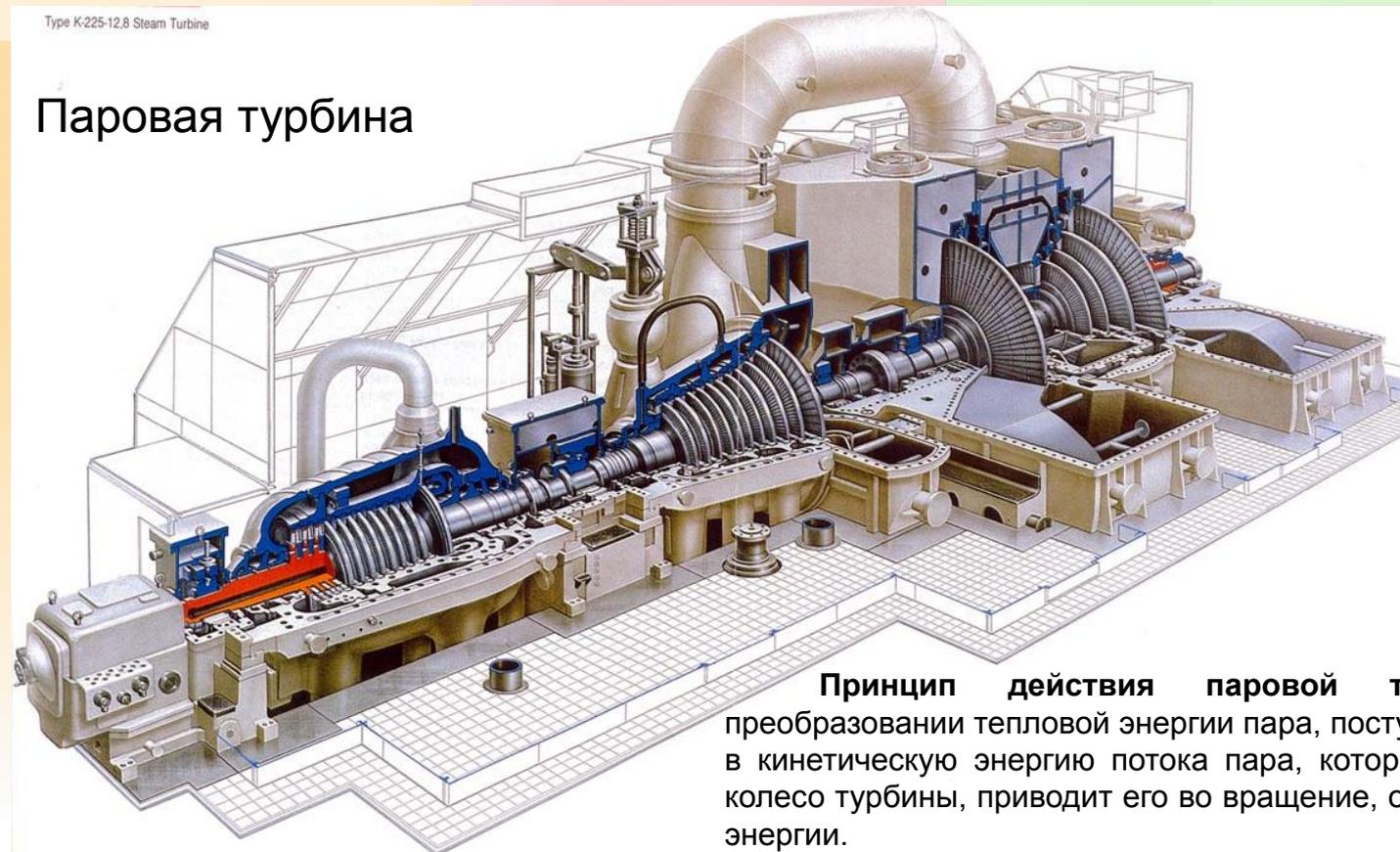
Принцип работы  
осевого компрессора

# Приводы компрессоров



Type K-225-12.8 Steam Turbine

## Паровая турбина



**Принцип действия паровой турбины** заключается в преобразовании тепловой энергии пара, поступающего из парогенератора, в кинетическую энергию потока пара, который, воздействуя на рабочее колесо турбины, приводит его во вращение, отдавая при этом часть своей энергии.

Поступающий из парогенератора к турбине пар сначала проходит через сопло, где его потенциальная энергия преобразуется в кинетическую энергию потока, после чего с большой скоростью направляется на рабочие лопатки, расположенные на ободе диска (ротора), закрепленного на валу турбины.

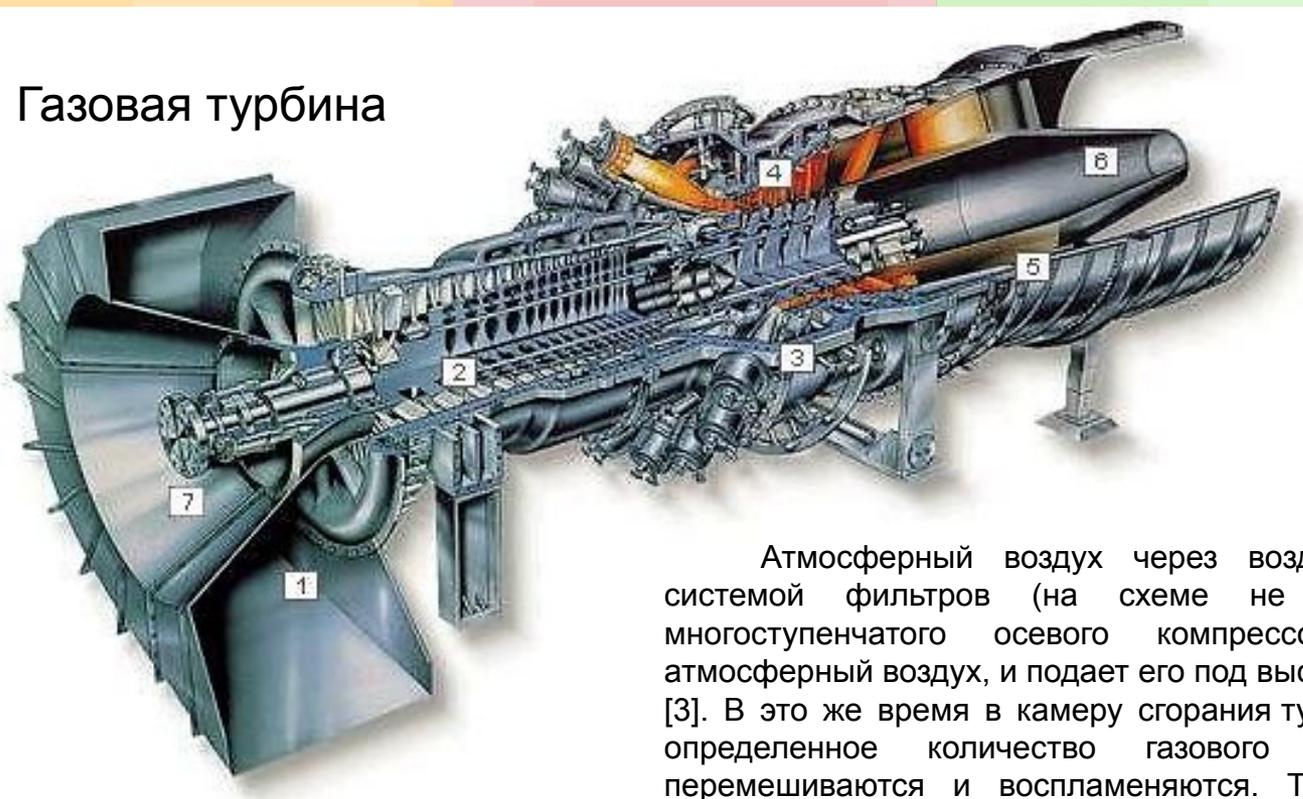
Рабочие лопатки имеют изогнутую форму и в совокупности образуют систему криволинейных каналов (так называемую рабочую решетку). При повороте потока пара в каналах таких решеток возникают центробежные и реактивные силы, вращающие диск (ротор) и связанный с ним вал, соединенный через специальную муфту с компрессором (или другим рабочим механизмом, например насосом, электрическим генератором, воздухоподводкой и т.п.).



# Приводы компрессоров



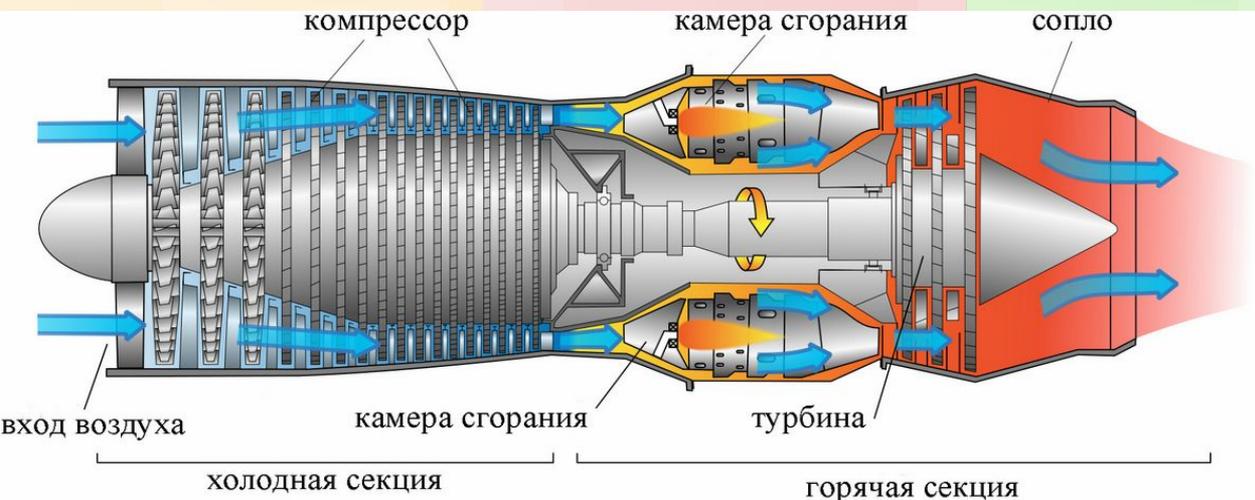
## Газовая турбина



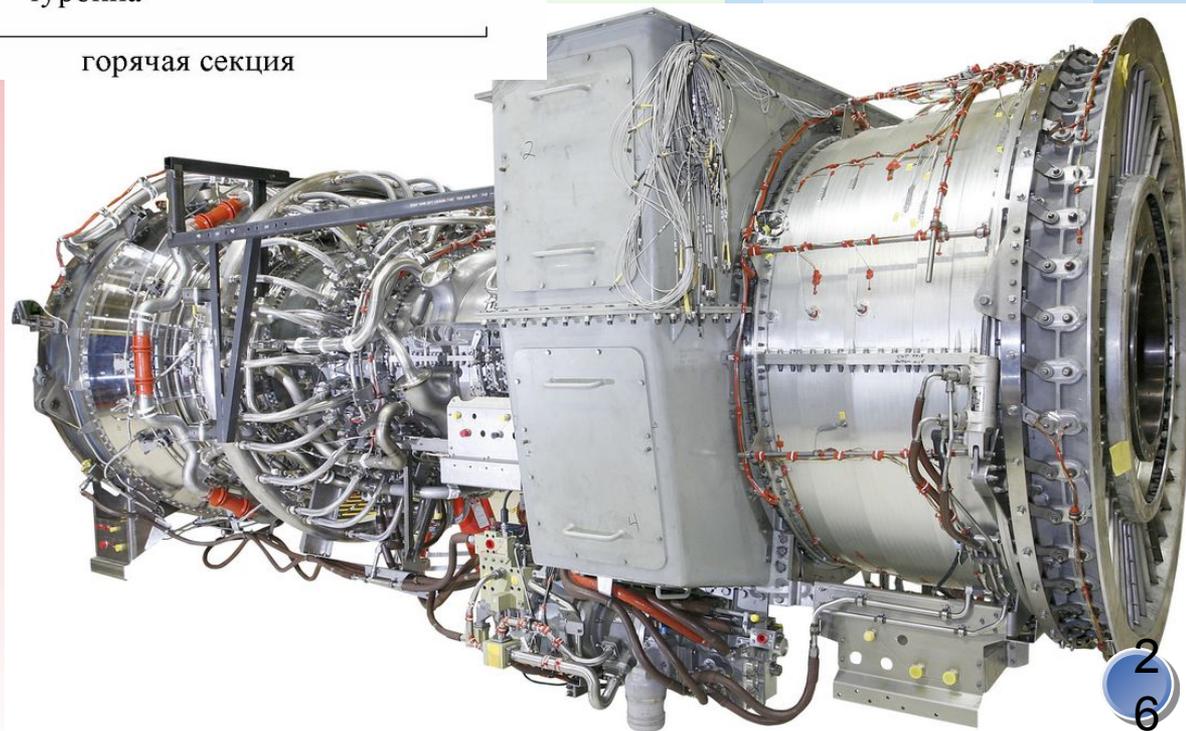
Атмосферный воздух через воздухозаборник [1], оборудованный системой фильтров (на схеме не показаны) подается на вход многоступенчатого осевого компрессора [2]. Компрессор сжимает атмосферный воздух, и подает его под высоким давлением в камеру сгорания [3]. В это же время в камеру сгорания турбины через форсунки подается и определенное количество газового топлива. Топливо и воздух перемешиваются и воспламеняются. Топливовоздушная смесь сгорает, выделяя большое количество энергии.

Энергия газообразных продуктов сгорания преобразуется в механическую работу за счёт вращения струями раскаленного газа лопаток турбины [4]. Часть полученной энергии расходуется на сжатие воздуха в компрессоре [2] турбины. Остальная часть работы передается на компрессор через ось привода [7]. Эта работа является полезной работой газовой турбины. Продукты сгорания, которые имеют температуру порядка 500-550 °С, выводятся через выхлопной тракт [5] и диффузор турбины [6], и могут быть далее использованы, например, в теплоутилизаторе, для получения тепловой энергии.

# Приводы компрессоров



Устройство  
авиационной газовой  
турбины

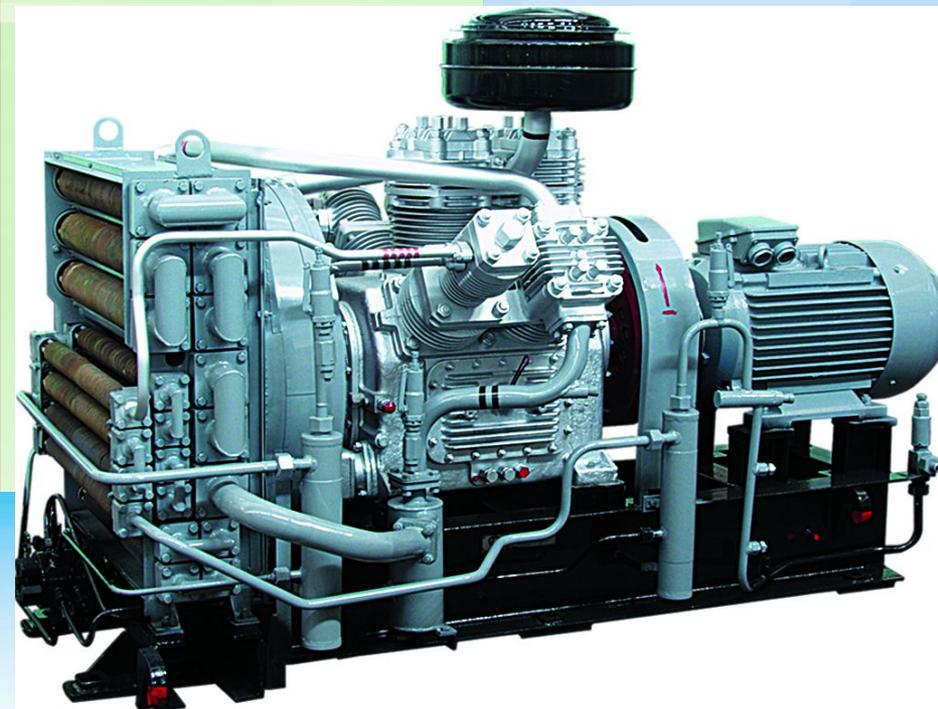


Авиационная газовая  
турбина GE LM6000-PF  
мощностью 35 – 60 МВт

# Приводы компрессоров



Электродвигатели



В сборе с поршневым компрессором



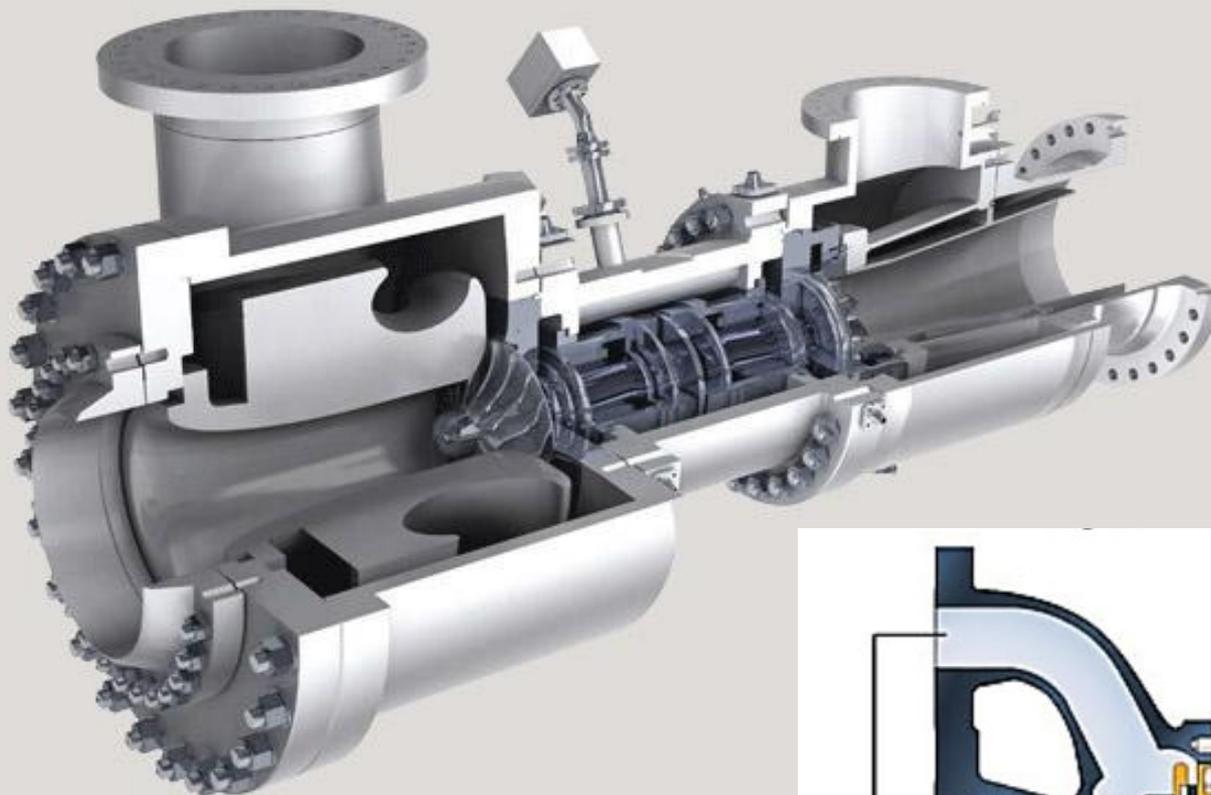
# Компрессоры



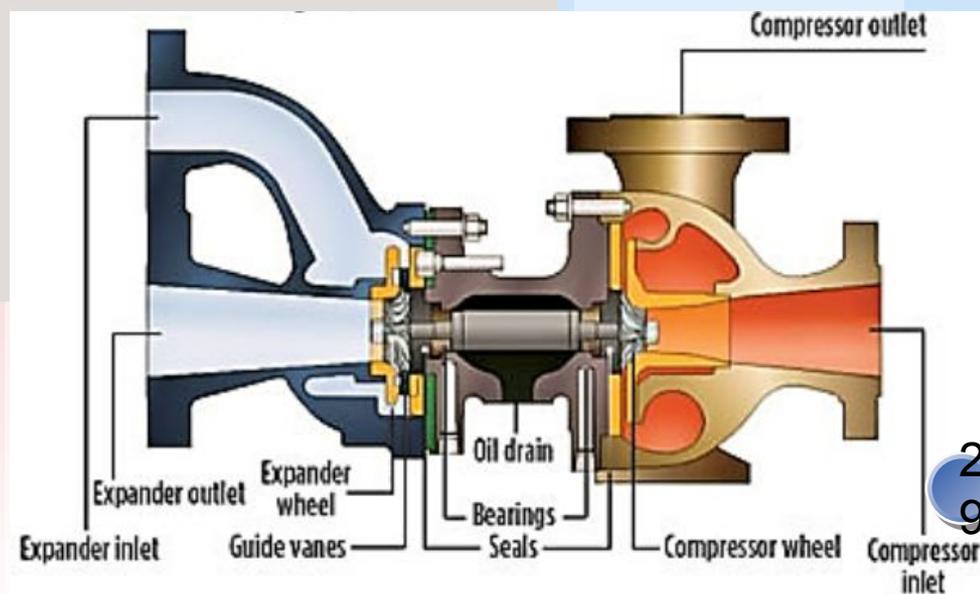
## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ КОМПРЕССОРНЫХ ПРИВОДОВ

Тип привода	Преимущества	Недостатки
Паровые турбины	<ul style="list-style-type: none"><li>• Хорошо зарекомендовали себя в производстве СПГ</li><li>• Выбор турбины зависит от требуемой мощности</li><li>• Регулируемая скорость вращения</li><li>• Простота эксплуатации и пуска</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Требуют создания на заводе крупной инфраструктуры (вода, пар и системы конденсации)</li><li>• Увеличивают общую стоимость завода</li></ul>
Промышленные газовые турбины	<ul style="list-style-type: none"><li>• Большой опыт эксплуатации на заводах СПГ</li><li>• Занимают меньшую площадь</li><li>• Рентабельность</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Одновальные турбины требуют стартеров большой мощности</li></ul>
Авиационные газовые турбины	<ul style="list-style-type: none"><li>• Упрощают схему завода</li><li>• Рентабельность</li><li>• Эффективность использования топлива выше, чем у промышленных газовых турбин</li><li>• Быстро удаляются или заменяются</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Нет опыта эксплуатации в производстве СПГ</li><li>• Необходимо более высокое давление топливного газа, чем у промышленных турбин</li></ul>
Электродвигатели	<ul style="list-style-type: none"><li>• Более низкие капитальные затраты</li><li>• Пониженные эксплуатационные расходы</li><li>• Большая гибкость в увязке с компрессорами</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Зависимость от внешнего источника энергии</li><li>• Проблемы с мощностью, требуемой для запуска двигателя</li></ul>

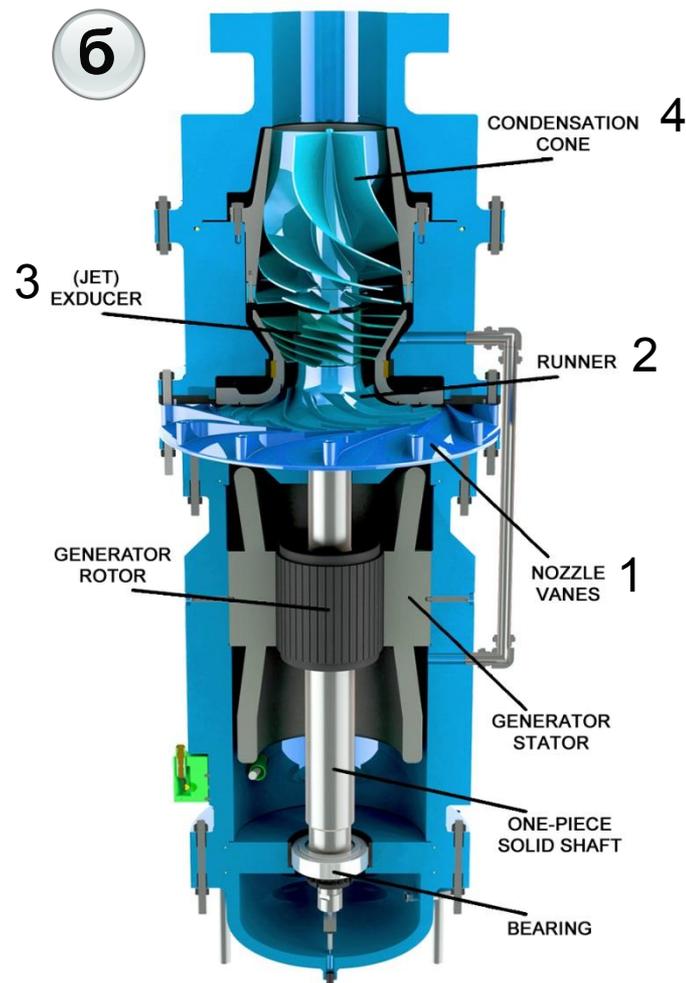
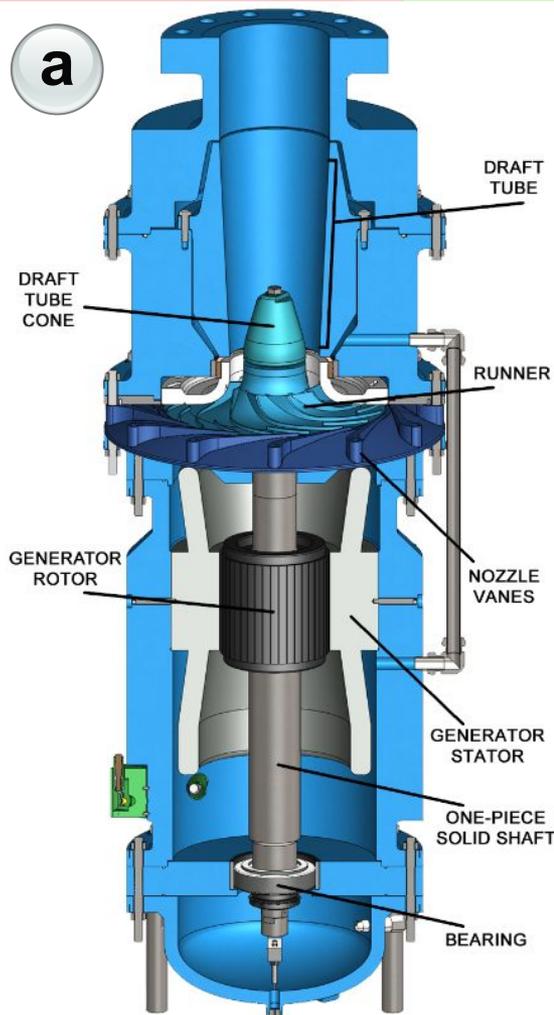
# Турбодетандеры



ГАЗОВЫЙ ТУРБОДЕТАНДЕР



# Турбодетандеры

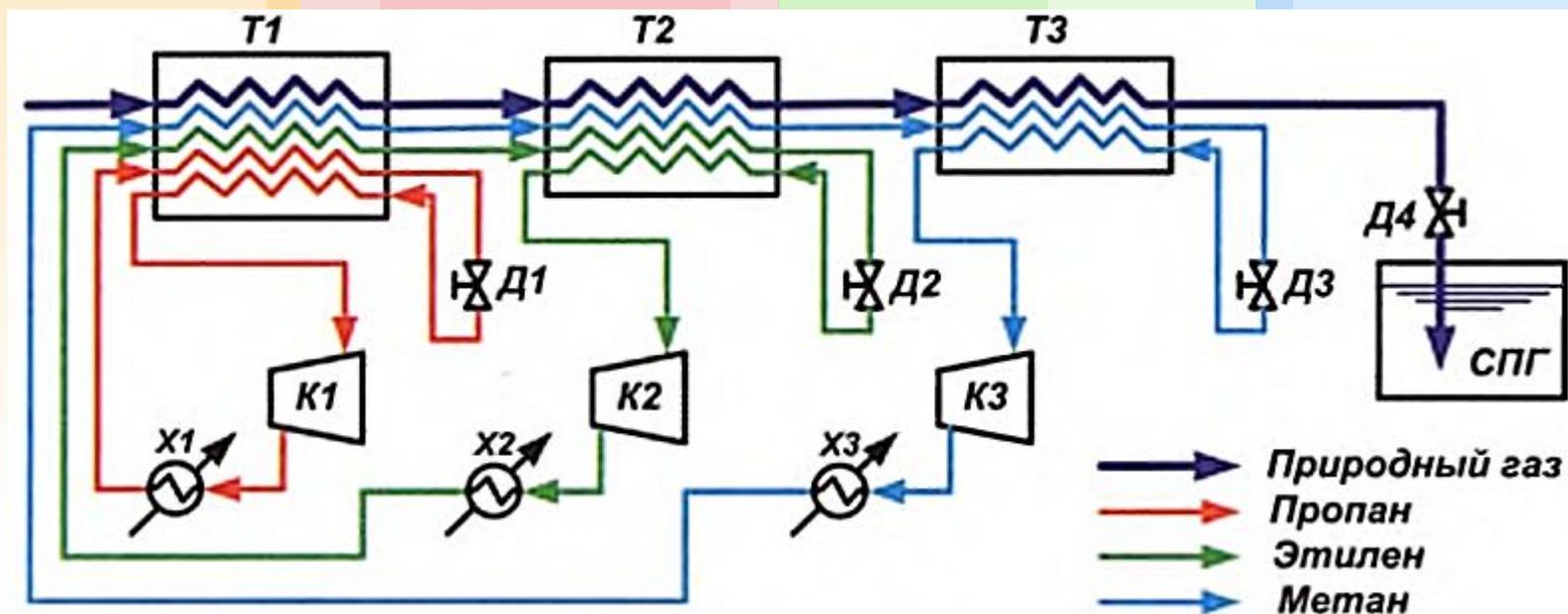


КОНСТРУКЦИИ ЖИДКОСТНОГО (а) И ПАРОЖИДКОСТНОКО (б) ТУРБОДЕТАНДЕРОВ  
1- сопло, 2- радиальное рабочее колесо, 3- «exducer», 4- конус уплотнения.

# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



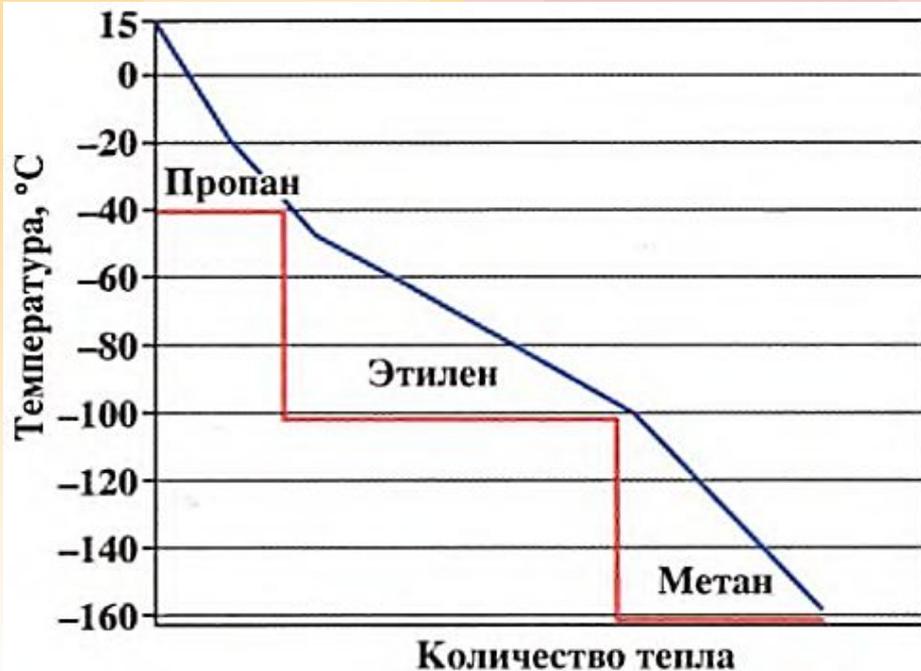
ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА КЛАССИЧЕСКОГО КАСКАДНОГО ЦИКЛА



# Технологии производства СПГ



а



Кривые охлаждения природного газа чистых хладагентов при использовании **одноступенчатых** циклов охлаждения

б



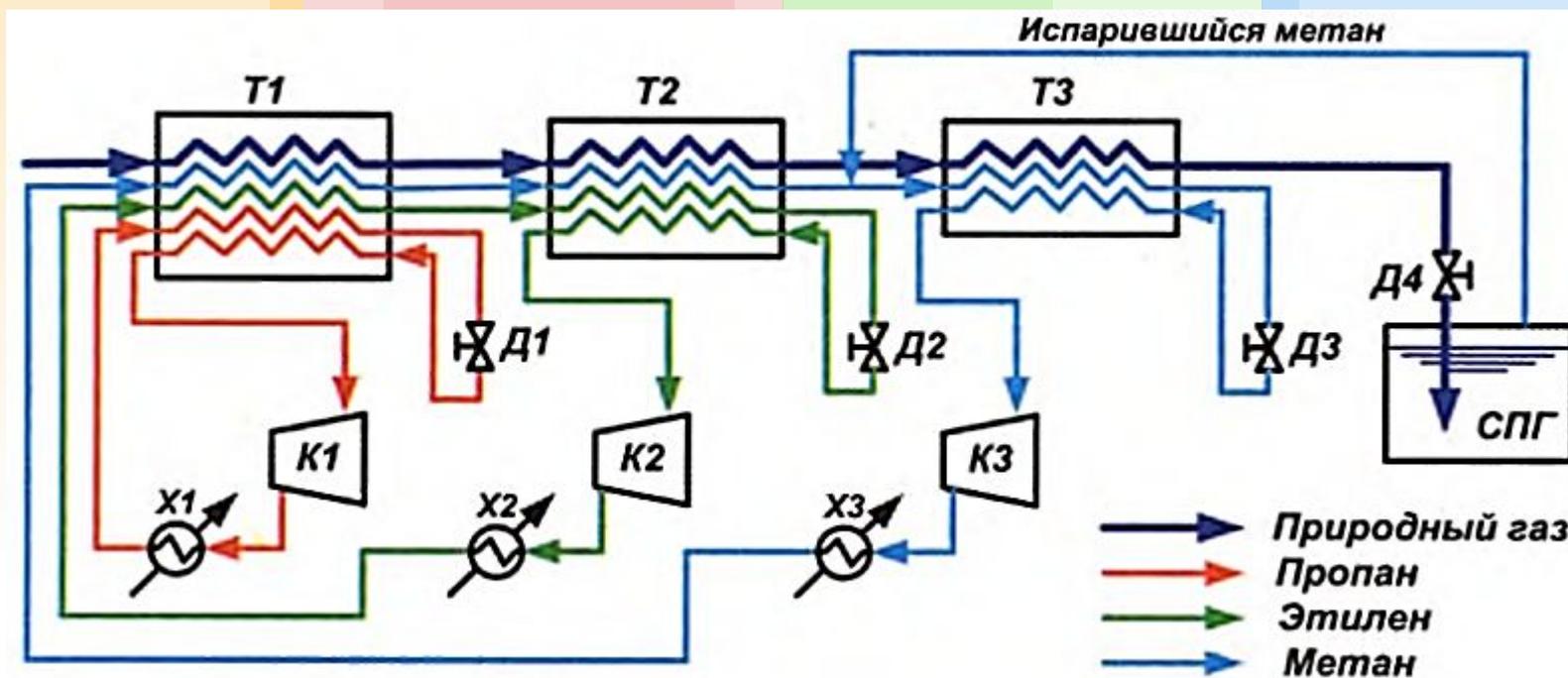
Кривые охлаждения природного газа чистых хладагентов при использовании **трехступенчатых** циклов охлаждения



# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



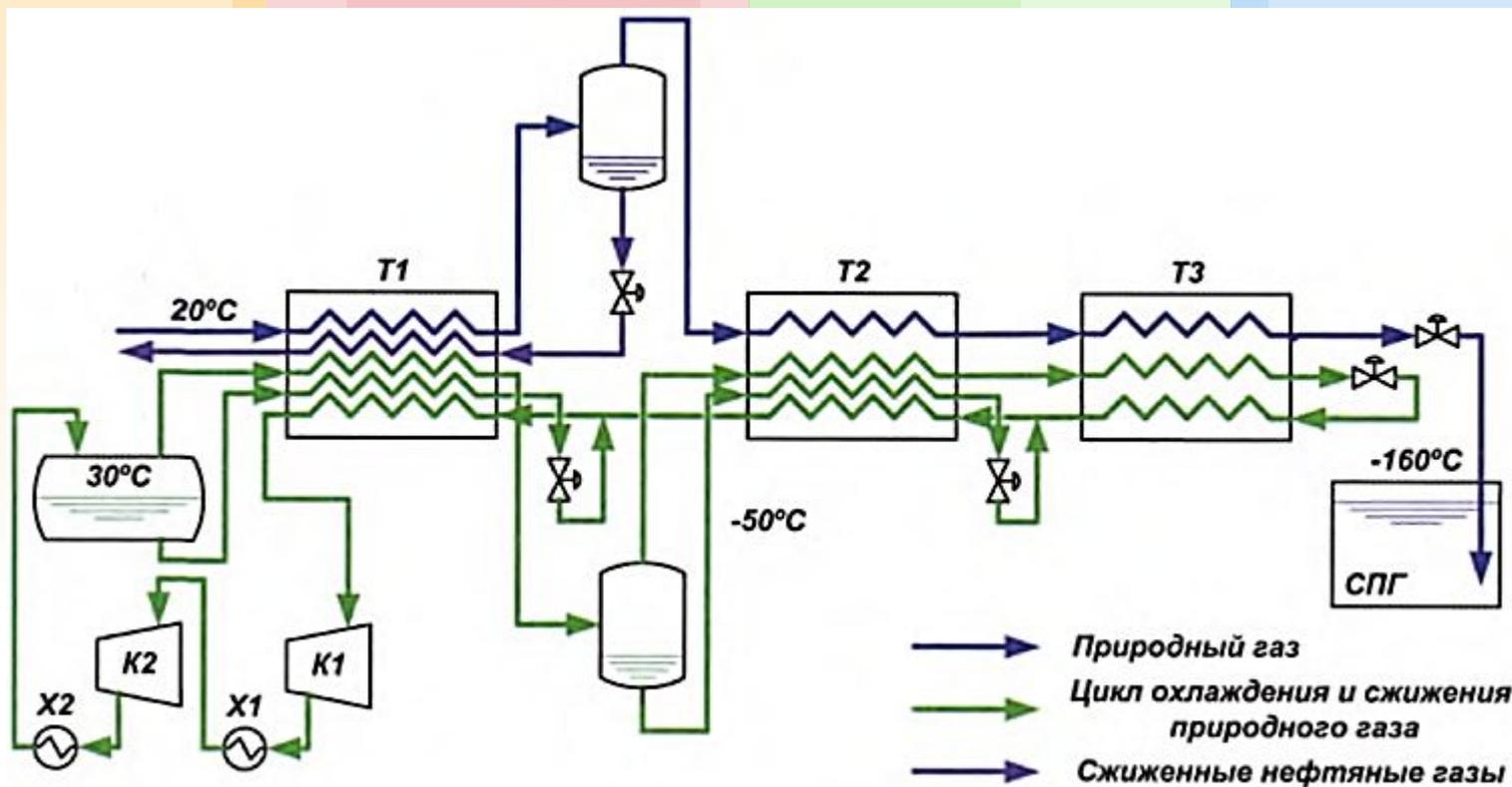
## МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ КАСКАДНЫЙ ПРОЦЕСС PHILLIPS



# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



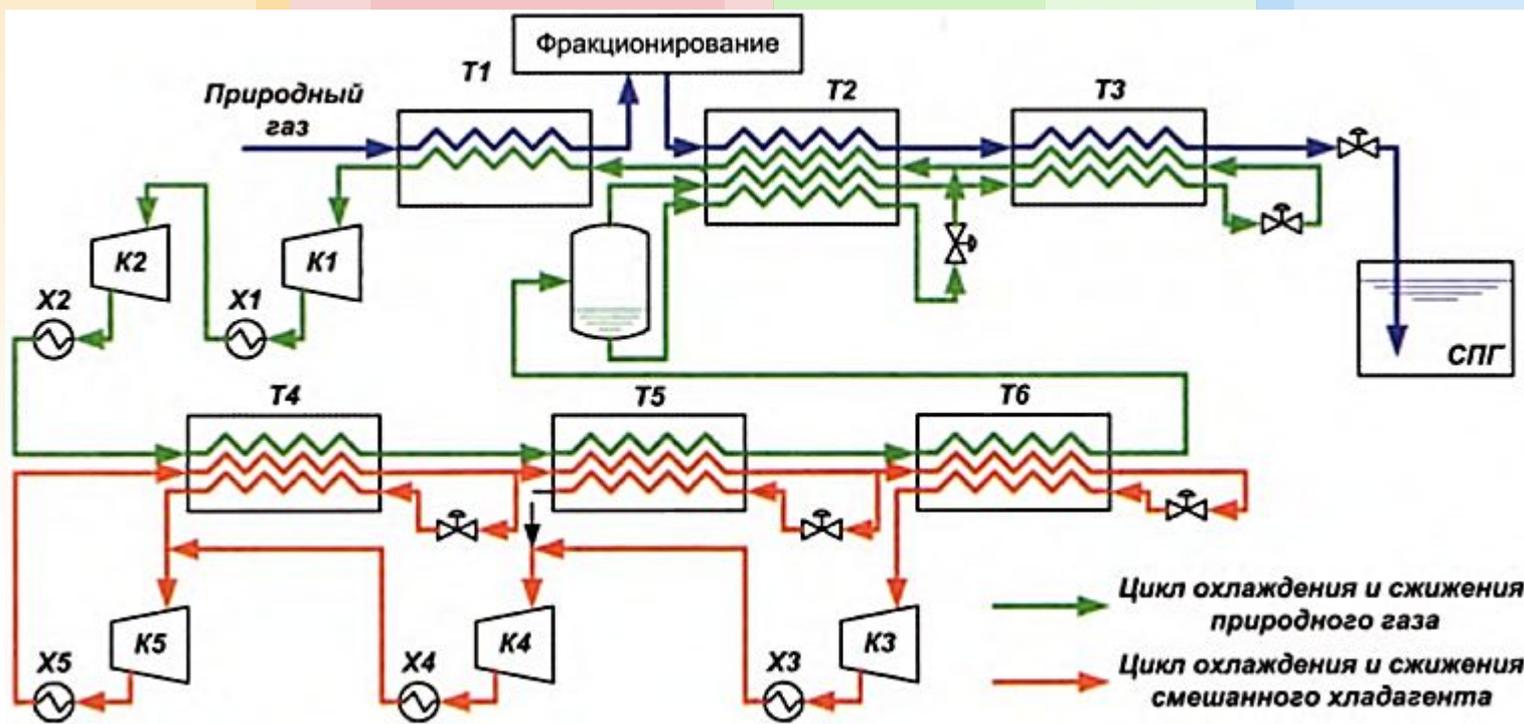
## ПРОЦЕСС **TEALARC** С ОДНИМ УРОВНЕМ ДАВЛЕНИЯ



# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



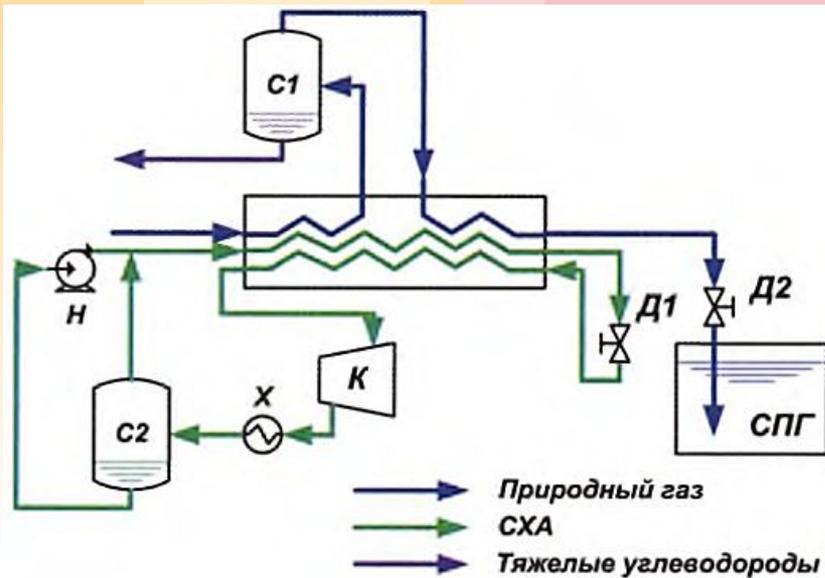
## ПРОЦЕСС TEALARC С ДВУМЯ УРОВНЯМИ ДАВЛЕНИЯ



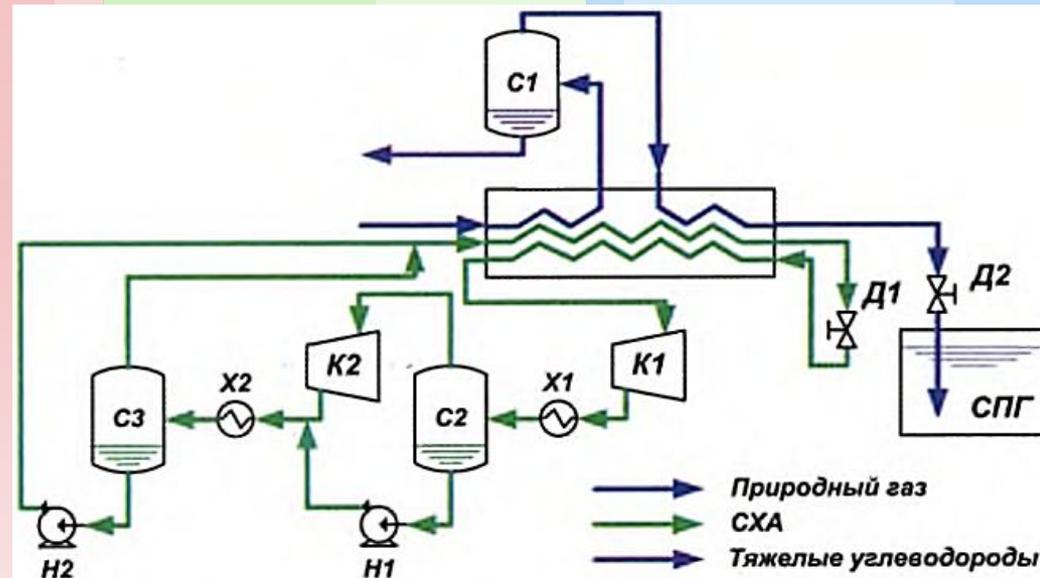
# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



## ПРОЦЕСС PRICO



## МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ПРОЦЕСС PRICO

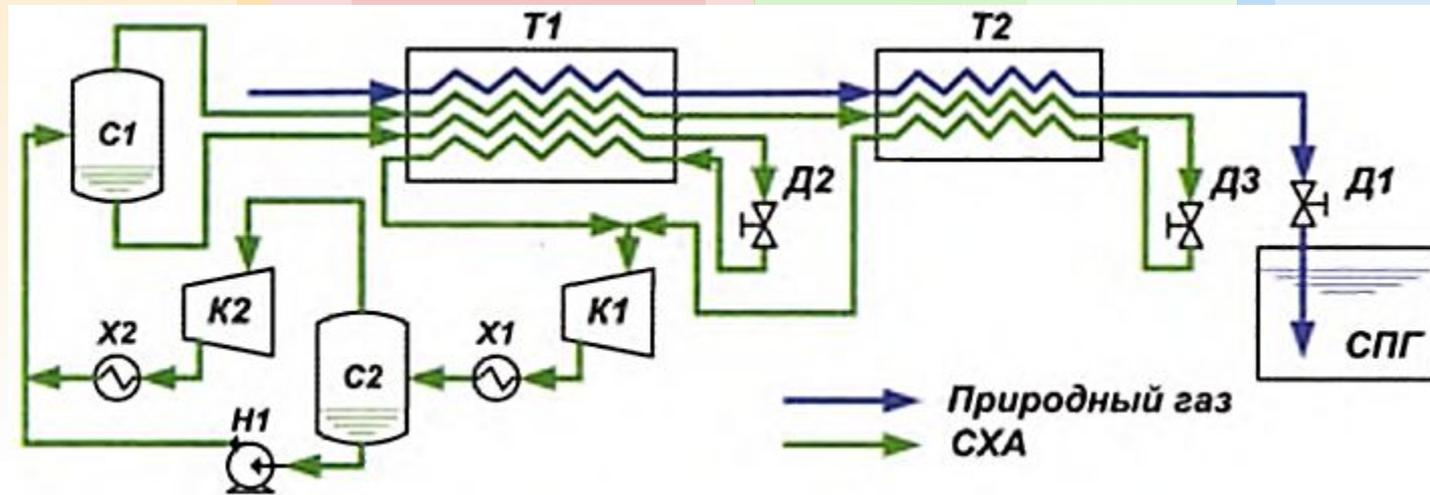


**PRICO** - (Poly Refrigerant Integrated Cycle Operations)

# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



## ПРОЦЕСС APCI SMR

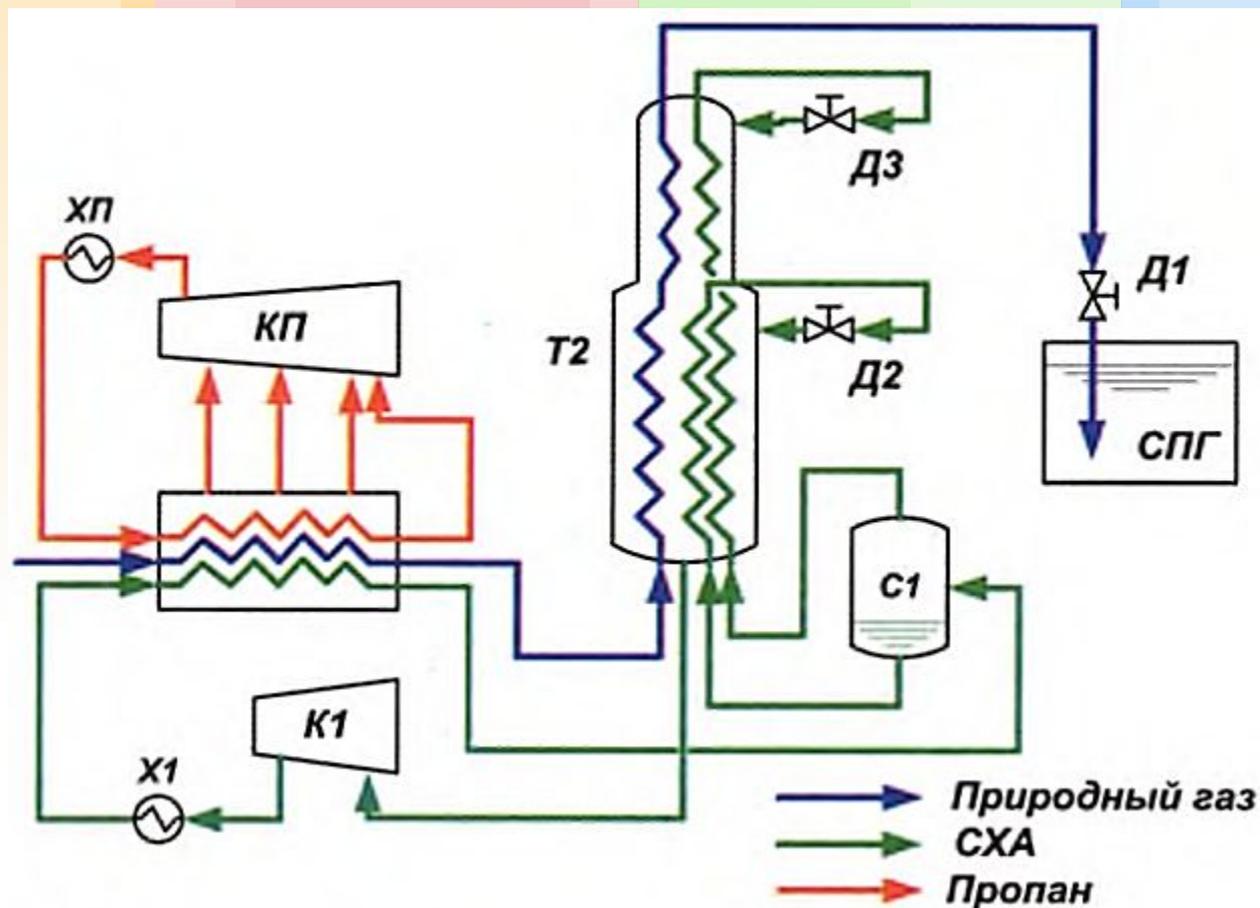


APCI – Air Products and Chemicals Inc.  
SMR – Single Mixed Refrigerant

# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



## ПРОЦЕСС APCI C3MR

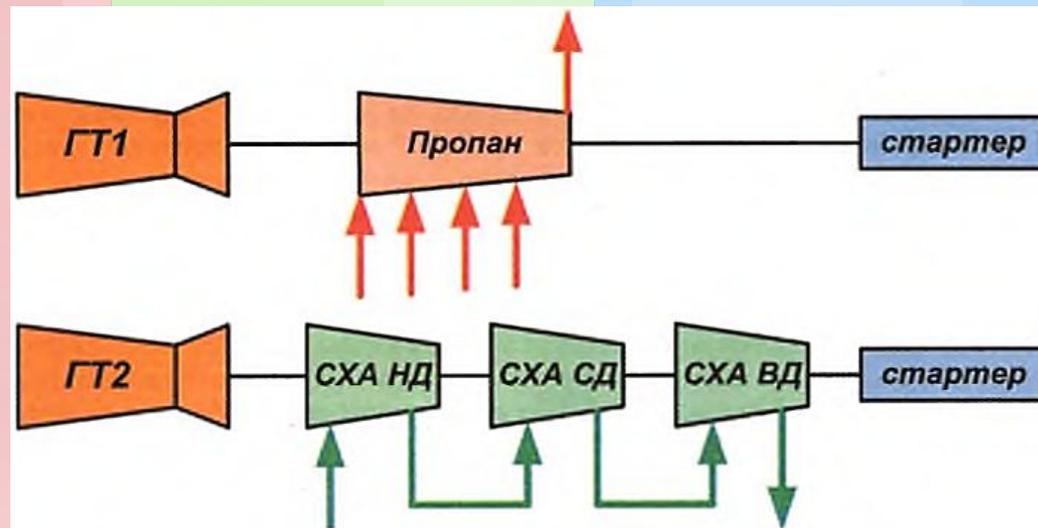


# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



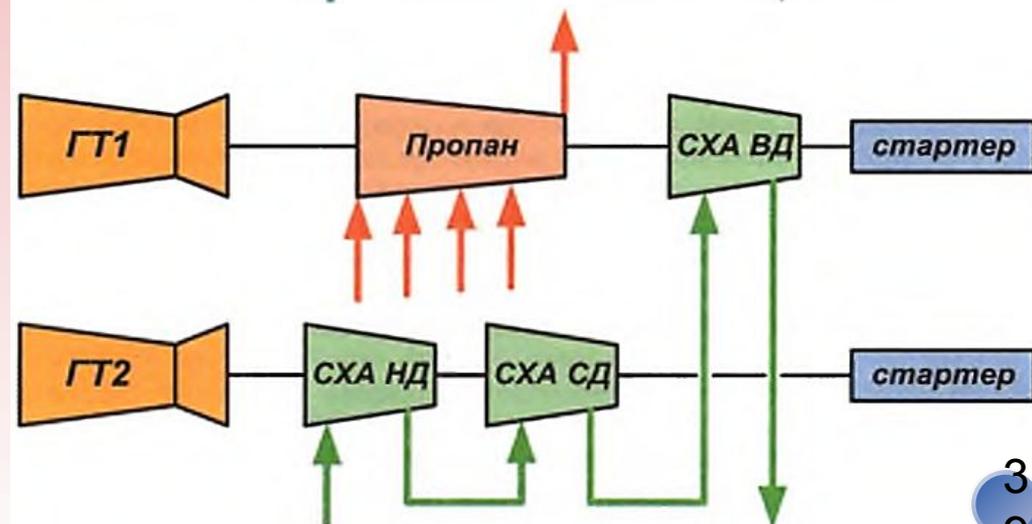
Конфигурация  
компрессоров в процессе  
APCI C3MR

а



Конфигурация  
компрессоров в процессе  
APCI C3MR/SplitMR

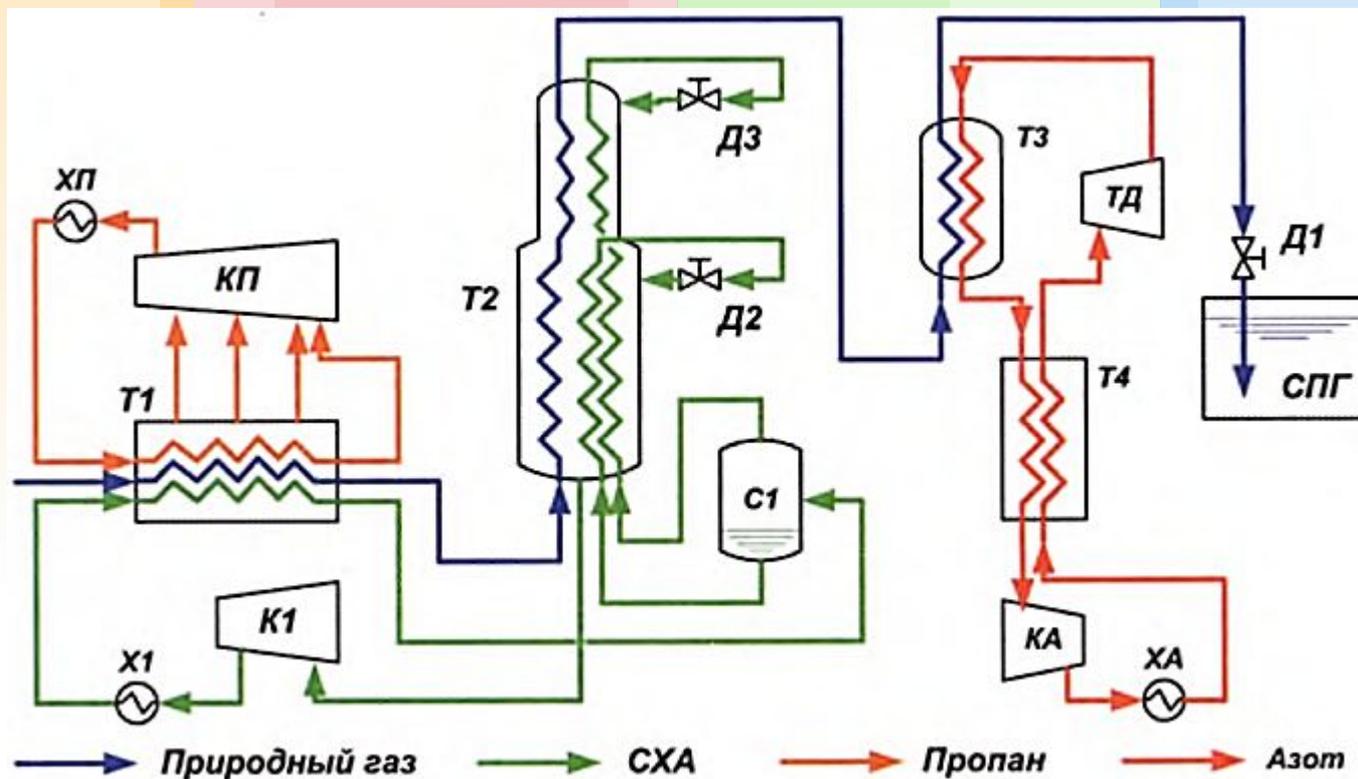
б



# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



## ПРОЦЕСС APC-X



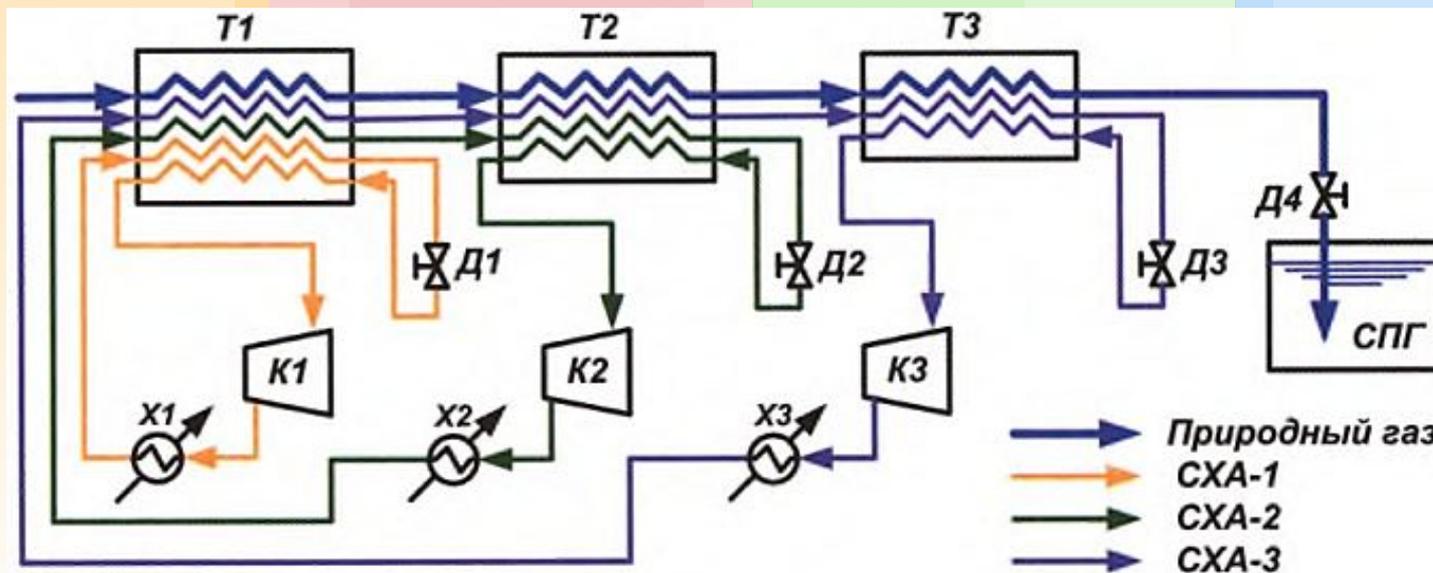


# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



ПРОЦЕСС STATOIL-LINDE MFC

(Mixed Fluid Cascade)



СОСТАВЫ ХЛАДАГЕНТОВ ПРОЦЕССА STATOIL-LINDE MFC

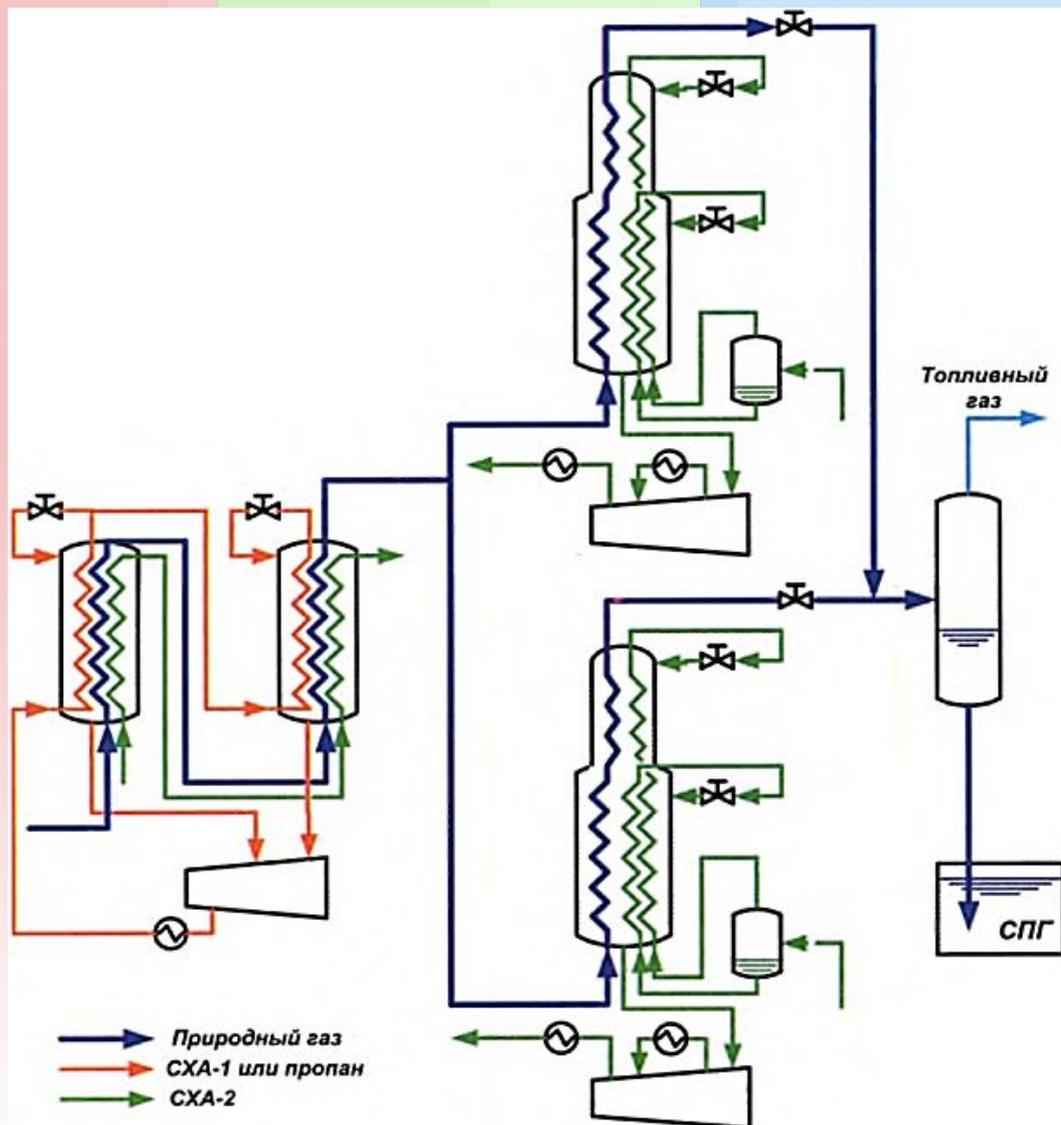
цикл	хладагент	Пропан, %	Этан, %	Метан, %	Азот, %
Предварительного охлаждения		60	28	10	2
Сжижения		3	12	80	5
Переохлаждения		7	10	80	3



# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



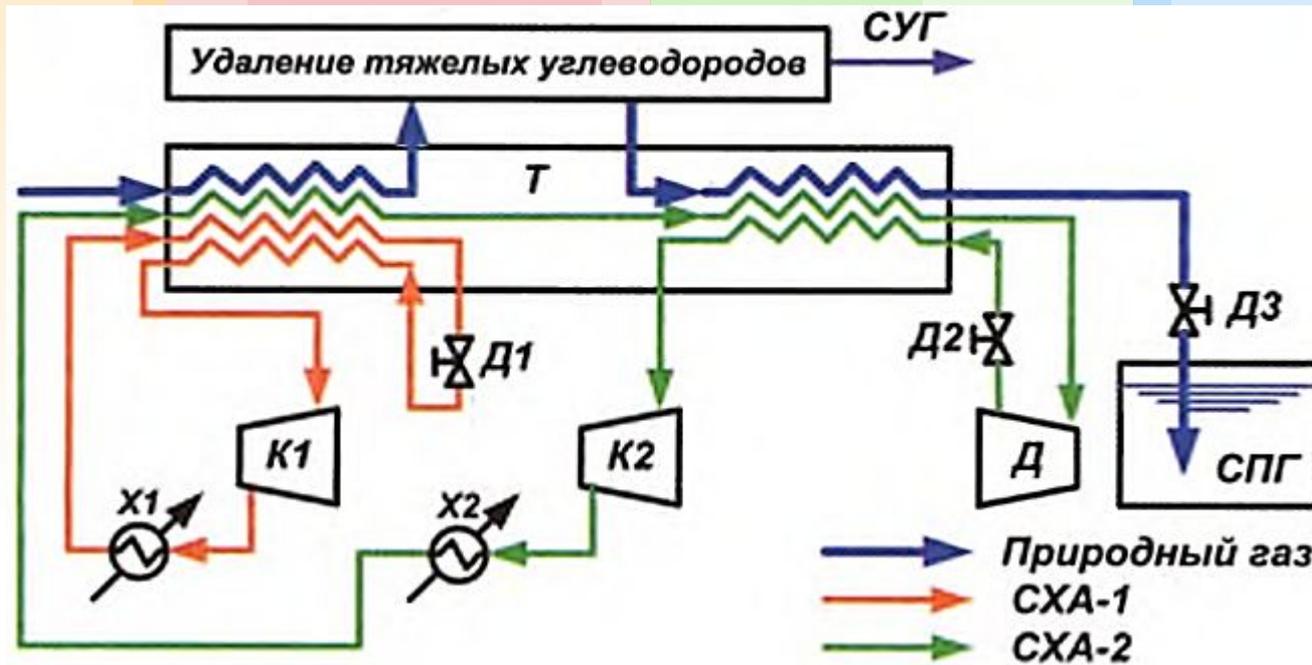
ПРОЦЕСС SHELL **PMR**  
(**P**arallel **M**ixed **R**efrigerant)



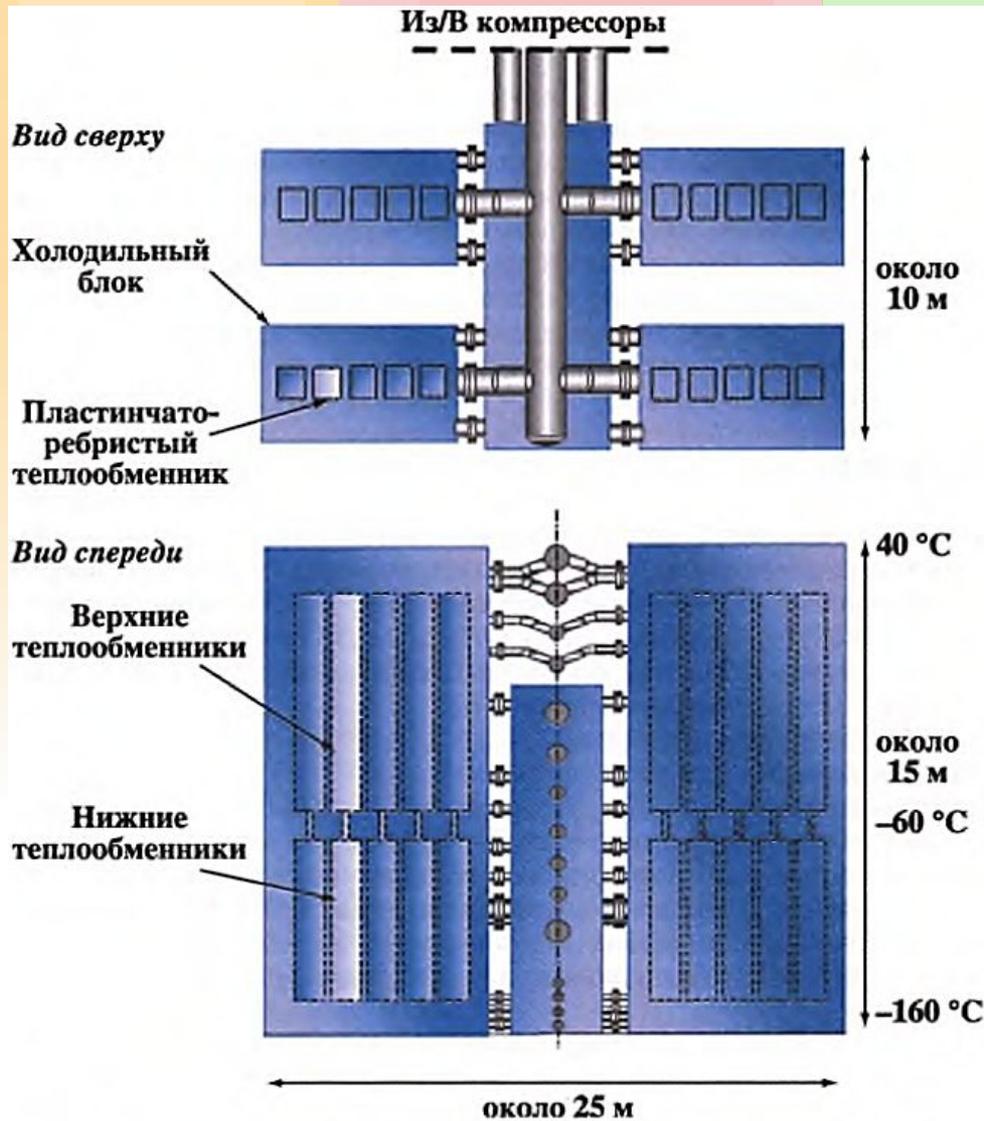
# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



## ПРОЦЕСС AXENS LIQUEFIN



# Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

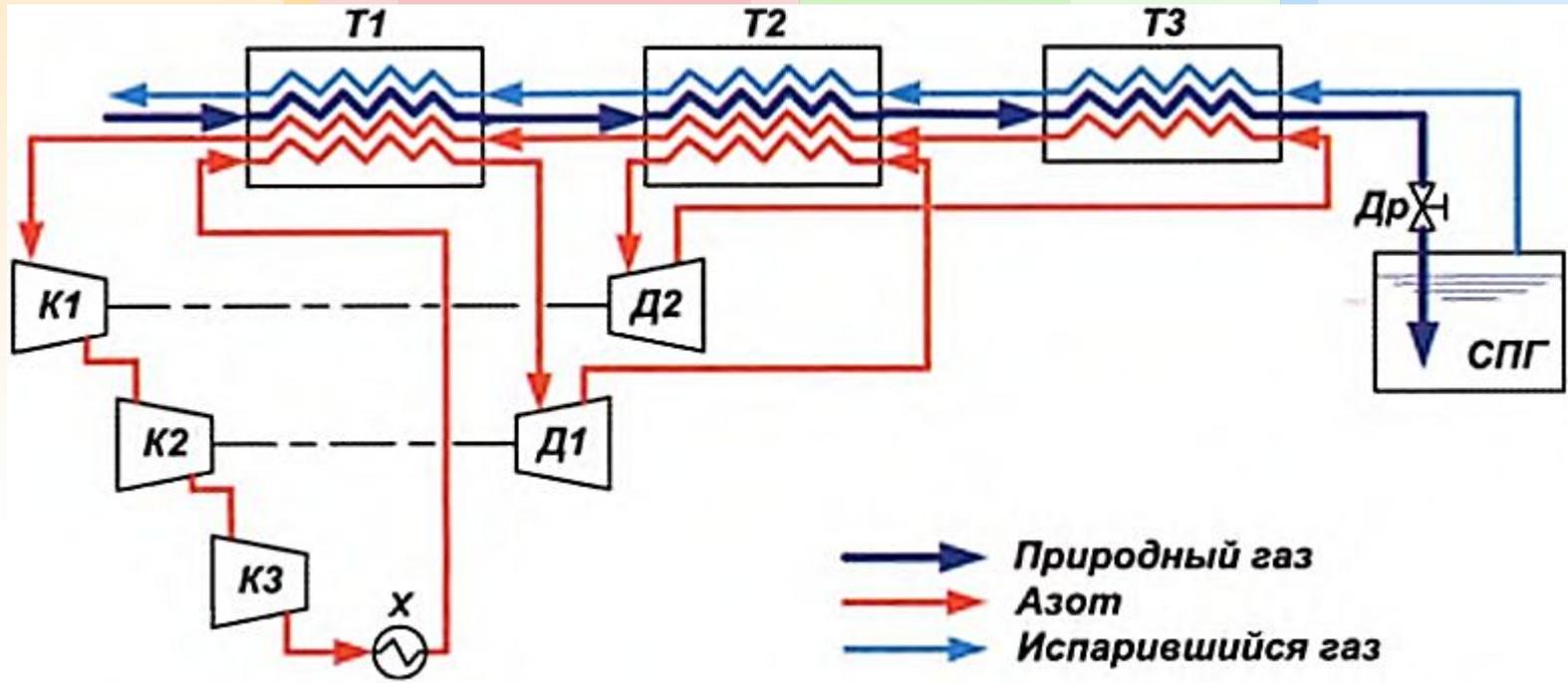


КОНФИГУРАЦИЯ  
ТЕПЛООБМЕННИКОВ  
LIQUEFIN

# Малотоннажное производство СПГ



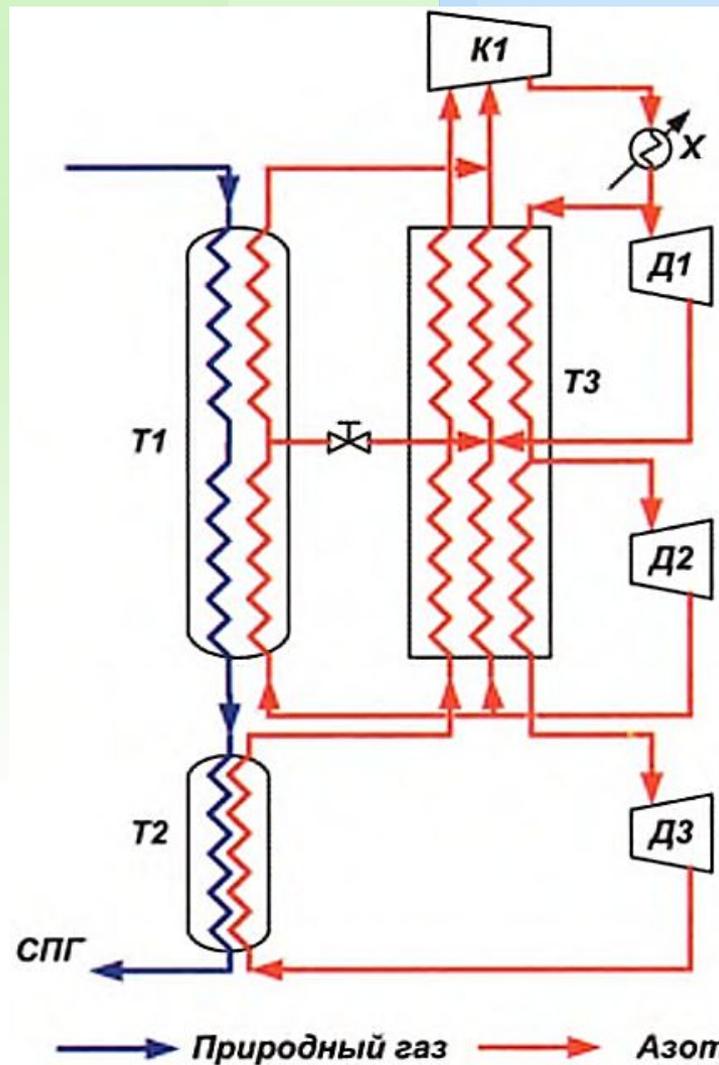
## АЗОТНЫЙ ХОЛОДИЛЬНЫЙ ЦИКЛ С ДВУМЯ ДЕТАНДЕРАМИ



# Малотоннажное производство СПГ



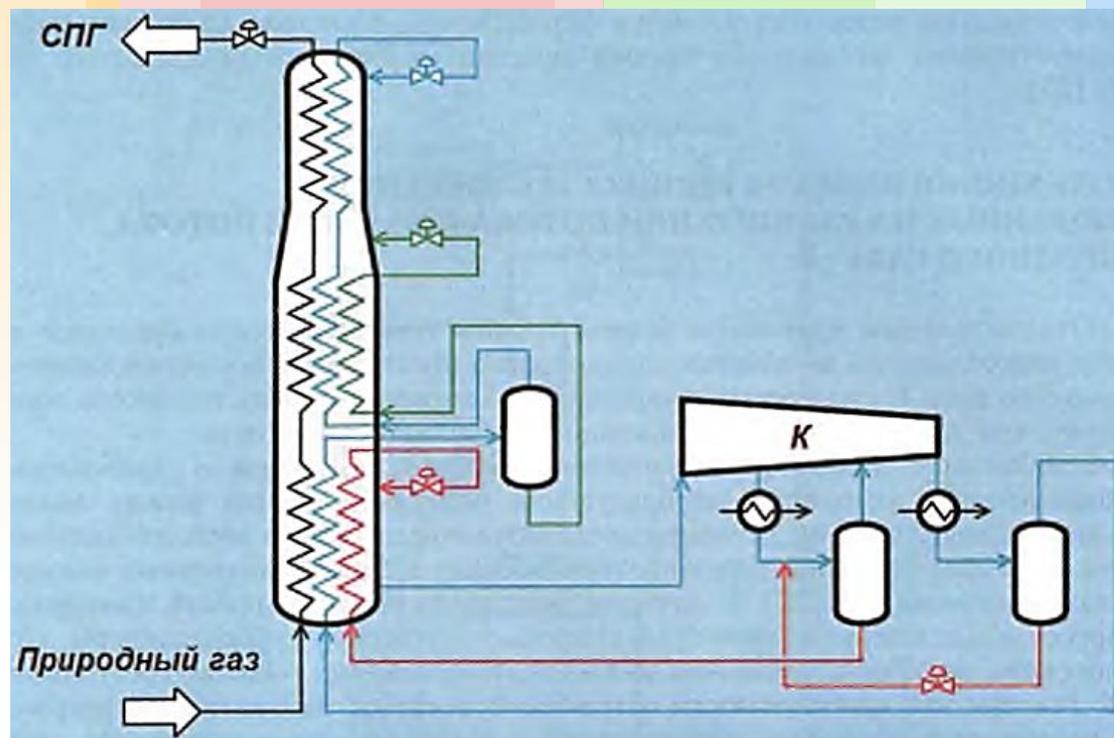
ПРОЦЕСС APCI N2 EXPANDER



# Малотоннажное производство СПГ



## СХЕМА ПРОЦЕССА LINDE LIMUM

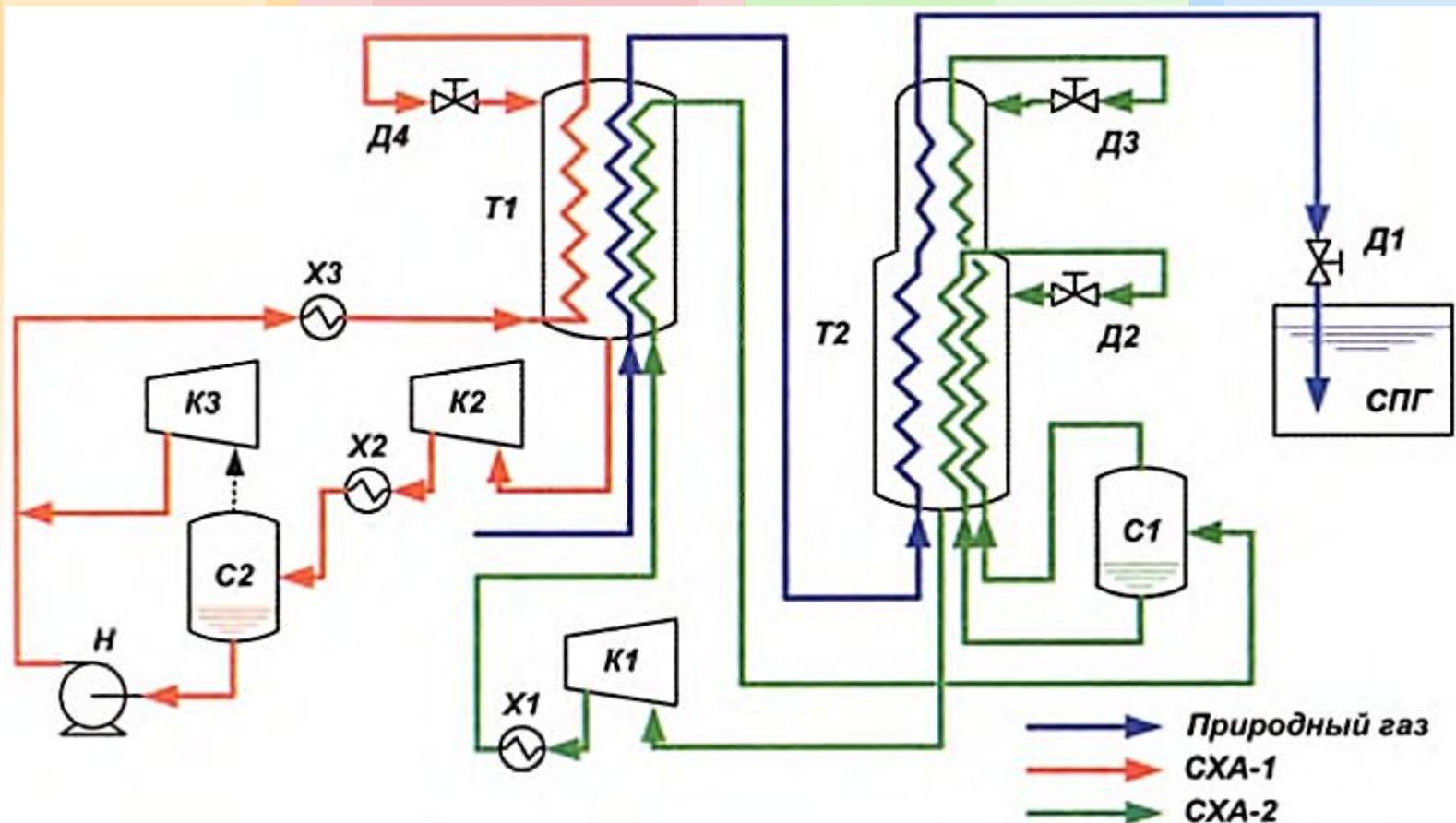




# Малотоннажное производство СПГ



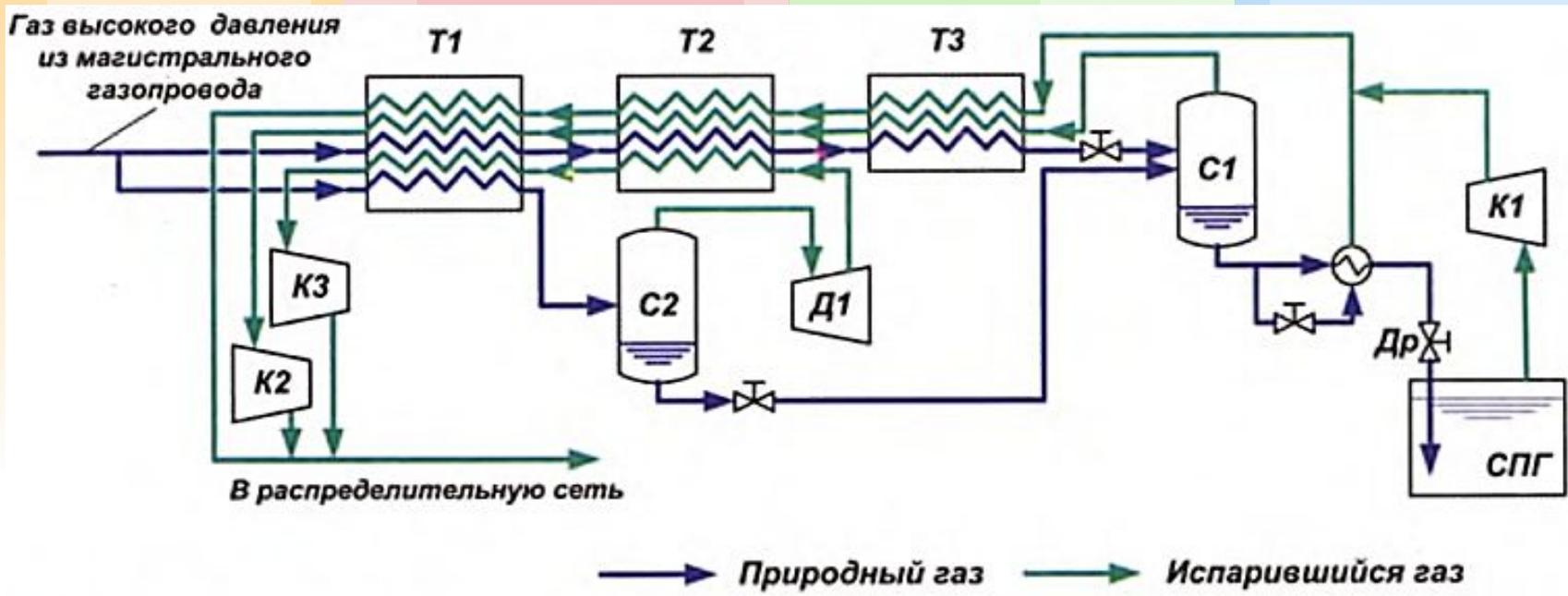
ПРОЦЕСС APCI **DMR** (Dual **M**ixed **R**efrigerant)



# Малотоннажное производство СПГ



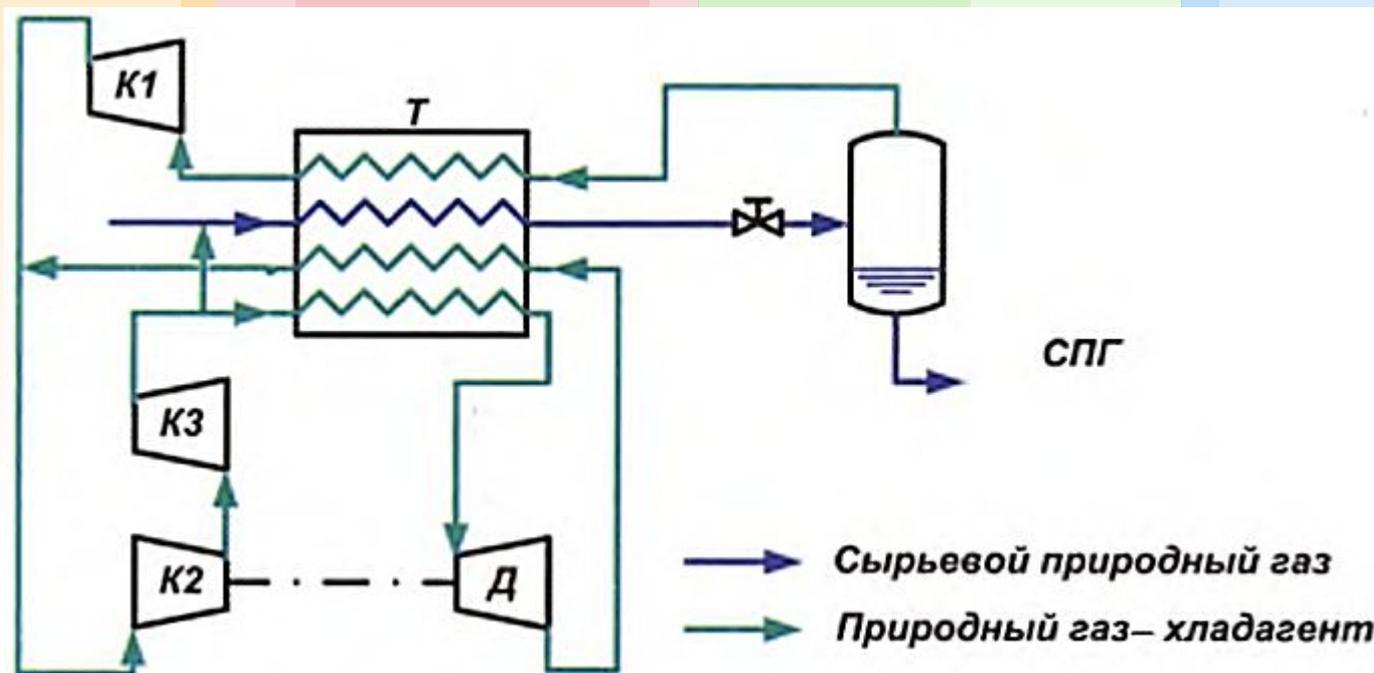
## ПОЛУЧЕНИЕ СПГ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ



# Малотоннажное производство СПГ



Процесс MUSTANG ОСХ-2



# Приложение

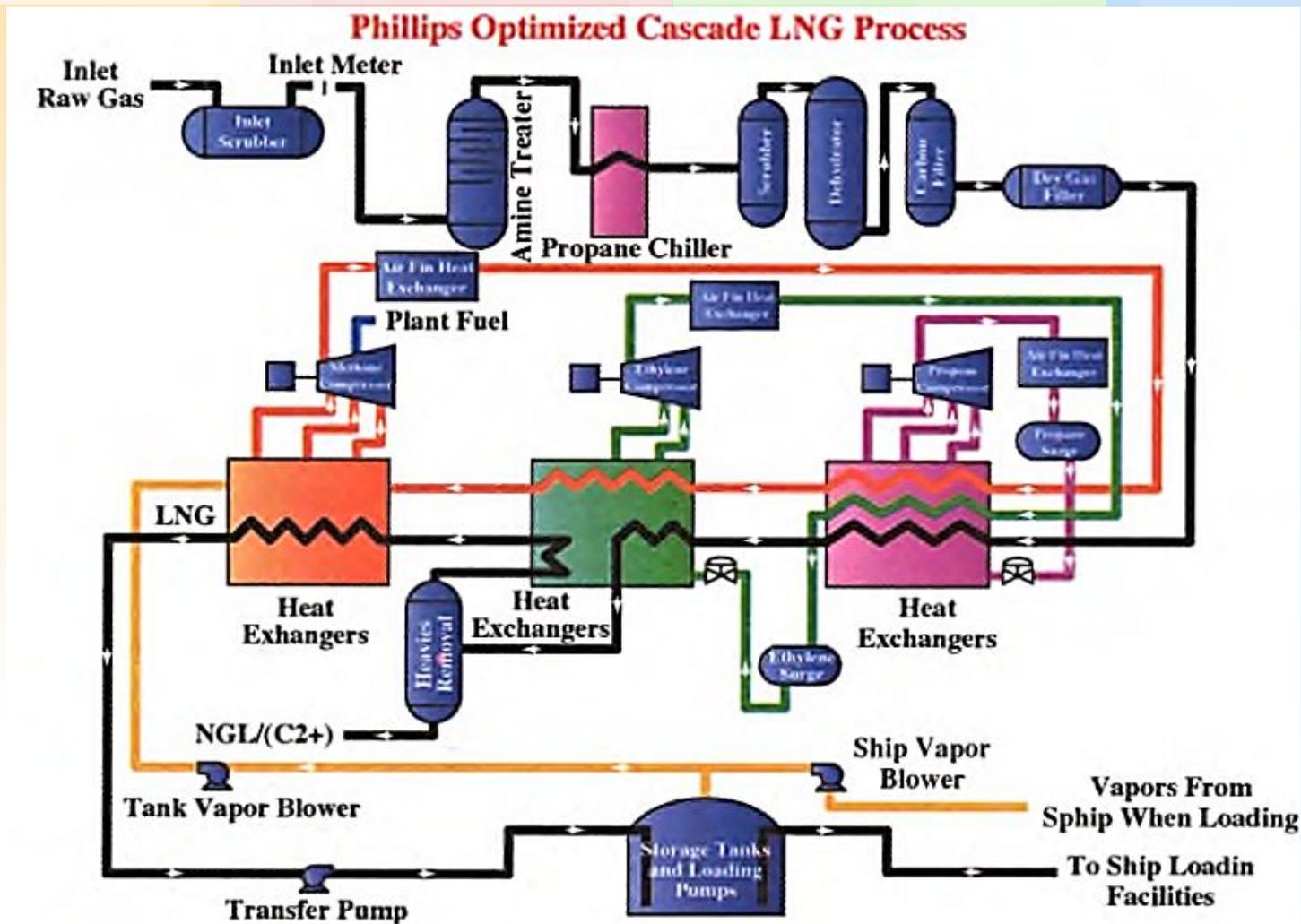


Рис. П-1. Модернизированный каскадный процесс Phillips (ConocoPhillips Optimized Cascade<sup>SM</sup>).

# Приложение

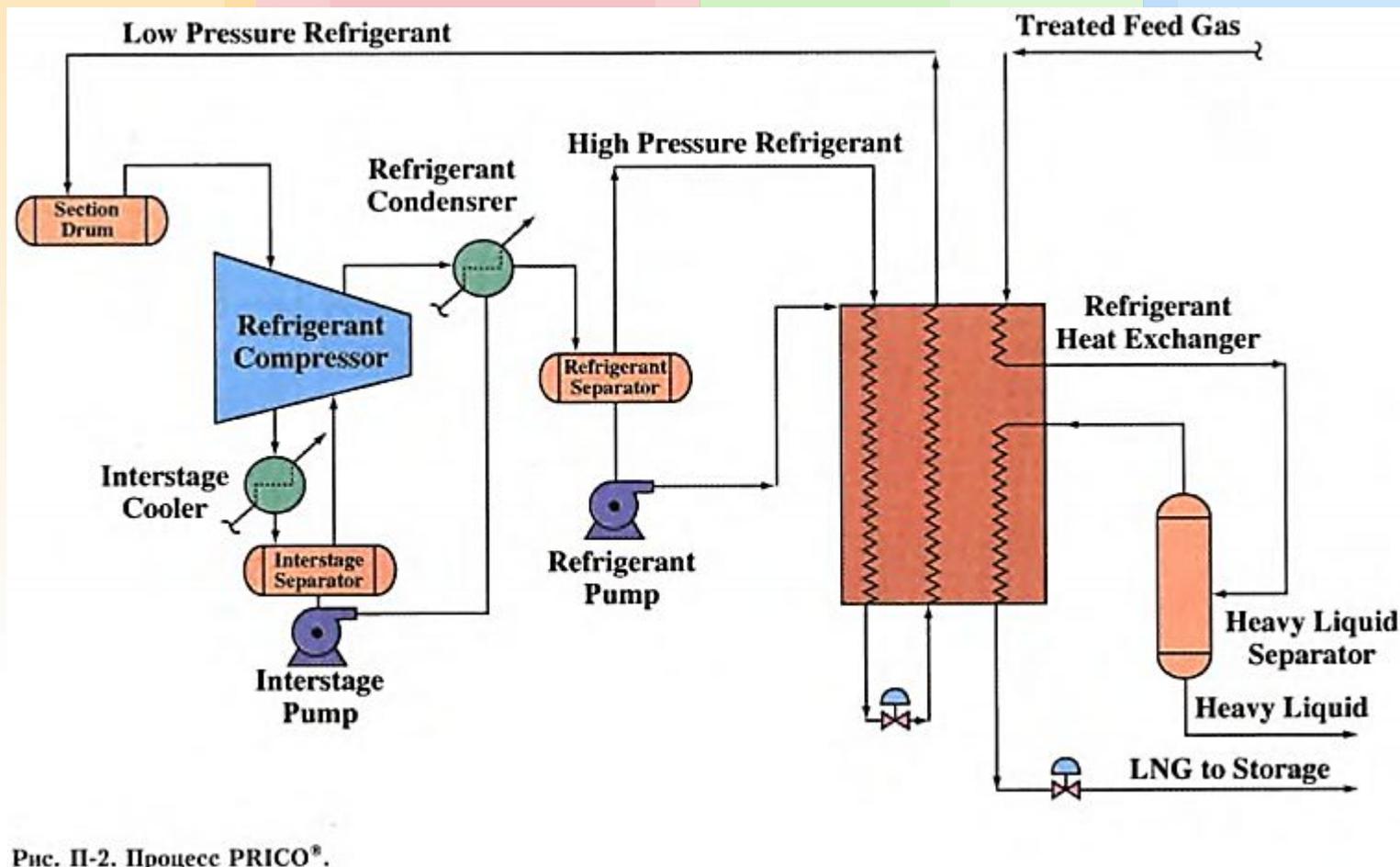


Рис. П-2. Процесс PRICO®.

# Приложение

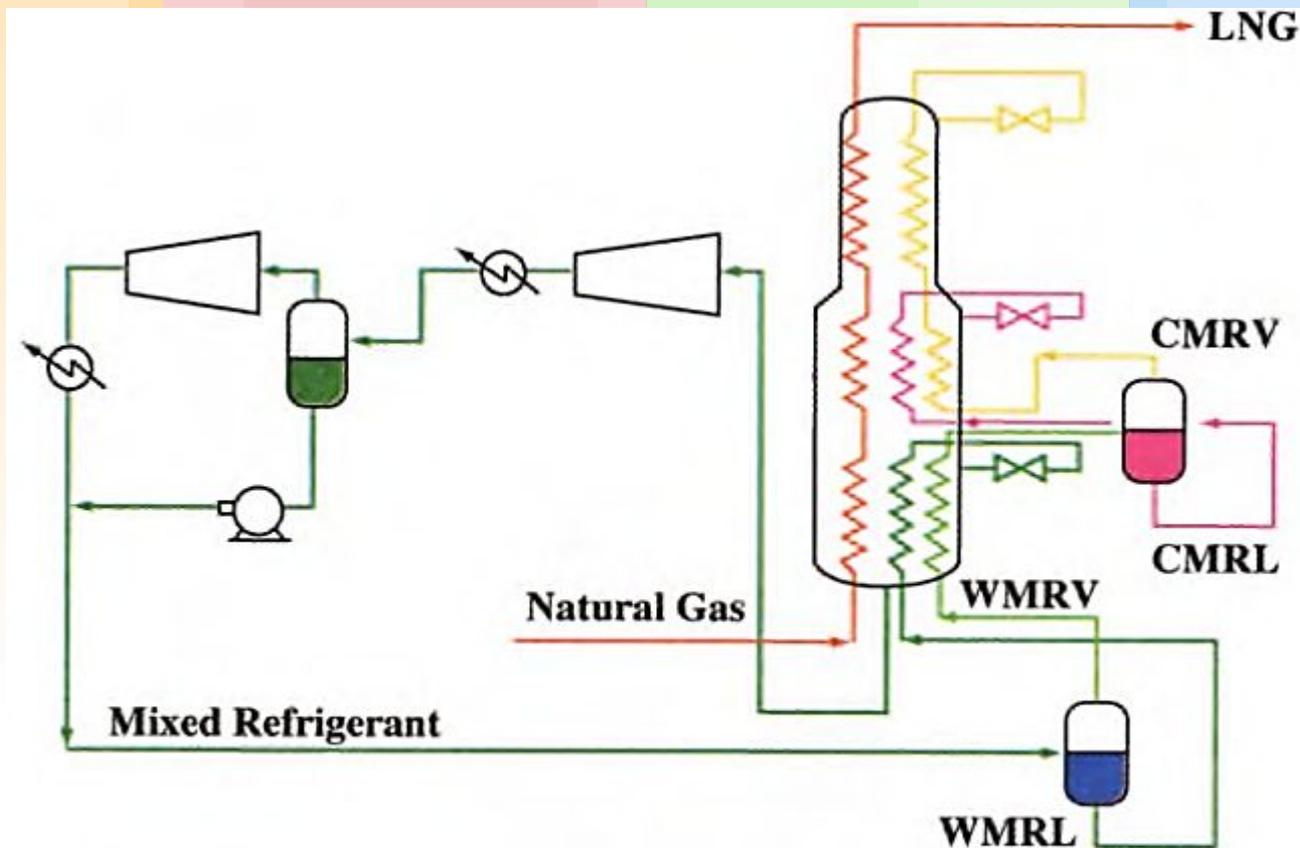


Рис. П-3. Процесс APCI SMR (Single Mixed Refrigerant Process).

# Приложение

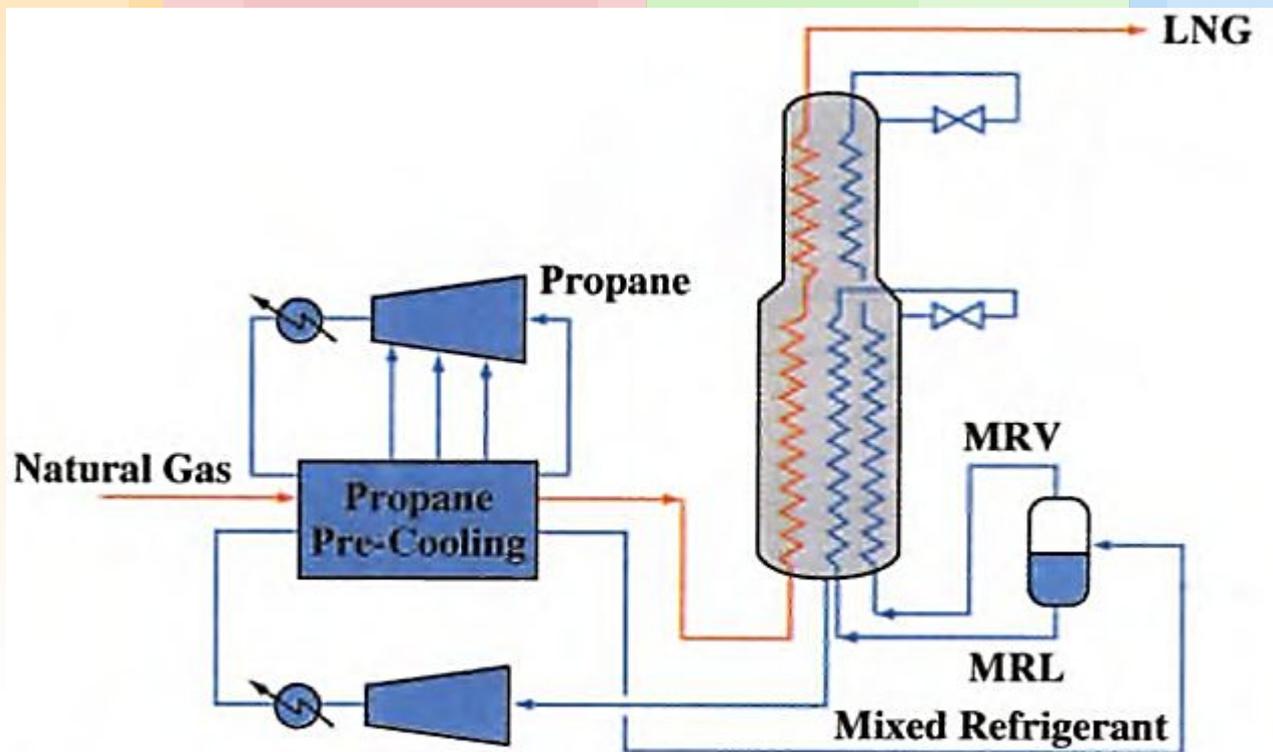


Рис. П-4. Процесс APCI S3MR (Propane Precooling Mixed Refrigerant Process).

# Приложение

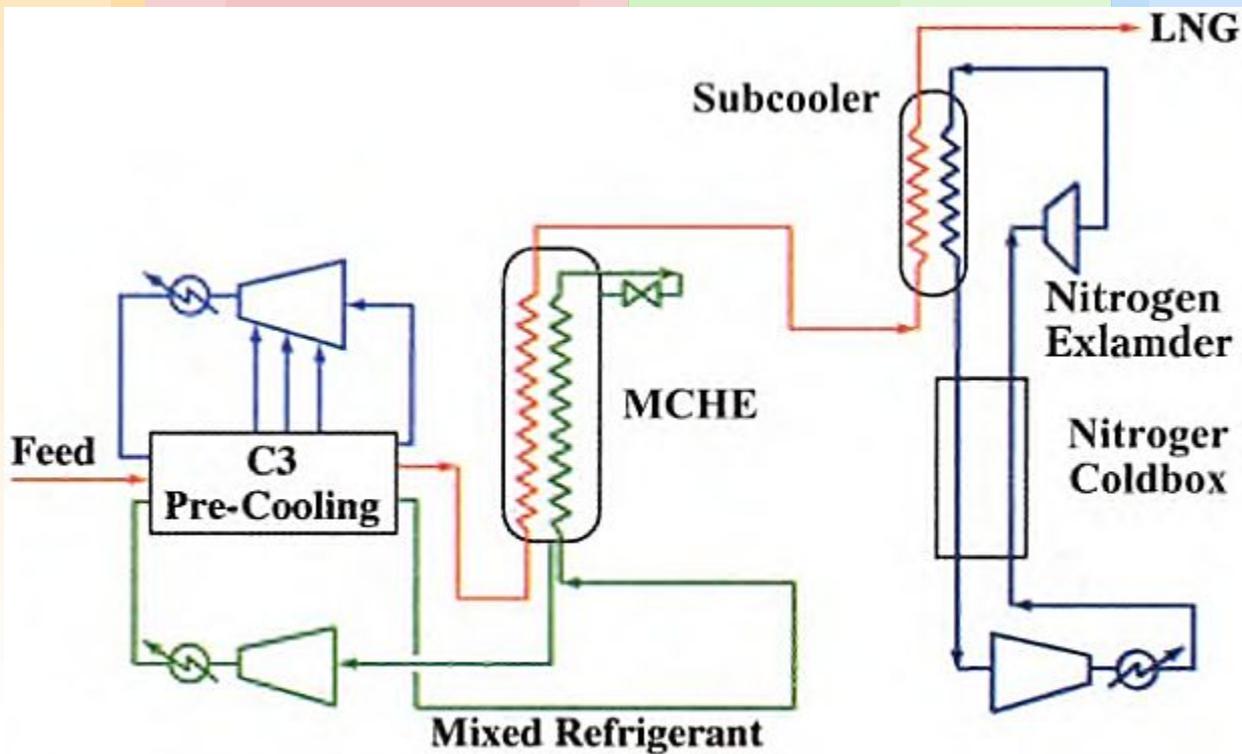


Рис. П-5. Процесс APCI AP-X<sup>TM</sup>.



# Приложение

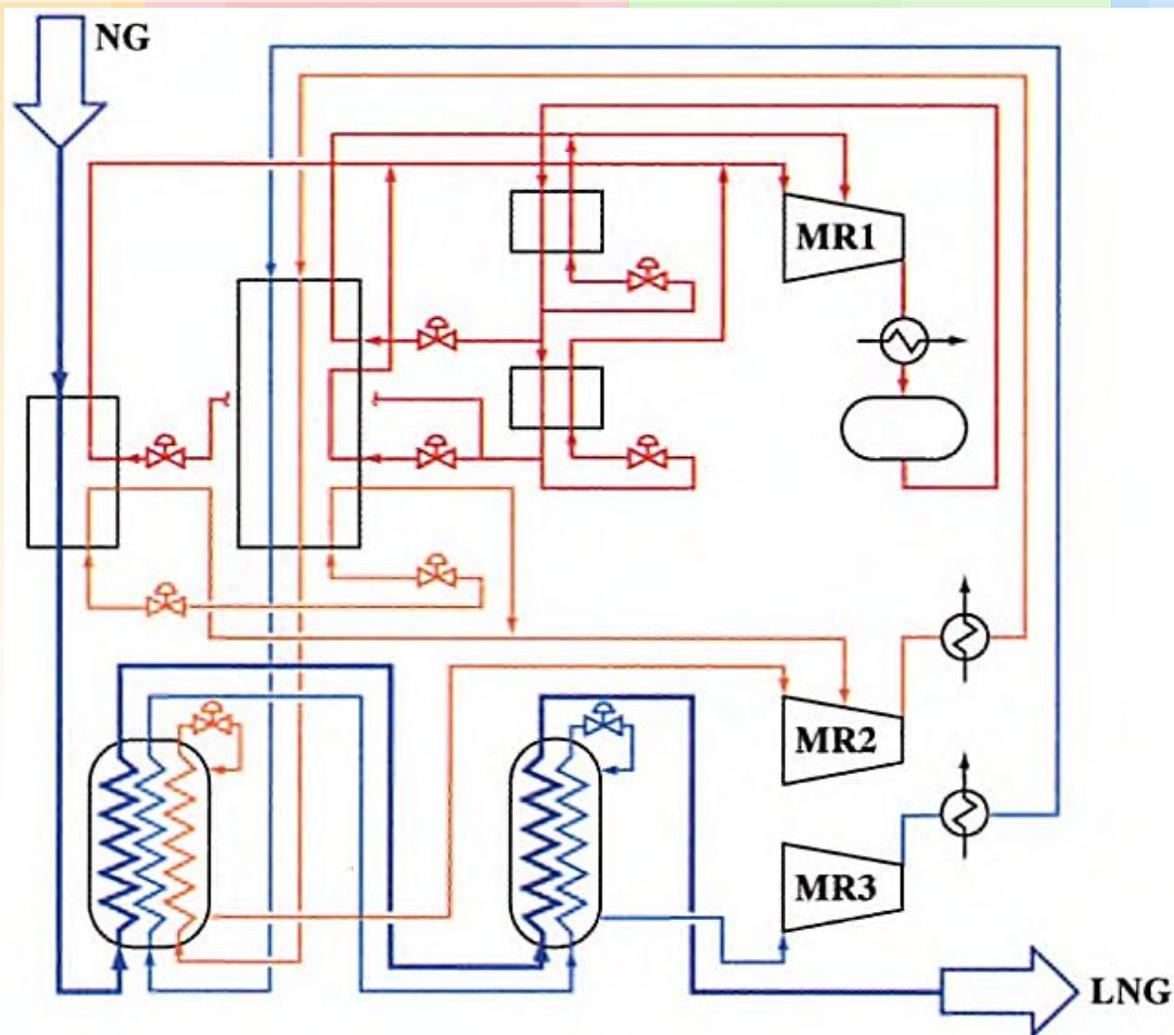


Рис. П-6. Процесс Statoil/Linde MFC®.

# Приложение

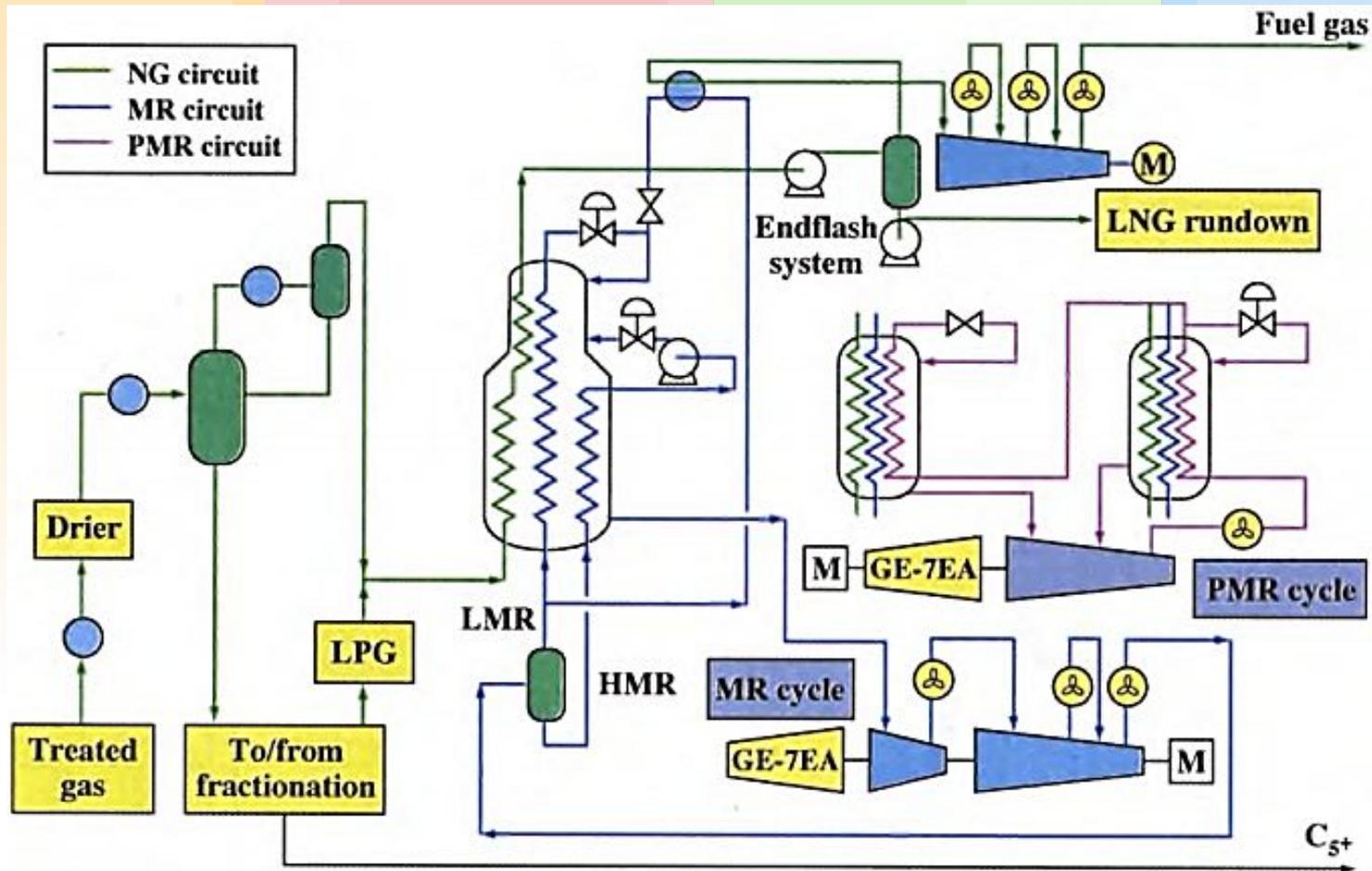


Рис. П-7. Процесс Shell DMR.

# Приложение

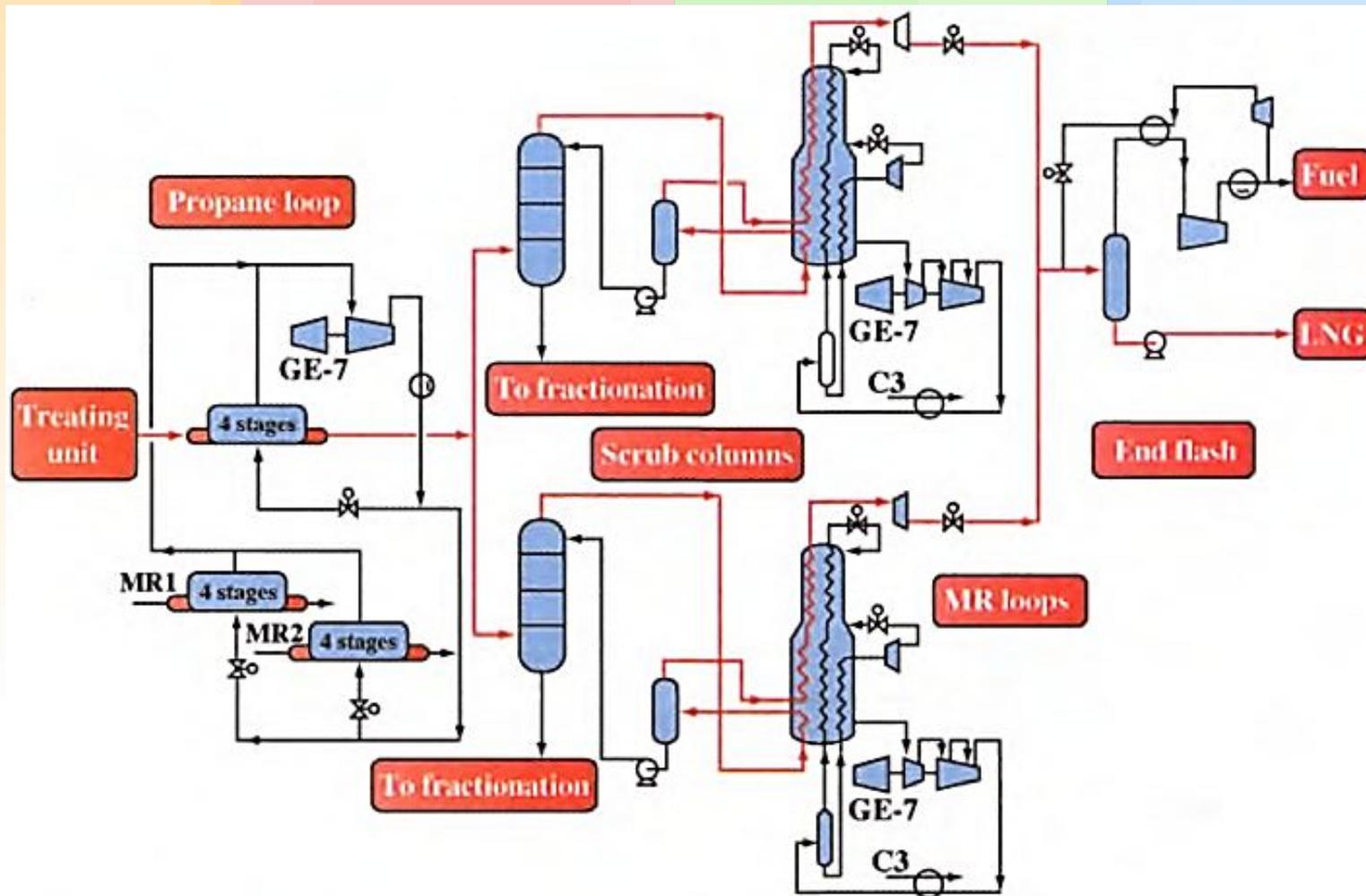


Рис. П-8. Процесс Shell PMR.

# Приложение

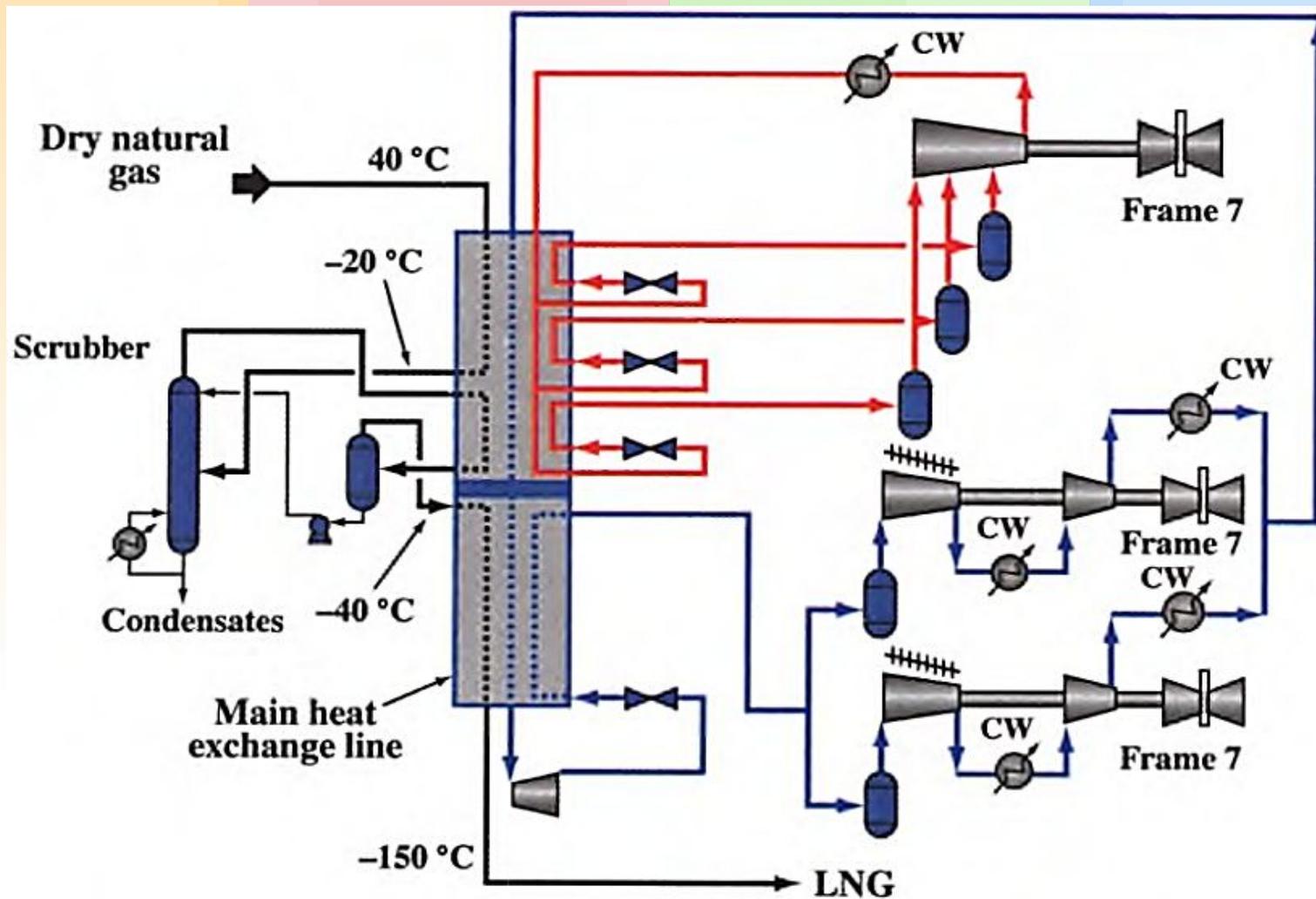
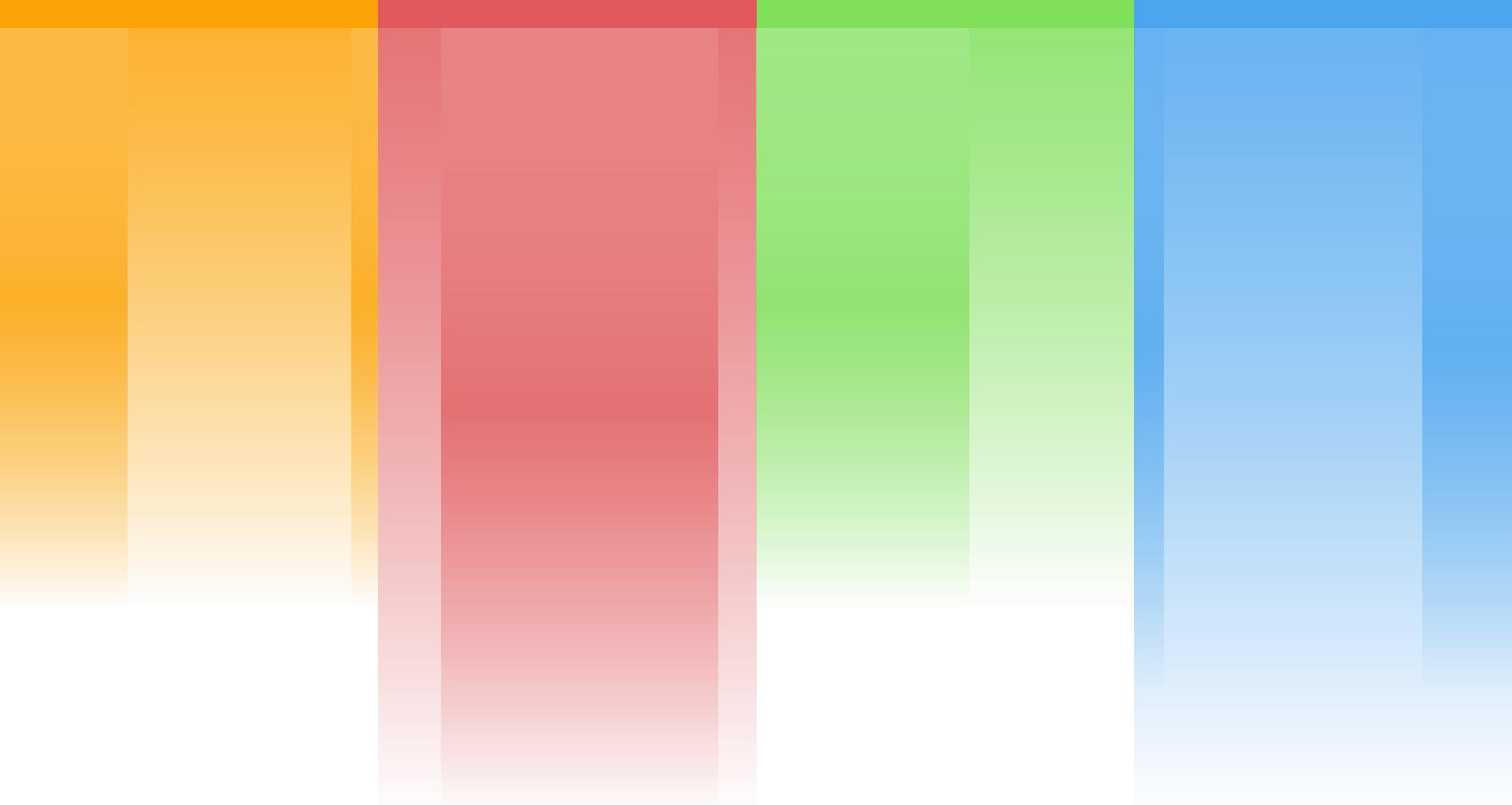


Рис. П-9. Процесс Liquefin.



**Спасибо!**