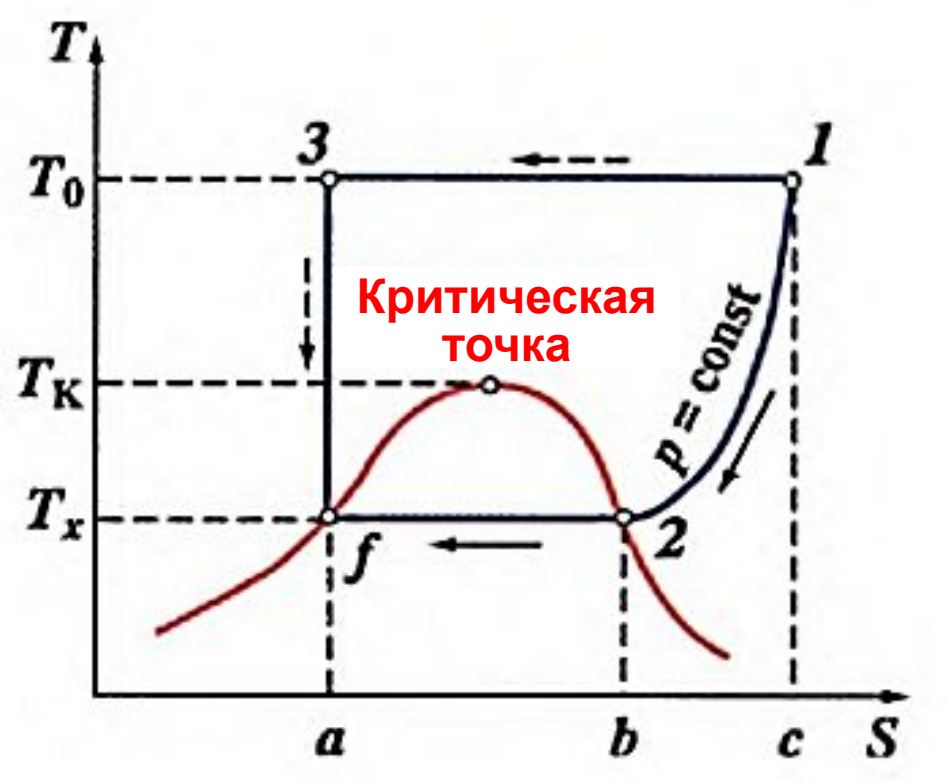
ТЕХНОЛОГИИ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

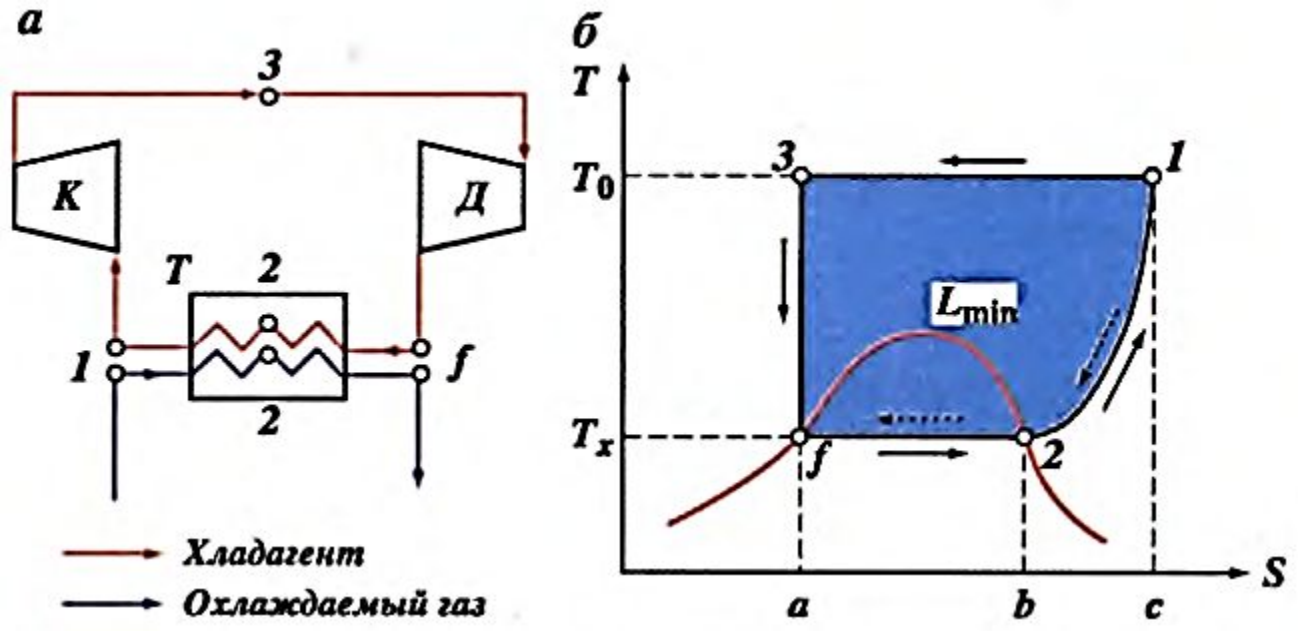
Термодинамические и технологические основы сжижения газов

ПРОЦЕСС СЖИЖЕНИЯ ГАЗА



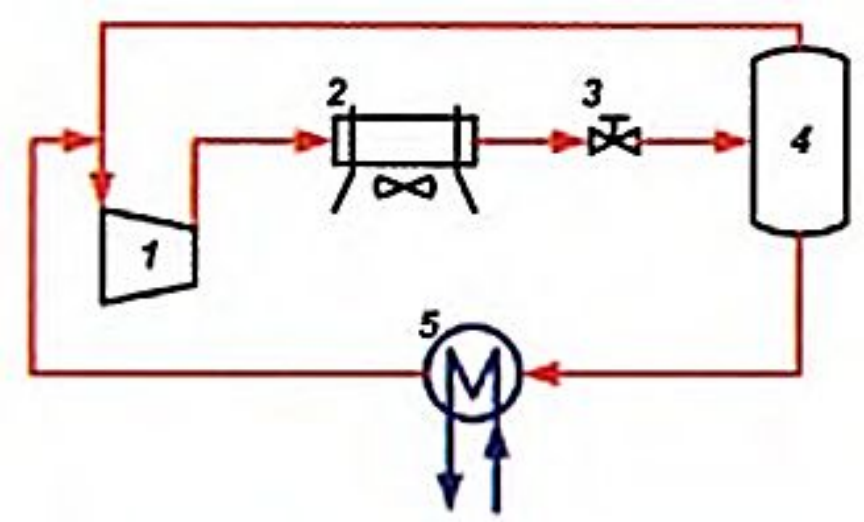
Термодинамические и технологические основы сжижения газов

ИДЕАЛЬНЫЙ ЦИКЛ СЖИЖЕНИЯ ГАЗА



Холодильные циклы

СХЕМА ПРОСТОГО ДРОССЕЛЬНОГО ЦИКЛА



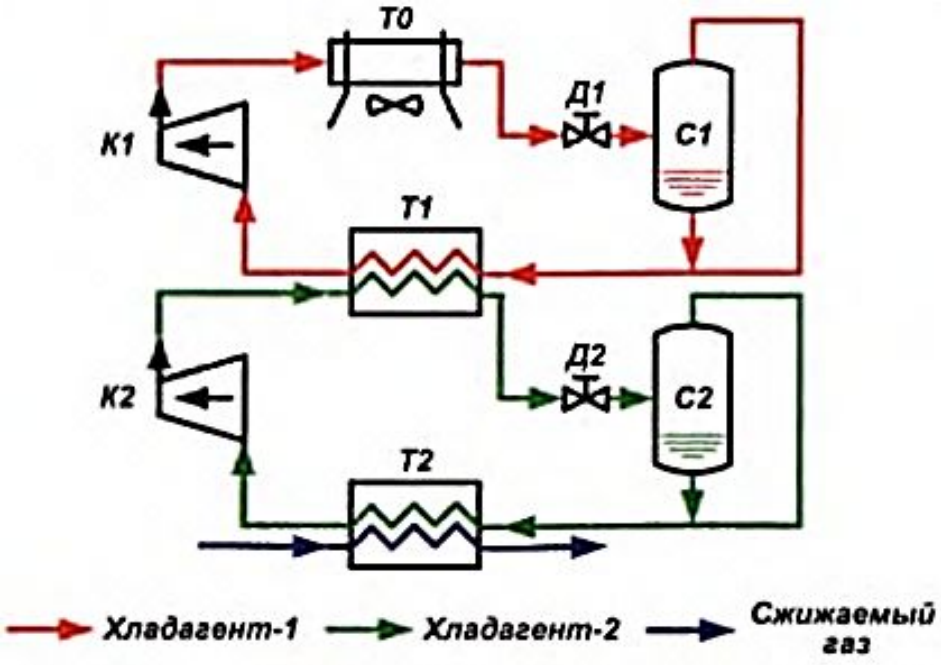
Холодильные циклы

ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ

Компонент	Температура кипения, °С	Критическая температура Тк, °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

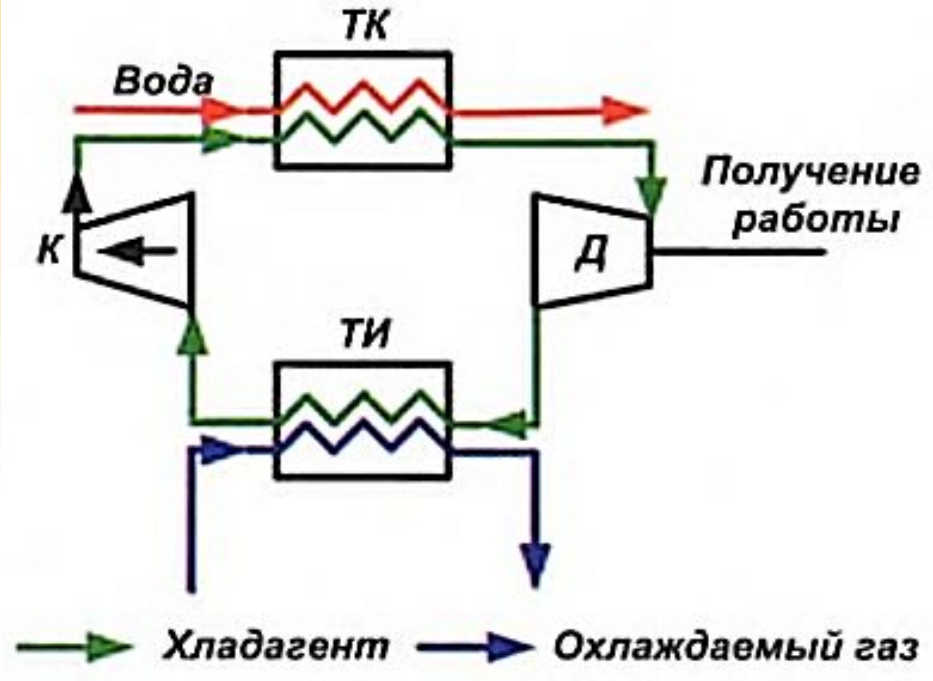
Холодильные циклы

Каскадный принцип построения холодильных циклов



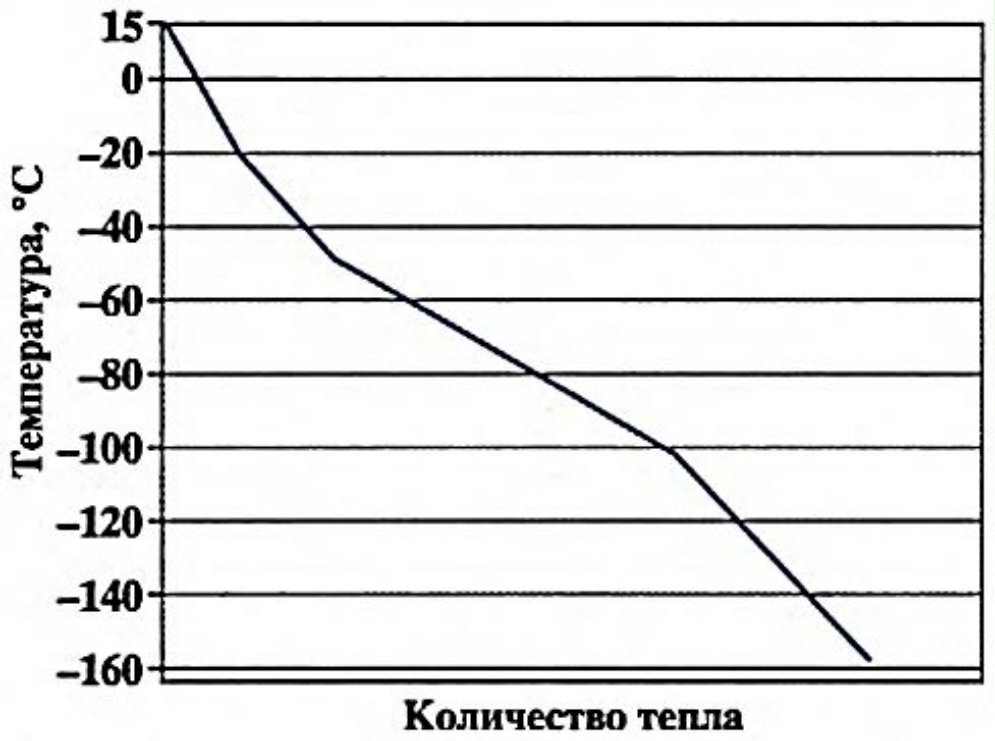
Холодильные циклы

СХЕМА ДЕТАНДЕРНОГО ЦИКЛА



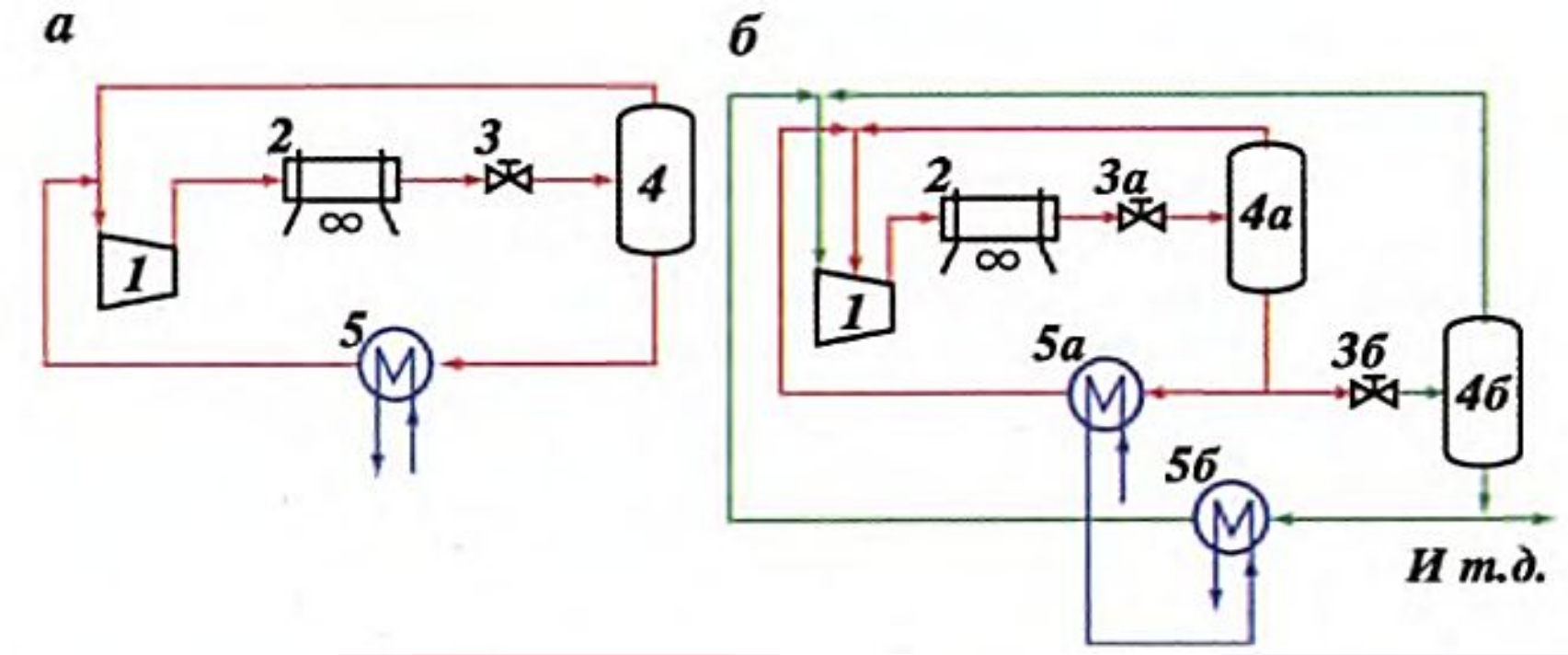
Технологии производства СПГ

КРИВАЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА



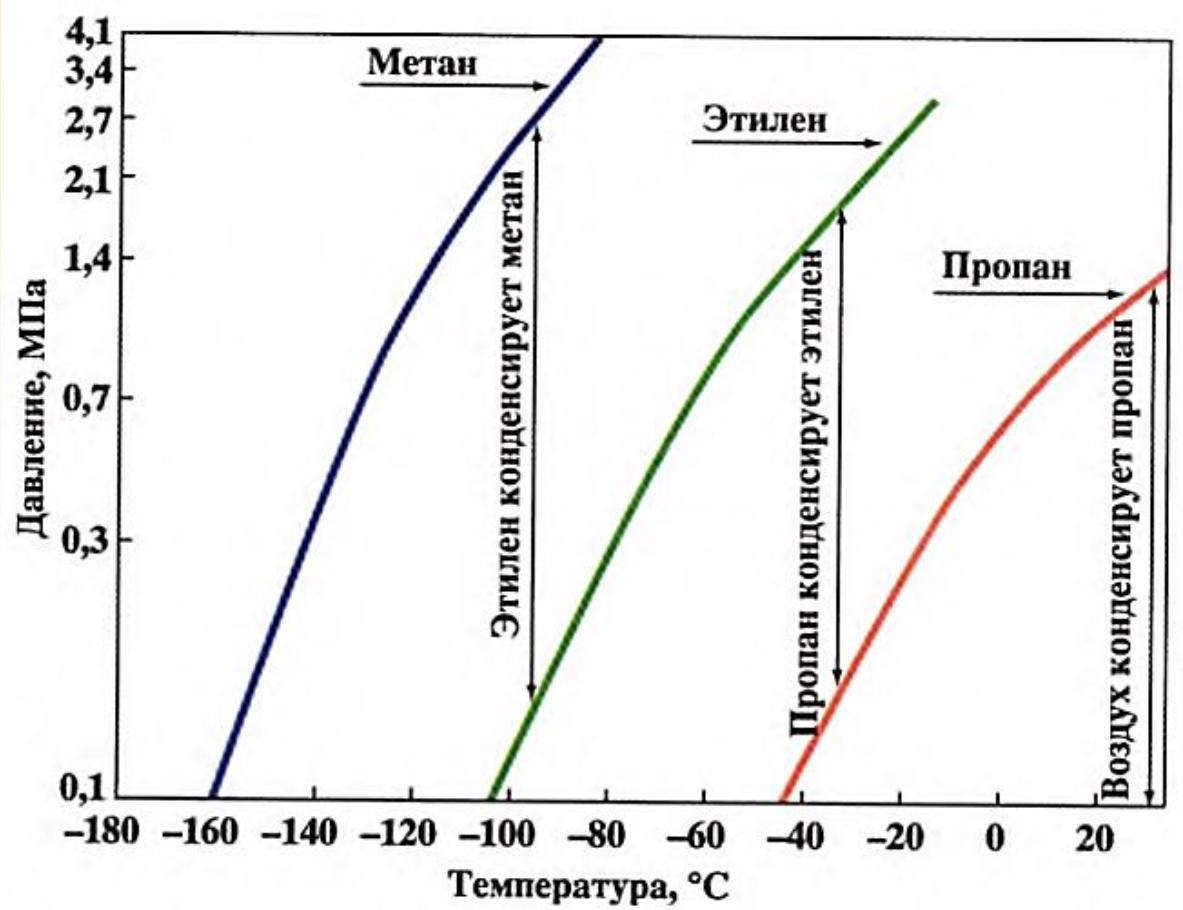
Технологии производства СПГ

ЦИКЛЫ ОХЛАЖДЕНИЯ



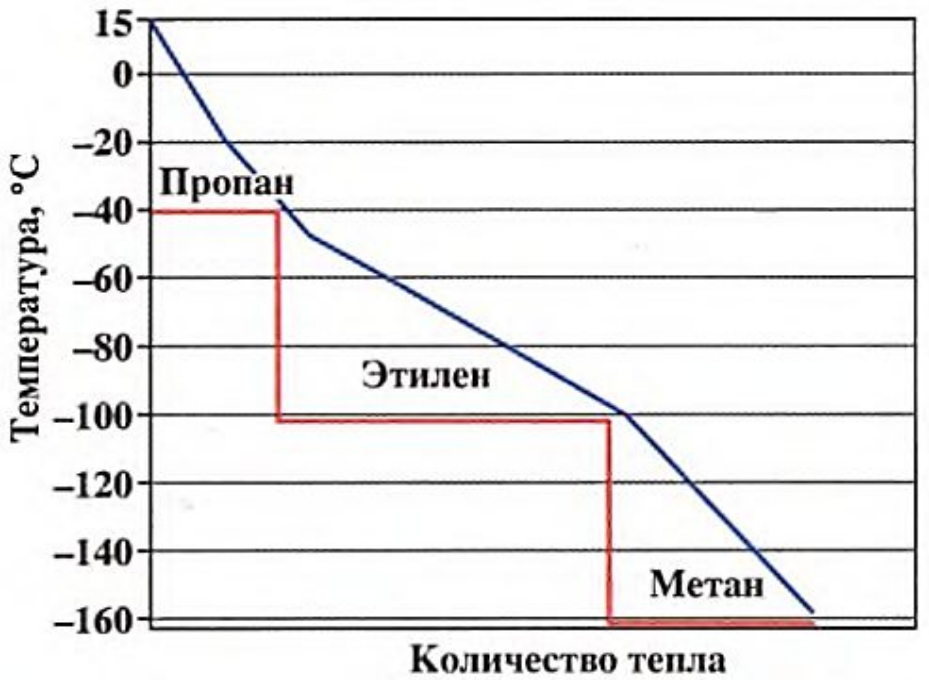
Технологии производства СПГ

ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЙ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ МЕТАНА, ЭТИЛЕНА И ПРОПАНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ



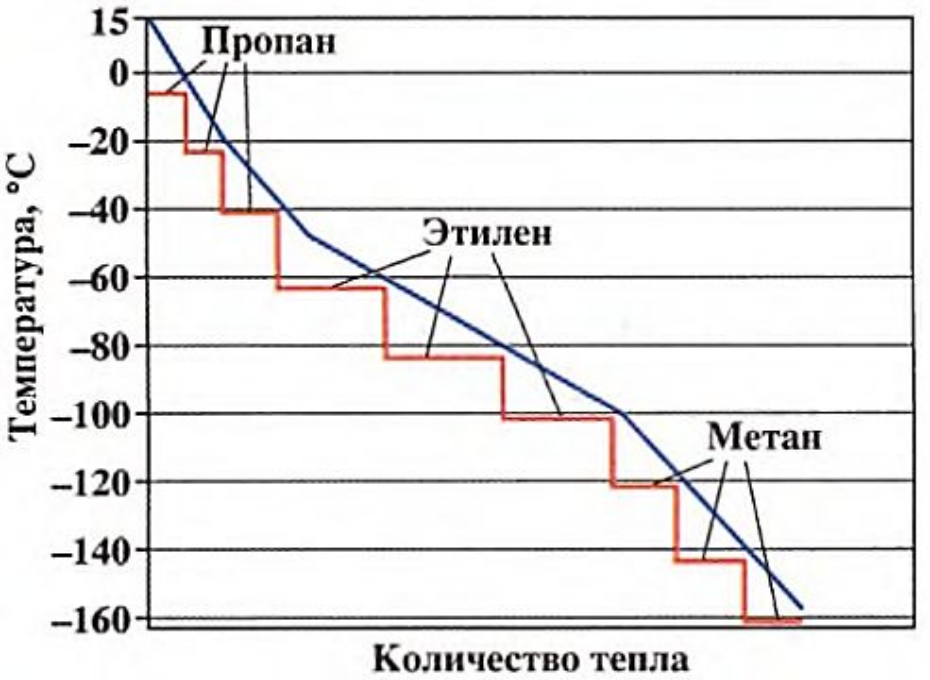
Технологии производства СПГ

а



Кривые охлаждения природного газа чистых хладагентов при использовании одноступенчатых циклов охлаждения

б

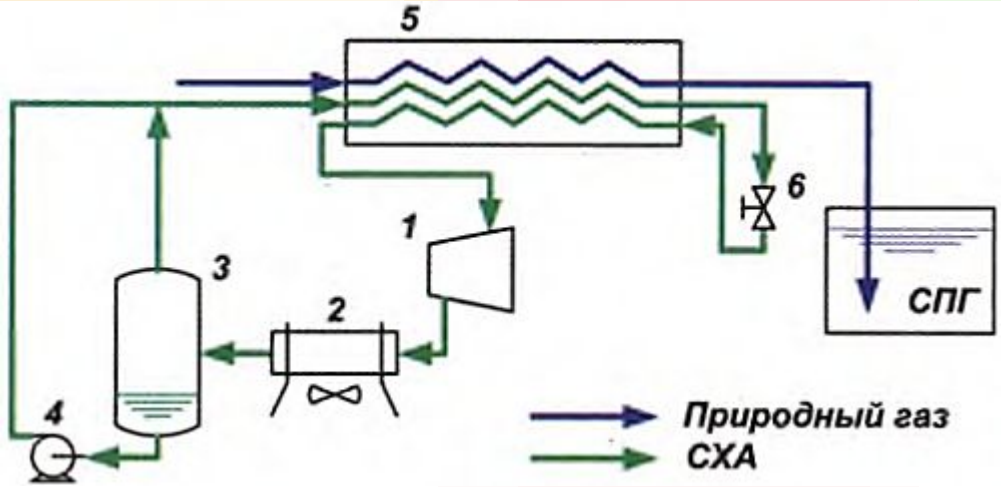


Кривые охлаждения природного газа чистых хладагентов при использовании трехступенчатых циклов охлаждения

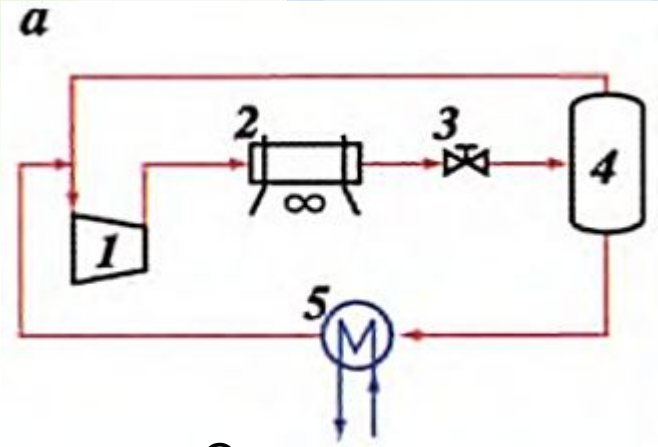
Технологии производства СПГ

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		



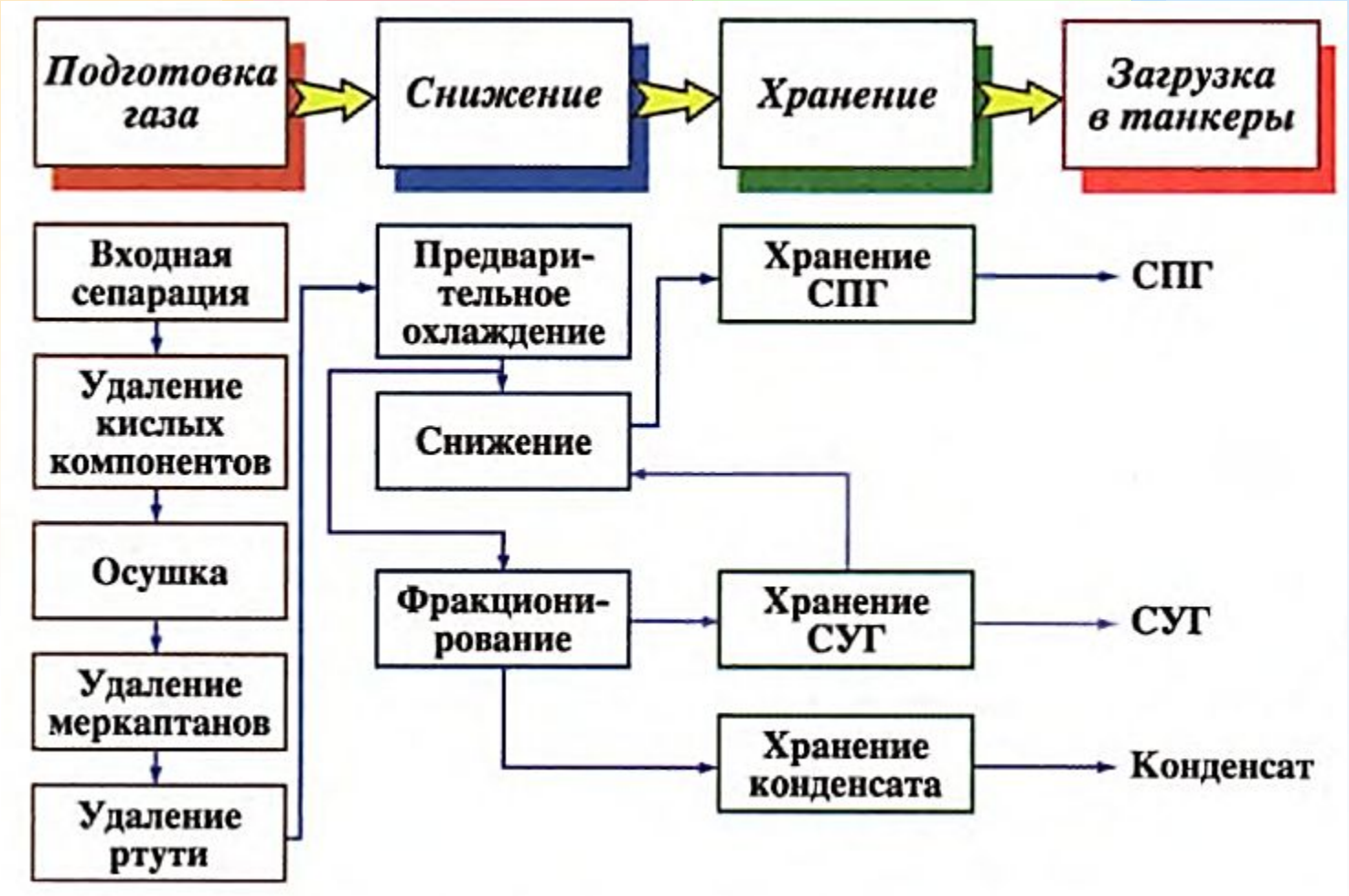
Цикл охлаждения со смешанным хладагентом



Охлаждение с пропановым циклом

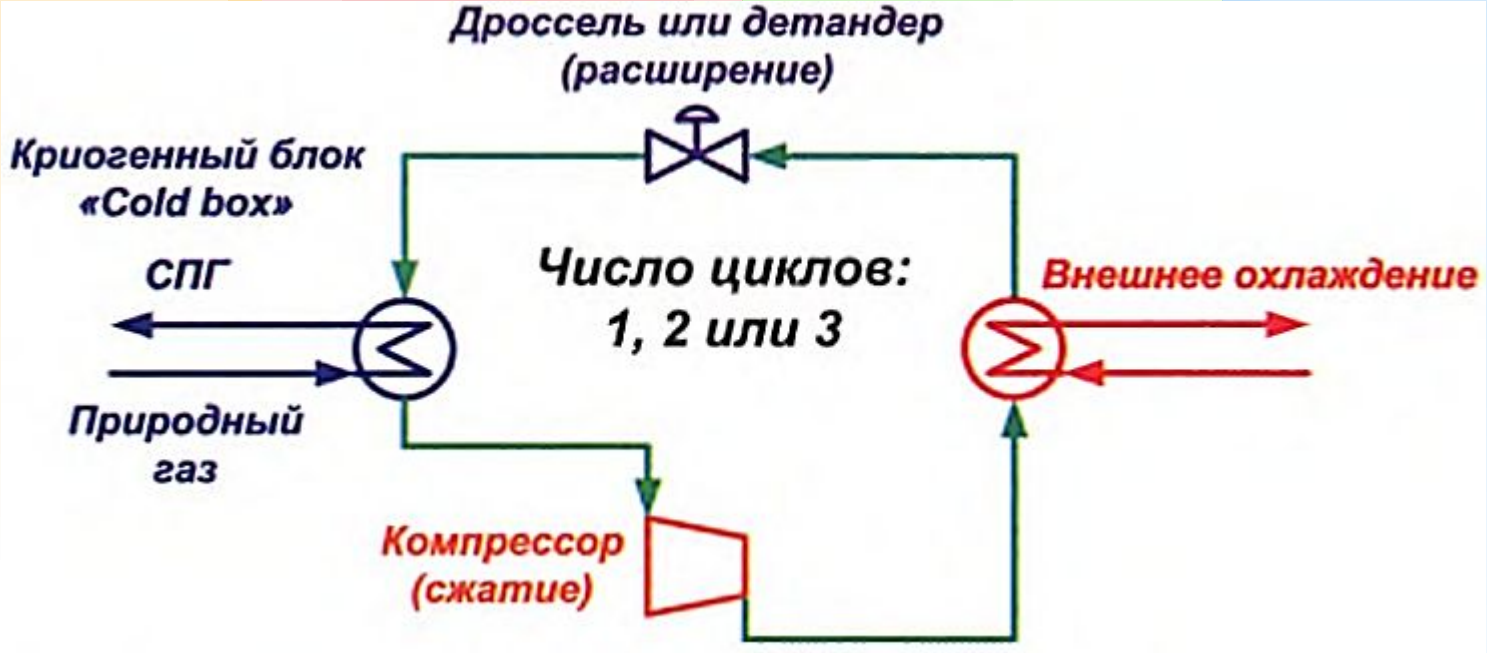
Технологии производства СПГ

СХЕМА ЗАВОДА СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА



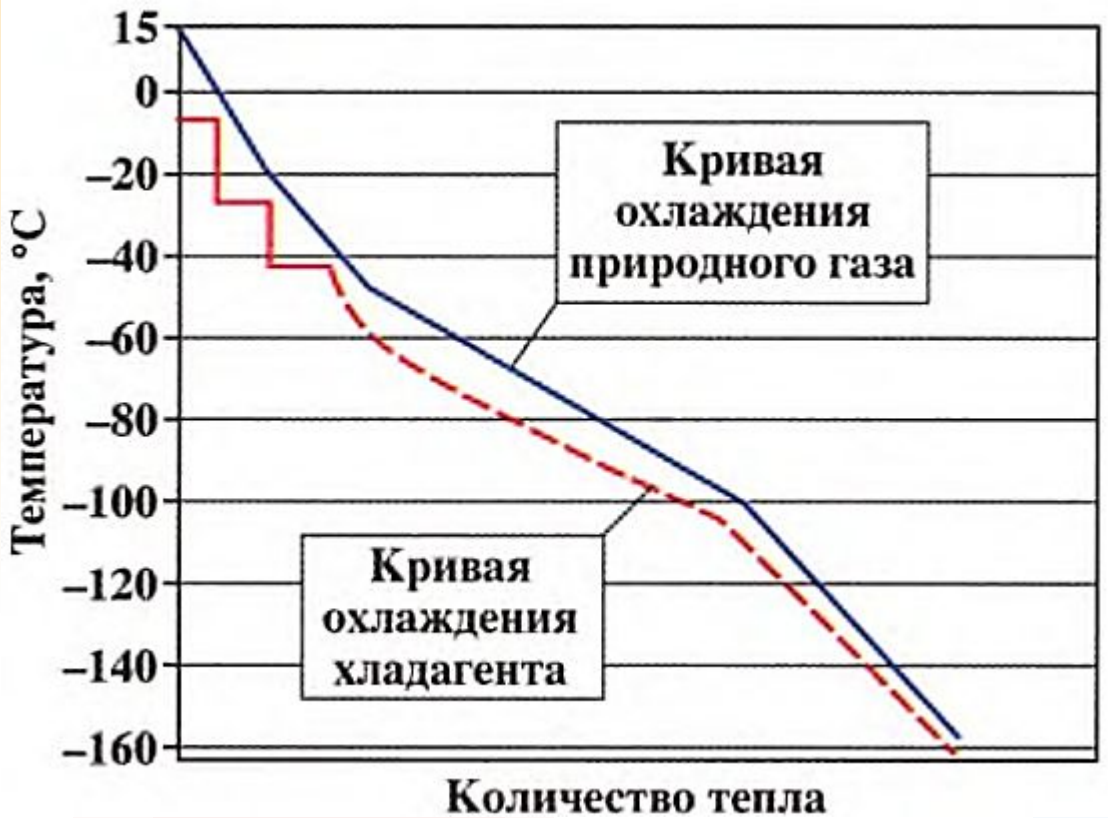
Сжижение природного газа

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЖИЖЕНИЯ ГАЗА



Сжижение природного газа

КРИВЫЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА И ХЛАДАГЕНТА



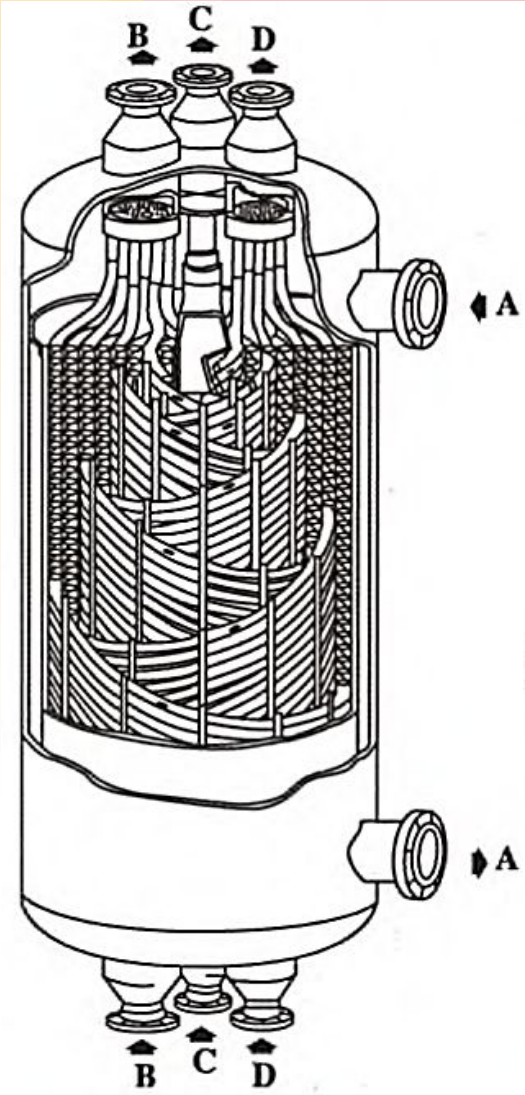
Сжижение природного газа

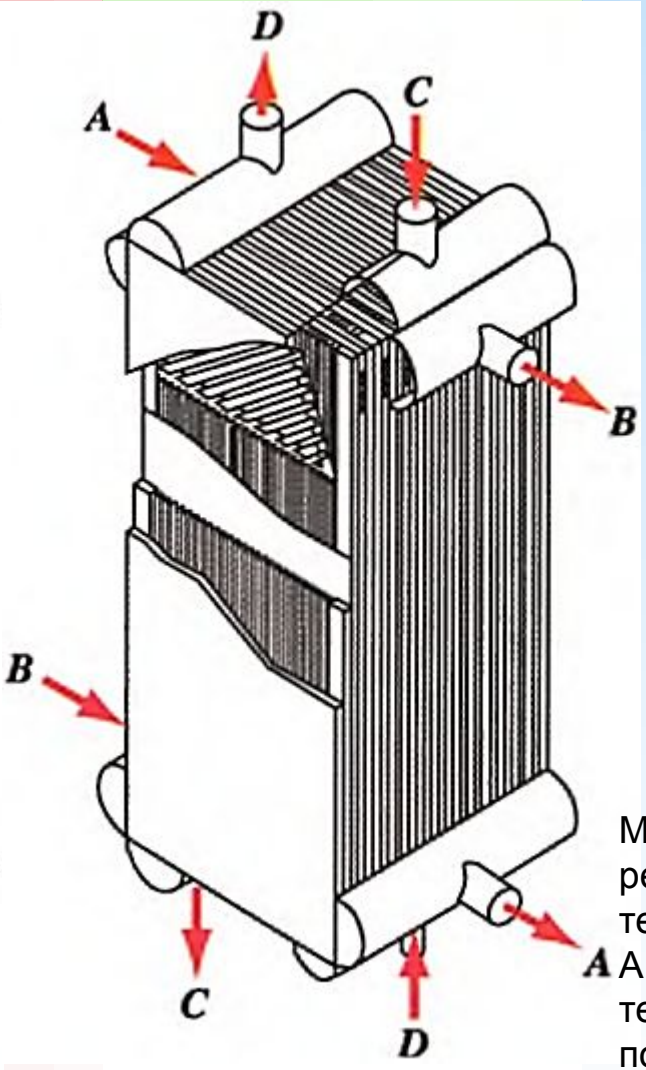
КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО ЧИСЛУ ЦИКЛОВ СЖИЖЕНИЯ ГАЗА

	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
		Kryopak	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 – спиральновитые теплообменные аппараты; РПТО – ребристо-пластинчатые теплообменные аппараты; КТИ – кожухотрубчатые испарители с паровым пространством; СХА – смешанный хладагент.

Теплообменники





Спиральновитой теплообменник: A, B, C, D – теплообменивающиеся потоки

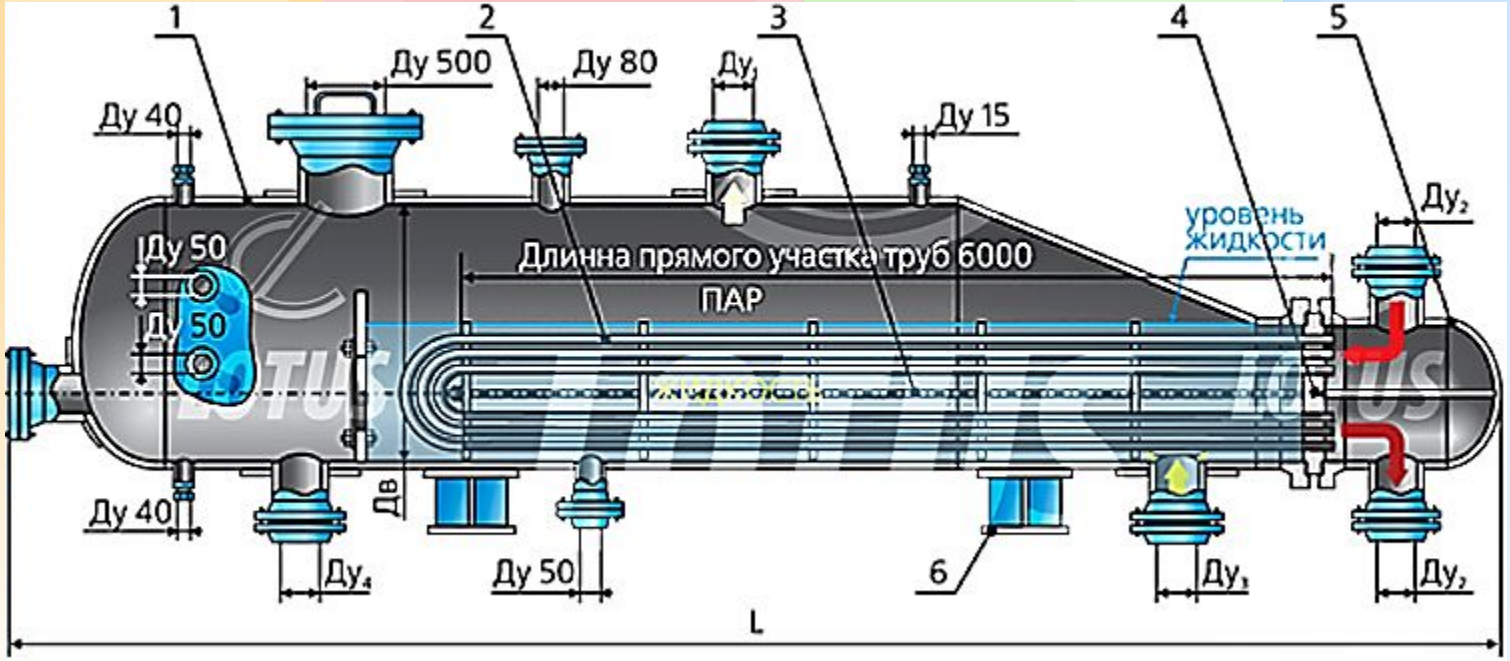
Многопоточный ребристопластинчатый теплообменник: A, B, C, D – теплообменивающиеся потоки

Теплообменники

Спиральновитой теплообменник

Многопоточный ребристо-пластинчатый теплообменник

Теплообменники



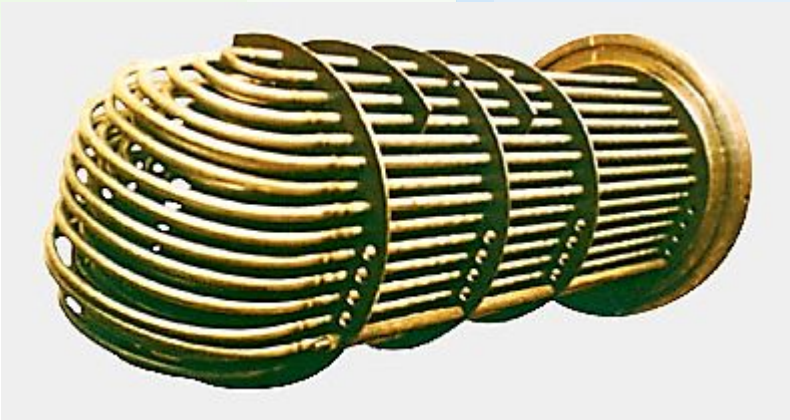
Кожухотрубчатый испаритель с паровым пространством

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; $Ду_4$ — выход остатка продукта; Ду 50 — дренаж; $Ду_3$ — вход жидкого продукта; $Ду_2$ — выход пара или жидкости; $Ду_2$ — вход пара или жидкости; Ду 15 мм — для манометра; $Ду_1$ — 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



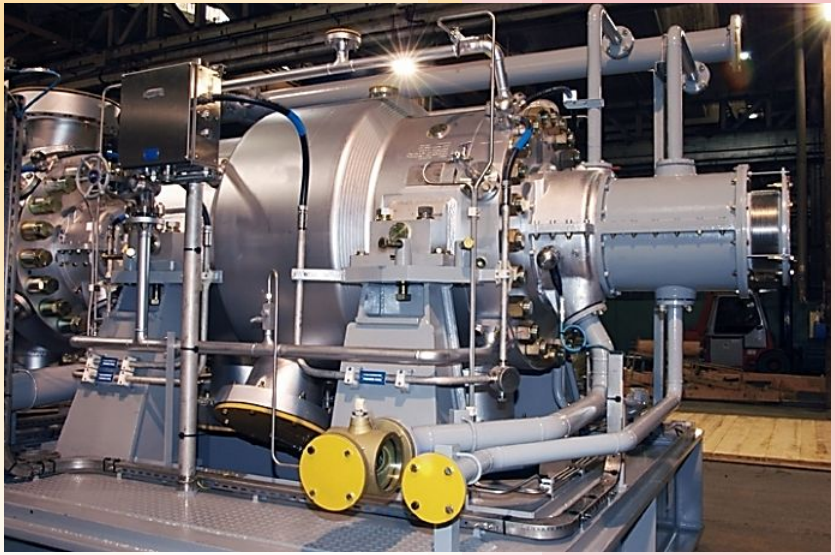
Трубный пучок

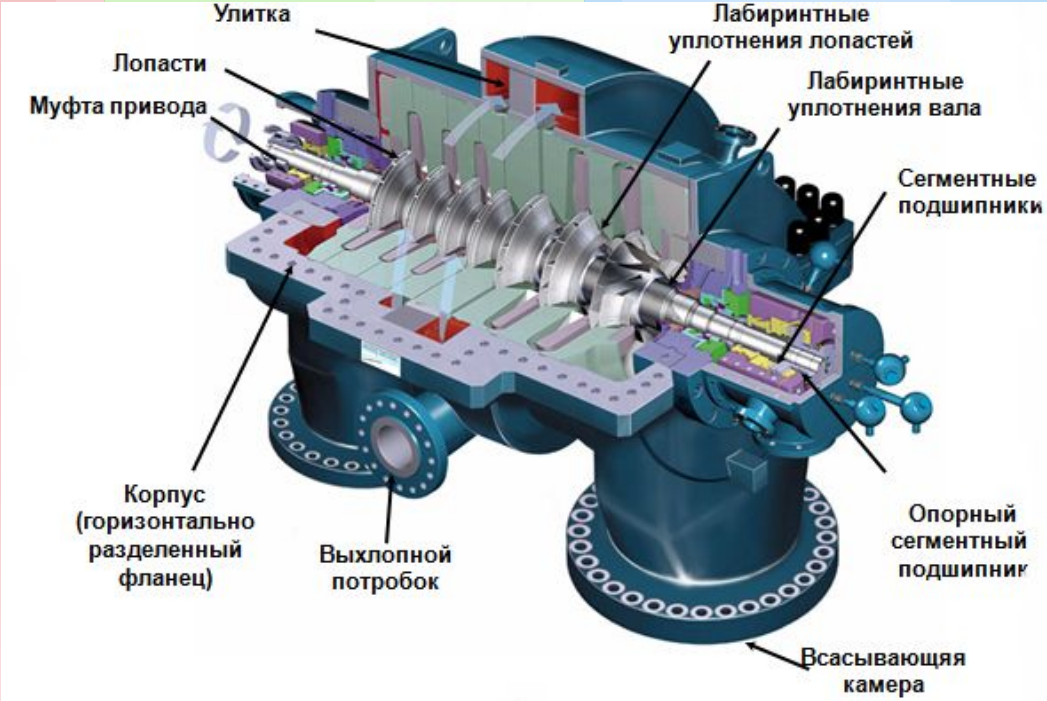
Компрессоры

КОМПРЕССОРЫ

- **АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ (ТУРБОКОМПРЕССОРЫ)**
  - Центробежные (радиальные)
  - Осевые
- **ОБЪЕМНЫЕ**
  - Поршневые
  - Роторные

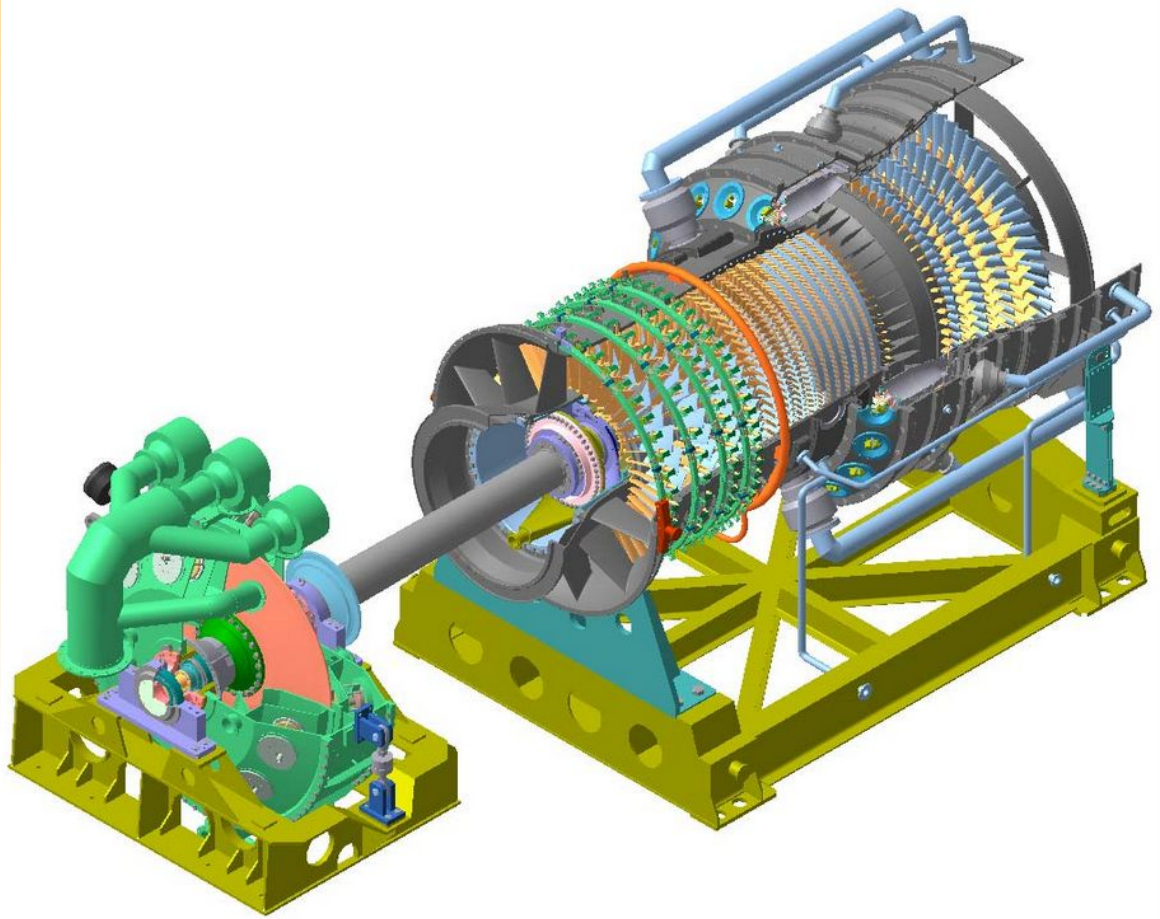
Компрессоры



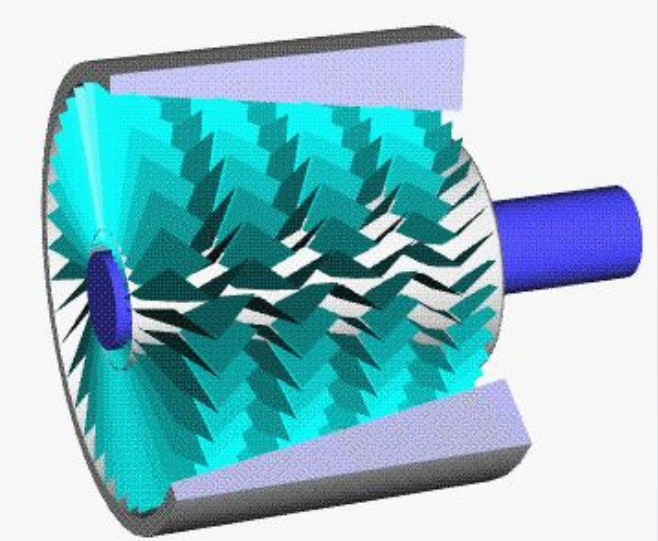


Центробежный компрессор

Компрессоры



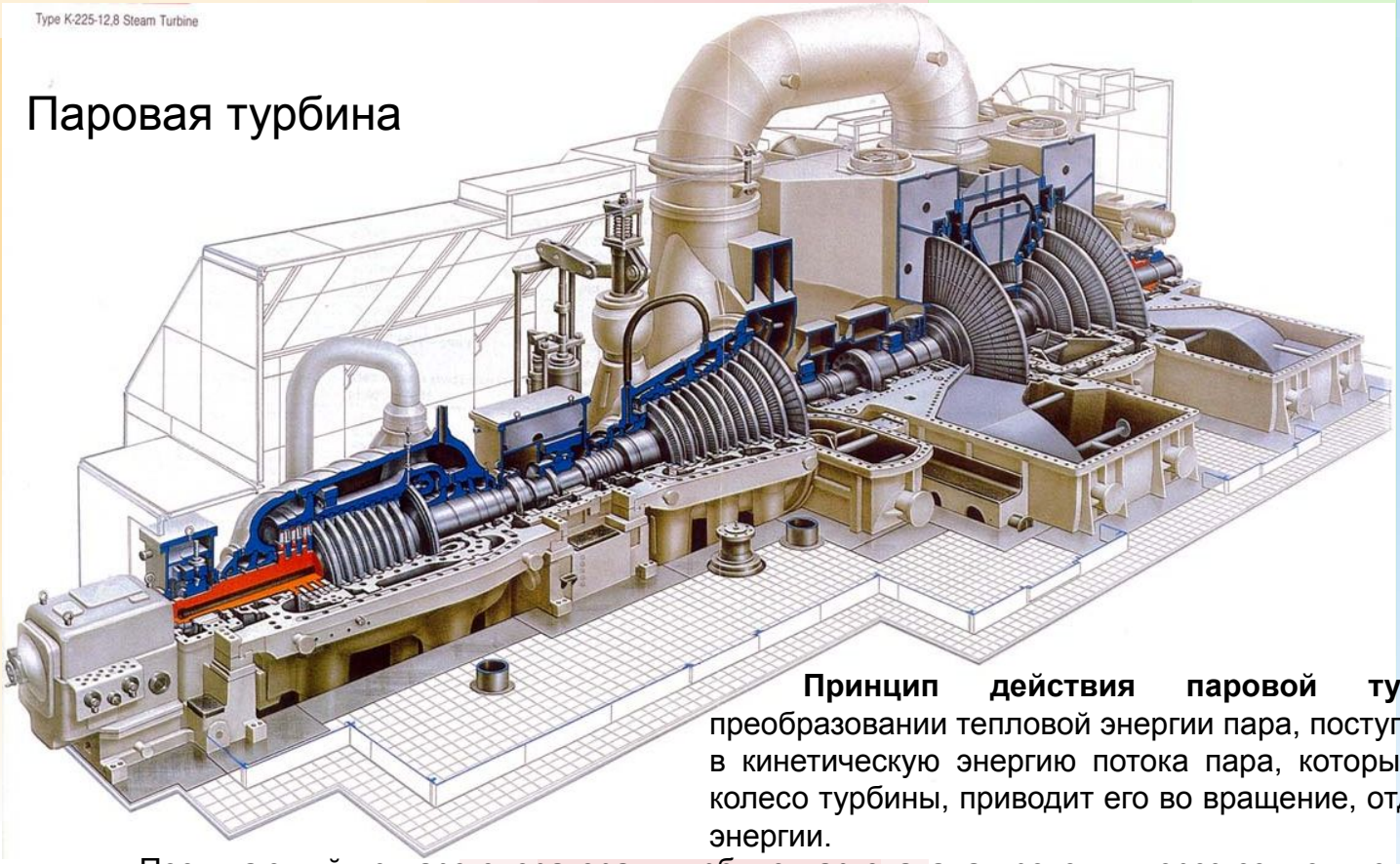
Осевой компрессор



Принцип работы осевого компрессора

Приводы компрессоров

Паровая турбина



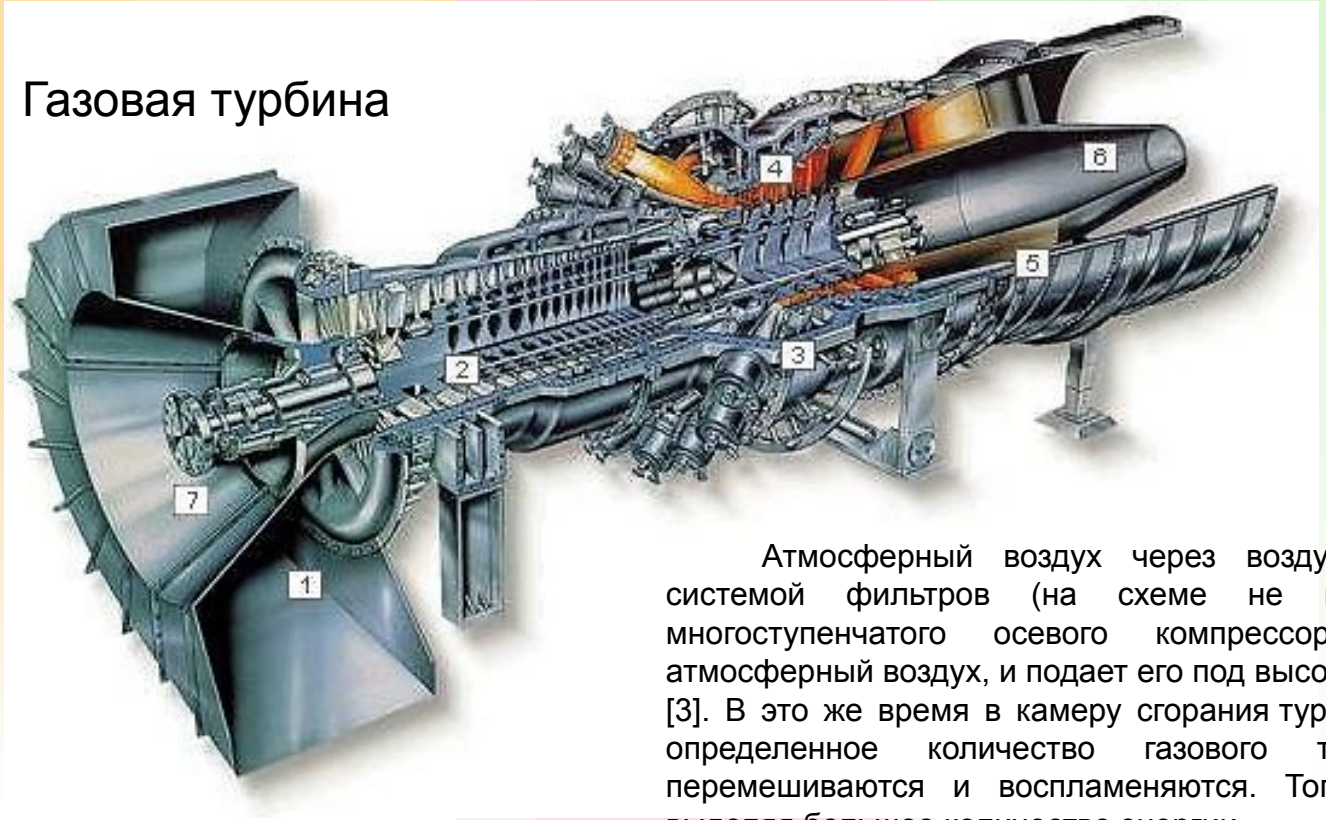
Принцип действия паровой турбины заключается в преобразовании тепловой энергии пара, поступающего из парогенератора, в кинетическую энергию потока пара, который, воздействуя на рабочее колесо турбины, приводит его во вращение, отдавая при этом часть своей энергии.

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, воздуходувкой и т.п.).

Приводы компрессоров

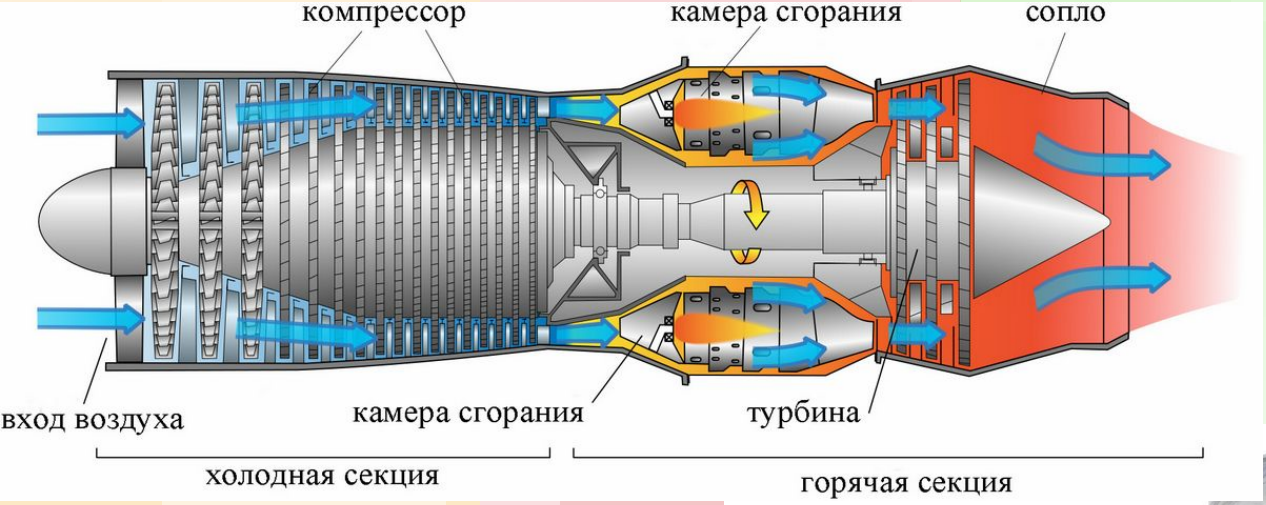
Газовая турбина



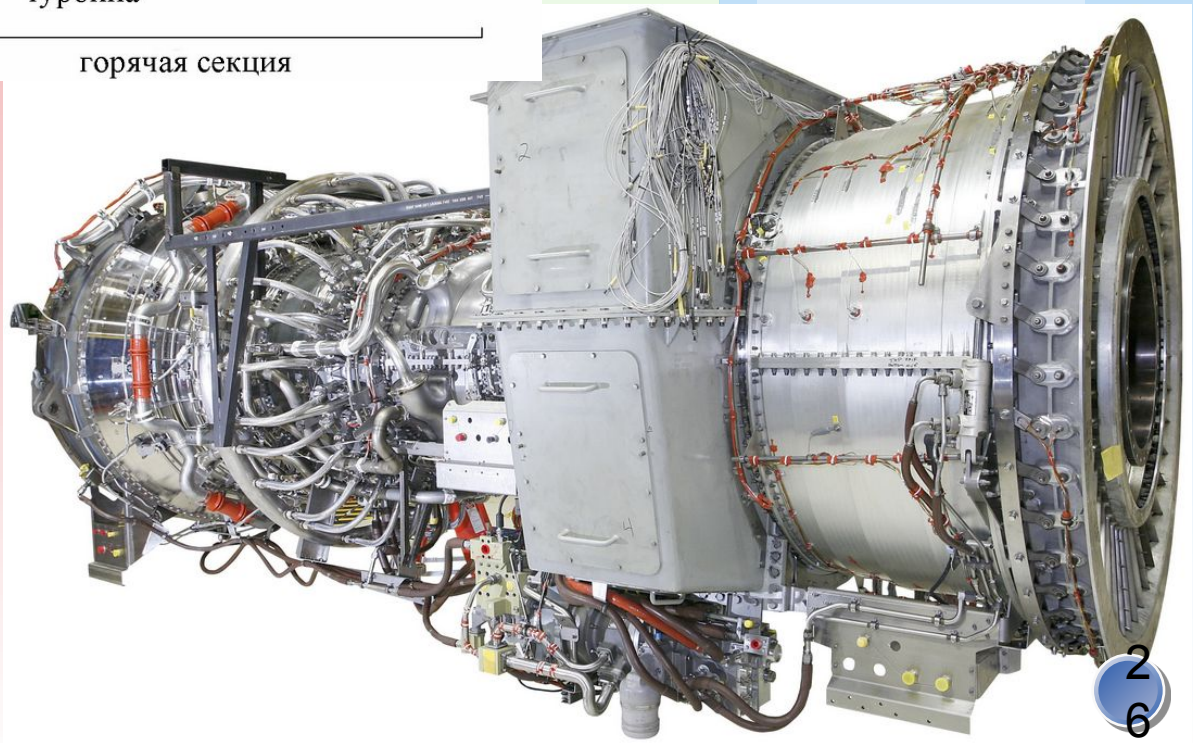
Атмосферный воздух через воздухозаборник [1], оборудованный системой фильтров (на схеме не показаны) подается на вход многоступенчатого осевого компрессора [2]. Компрессор сжимает атмосферный воздух, и подает его под высоким давлением в камеру сгорания [3]. В это же время в камеру сгорания турбины через 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 передаётся 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



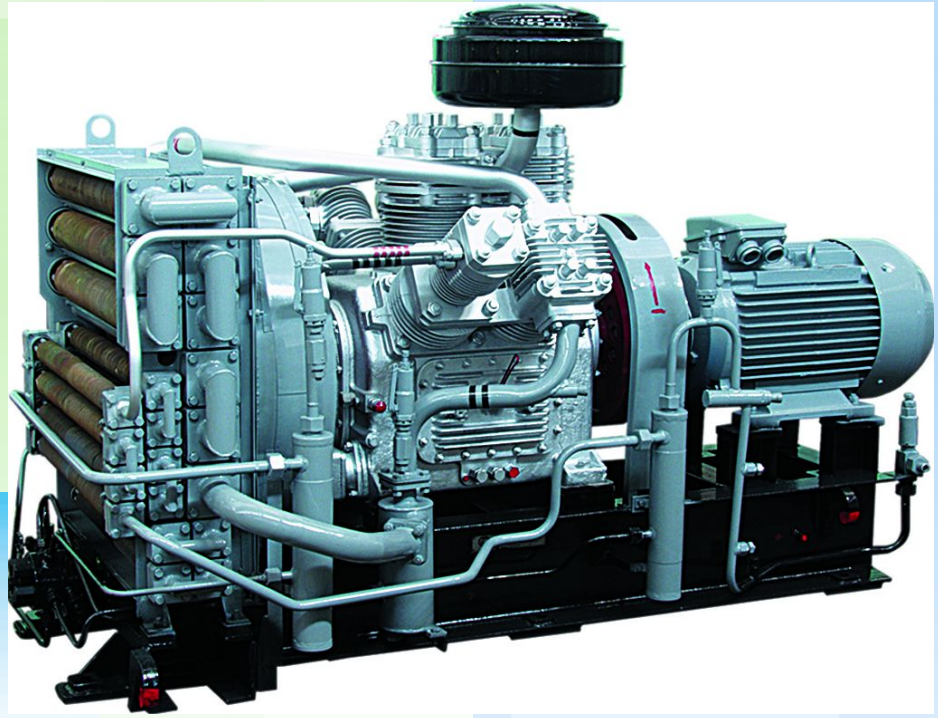
Устройство авиационной газовой турбины



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

Приводы компрессоров

Электродвигатели



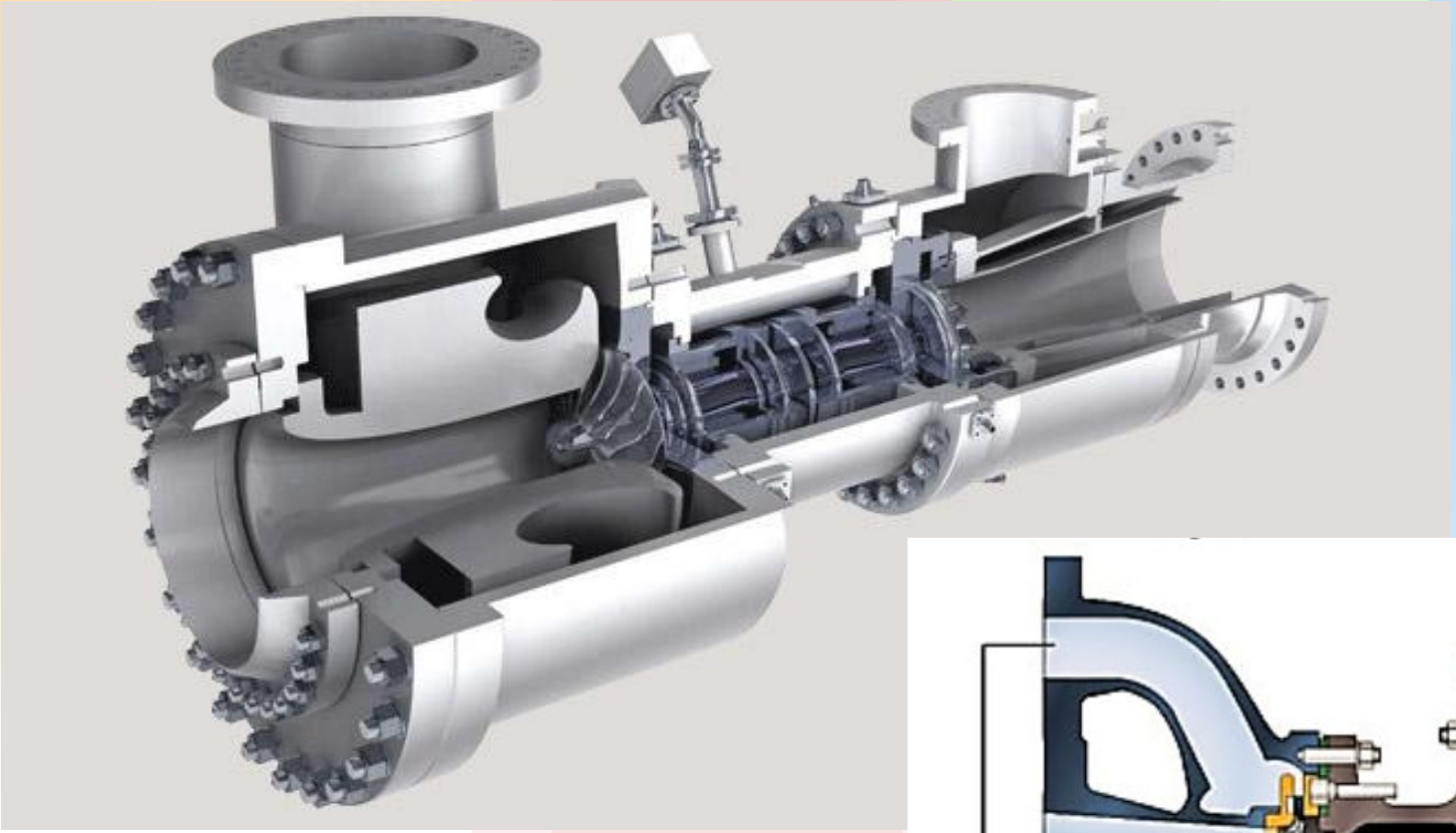
В сборе с поршневым компрессором

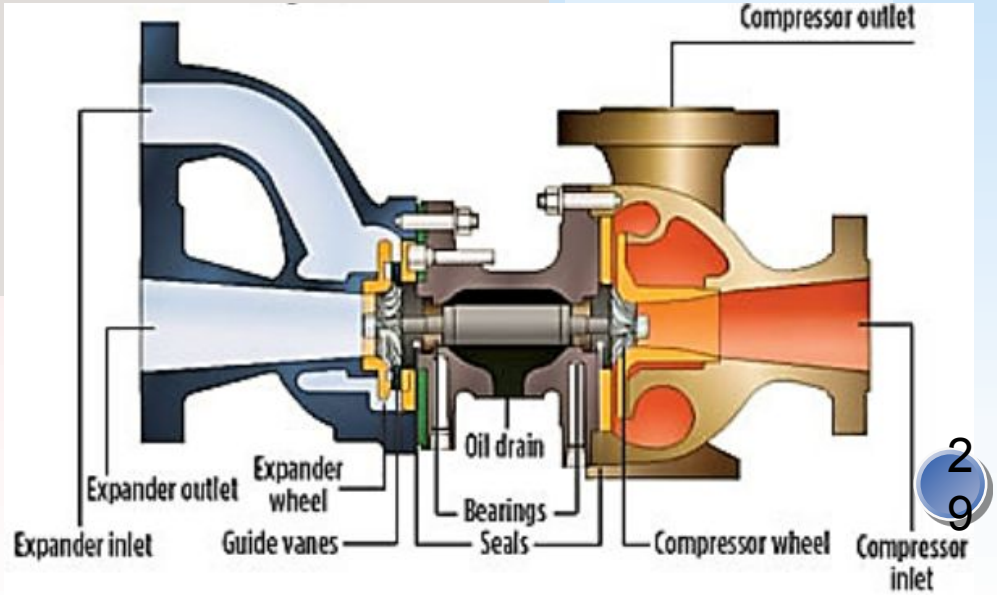
Компрессоры

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ КОМПРЕССОРНЫХ ПРИВОДОВ

Тип привода	Преимущества	Недостатки
Паровые турбины	• Хорошо зарекомендовали себя в производстве СПГ • Выбор турбины зависит от требуемой мощности • Регулируемая скорость вращения • Простота эксплуатации и пуска	• Требуют создания на заводе крупной инфраструктуры (вода, пар и системы конденсации • Увеличивают общую стоимость завода
Промышленные газовые турбины	• Большой опыт эксплуатации на заводах СПГ • Занимают меньшую площадь • Рентабельность	• Одновальные турбины требуют стартеров большой мощность
Авиационные газовые турбины	• Упрощают схему завода • Рентабельность • Эффективность использования топлива выше, чем у промышленных газовых турбин • Быстро удаляются или заменяются	• Нет опыта эксплуатации в производстве СПГ • Необходимо более высокое давление топливного газа, чем у промышленных турбин
Электродвигатели	• Более низкие капитальные затраты • Пониженные эксплуатационные расходы • Большая гибкость в увязке с компрессорами	• Зависимость от внешнего источника энергии • Проблемы с мощностью, требуемой для запуска двигателя

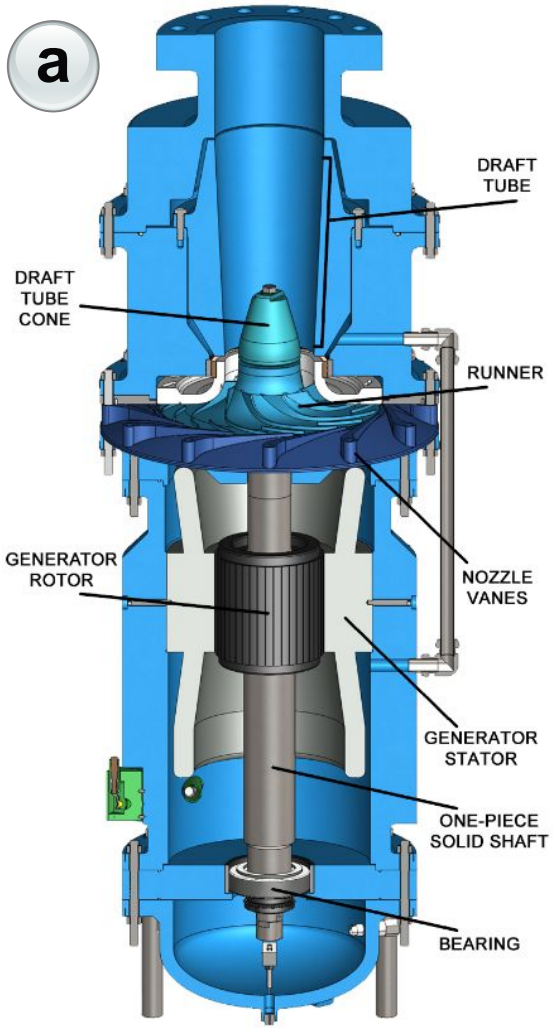
Турбодетандеры

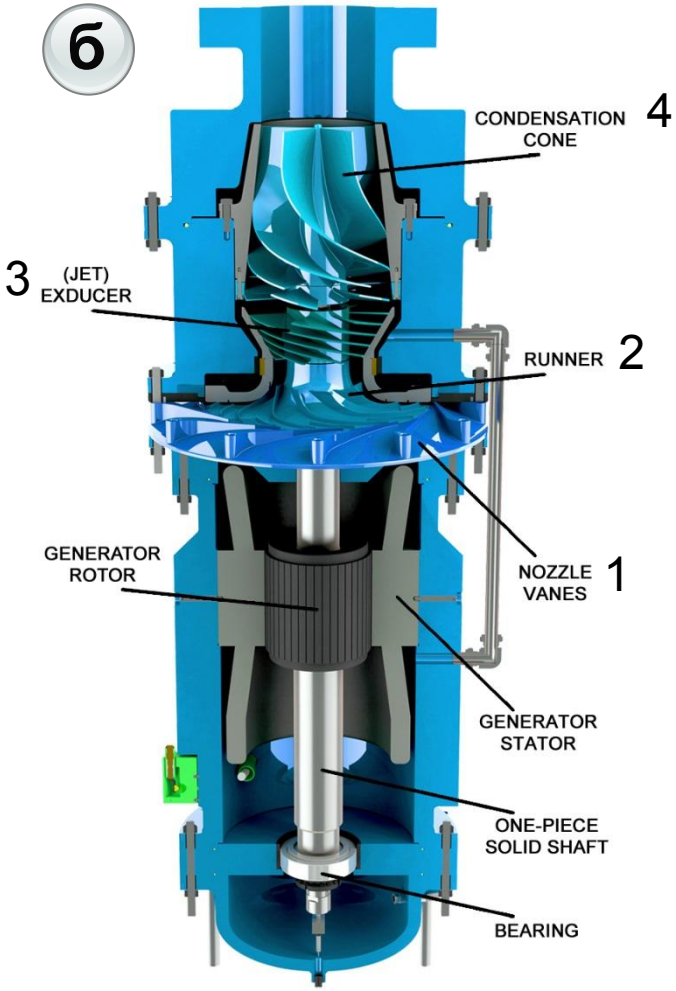




ГАЗОВЫЙ ТУРБОДЕТАНДЕР

Турбодетандеры

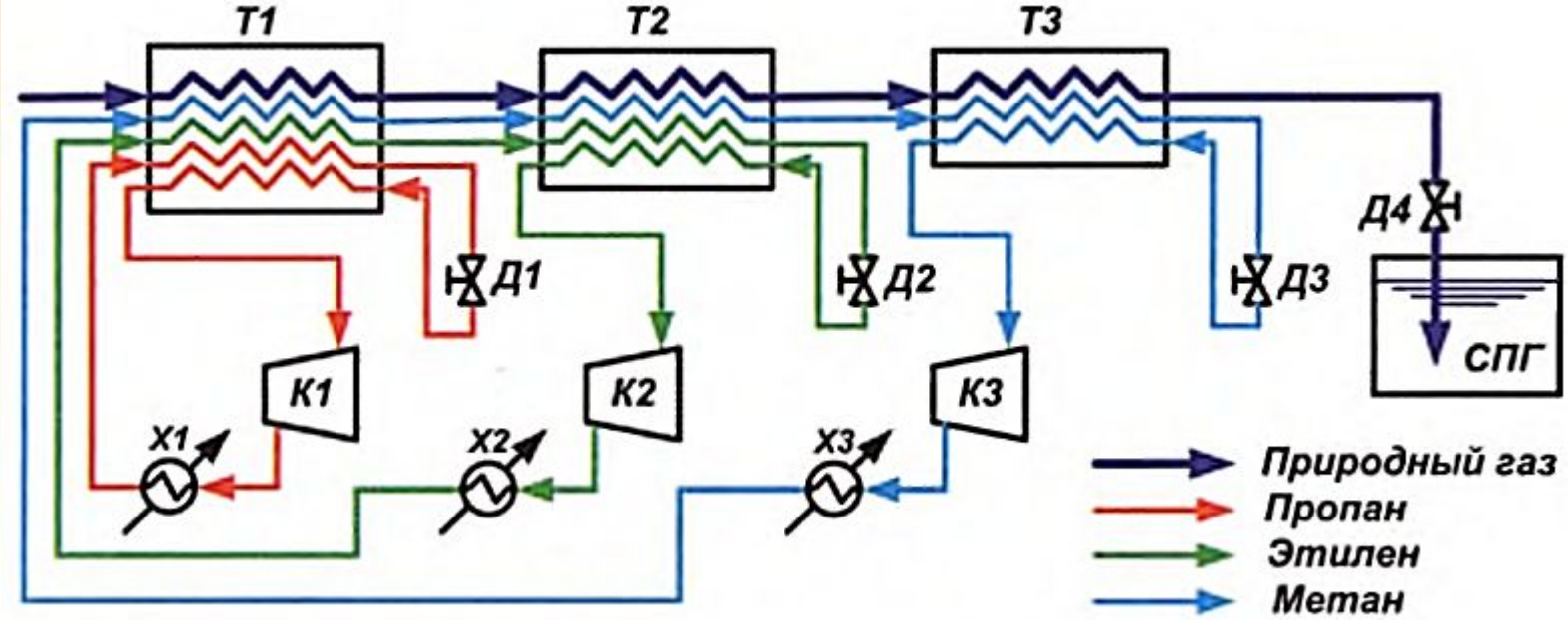




КОНСТРУКЦИИ ЖИДКОСТНОГО (а) И ПАРОЖИДКОСТНОКО (б) ТУРБОДЕТАНДЕРОВ
1- сопло, 2- радиальное рабочее колесо, 3- «exducer», 4- конус уплотнения.

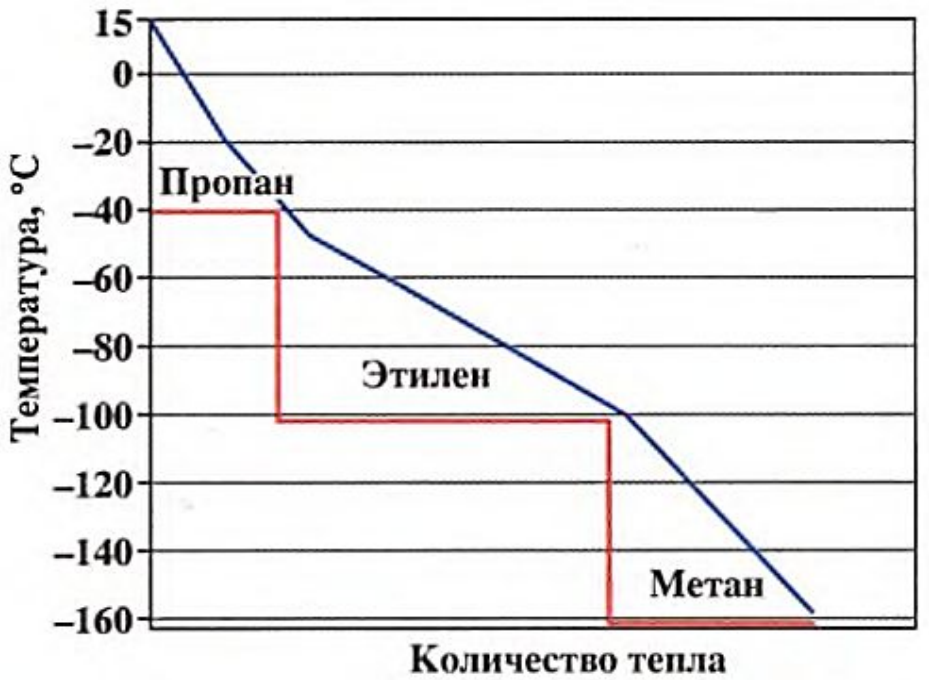
Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА КЛАССИЧЕСКОГО КАСКАДНОГО ЦИКЛА



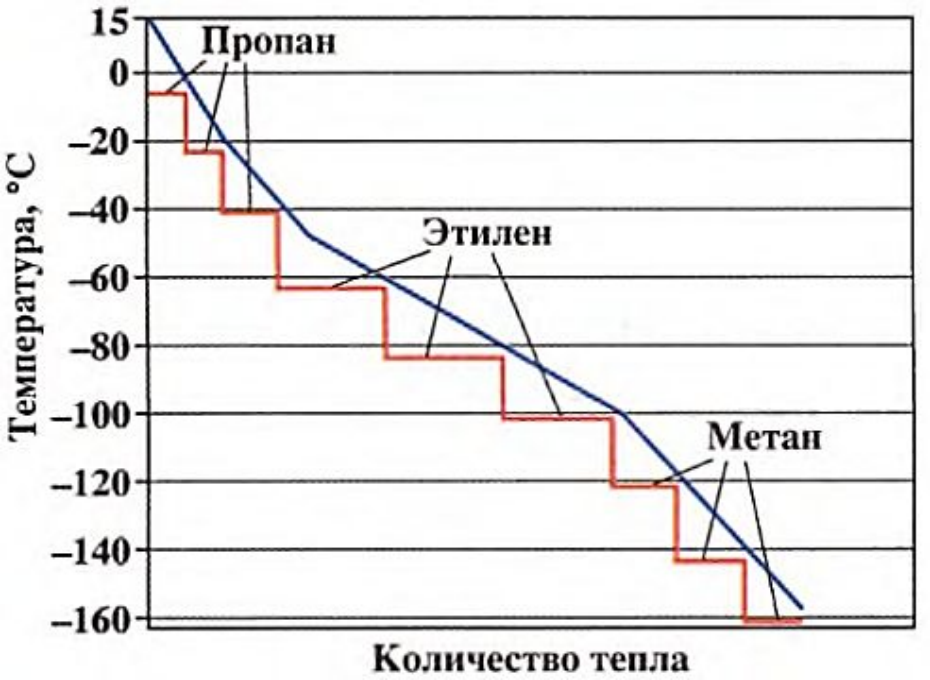
Технологии производства СПГ

а



Кривые охлаждения природного газа чистых хладагентов при использовании одноступенчатых циклов охлаждения

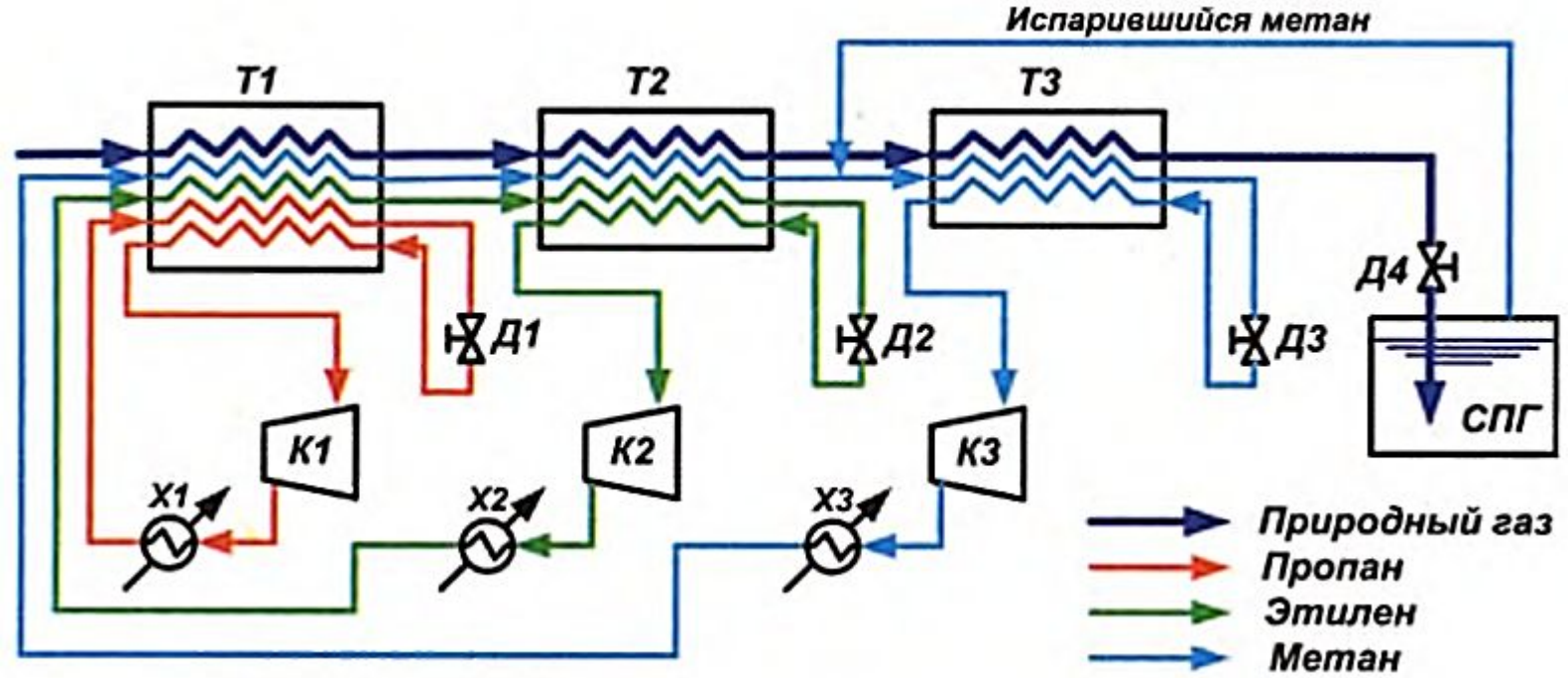
б



Кривые охлаждения природного газа чистых хладагентов при использовании трехступенчатых циклов охлаждения

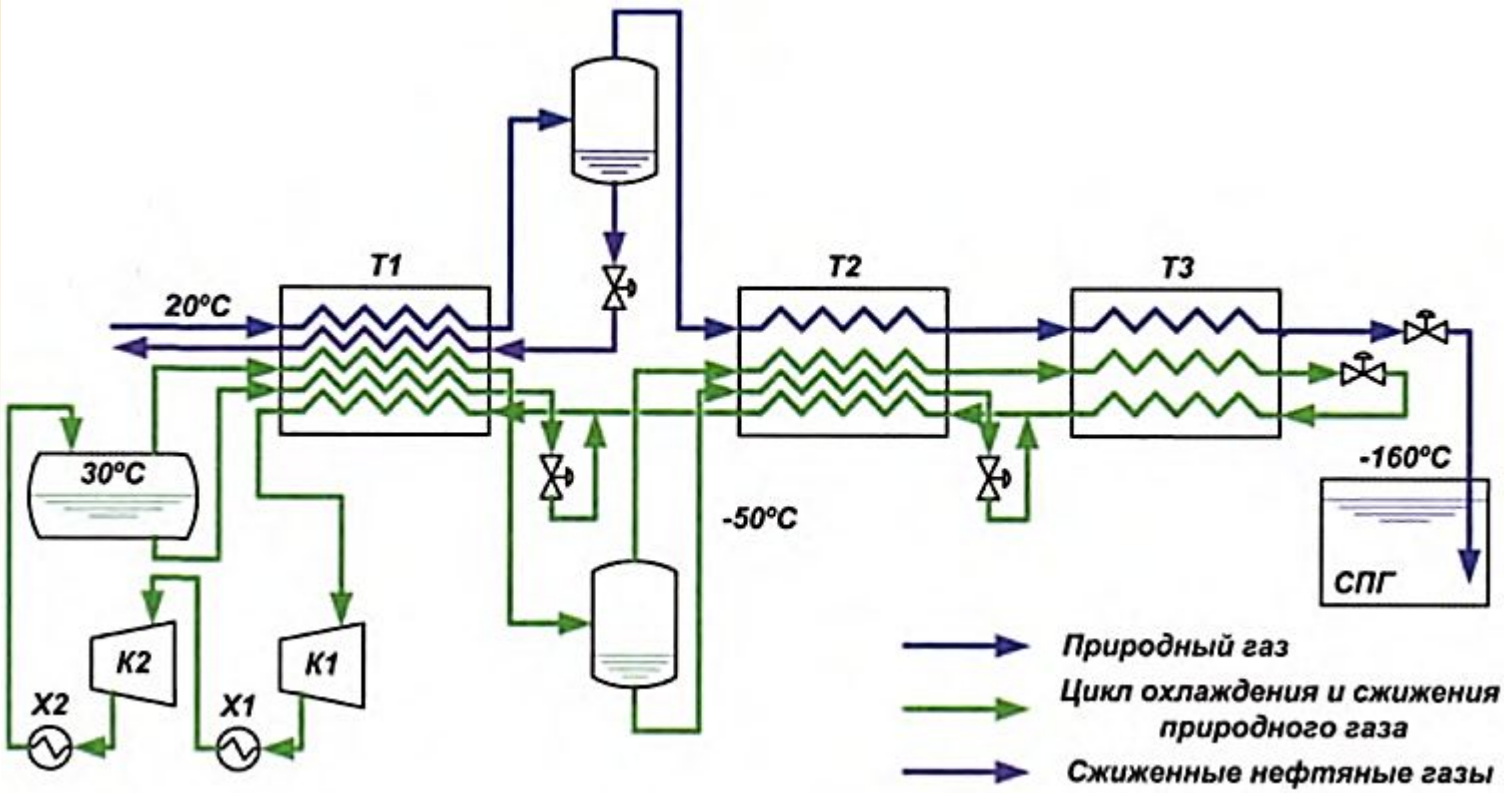
Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ КАСКАДНЫЙ ПРОЦЕСС PHILLIPS



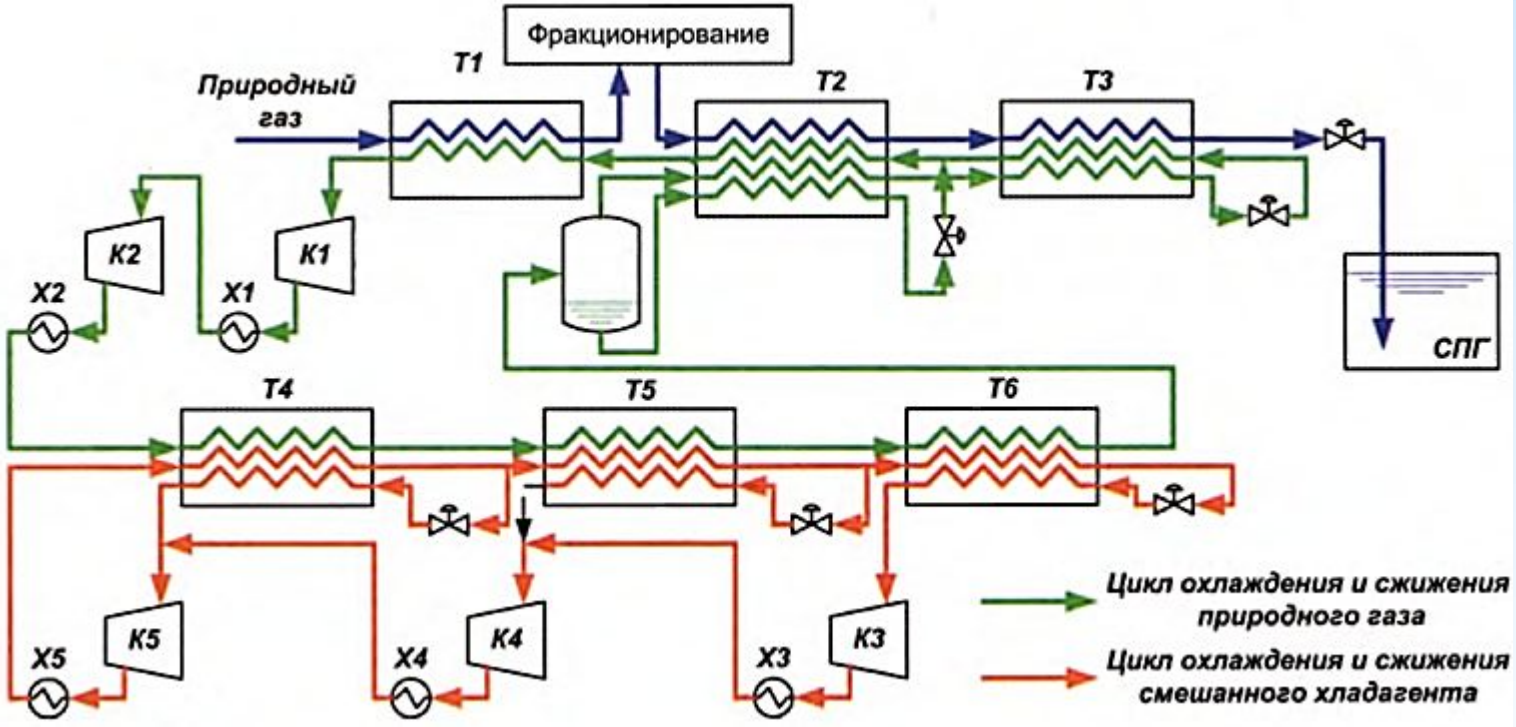
Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

ПРОЦЕСС TEALARC С ОДНИМ УРОВНЕМ ДАВЛЕНИЯ



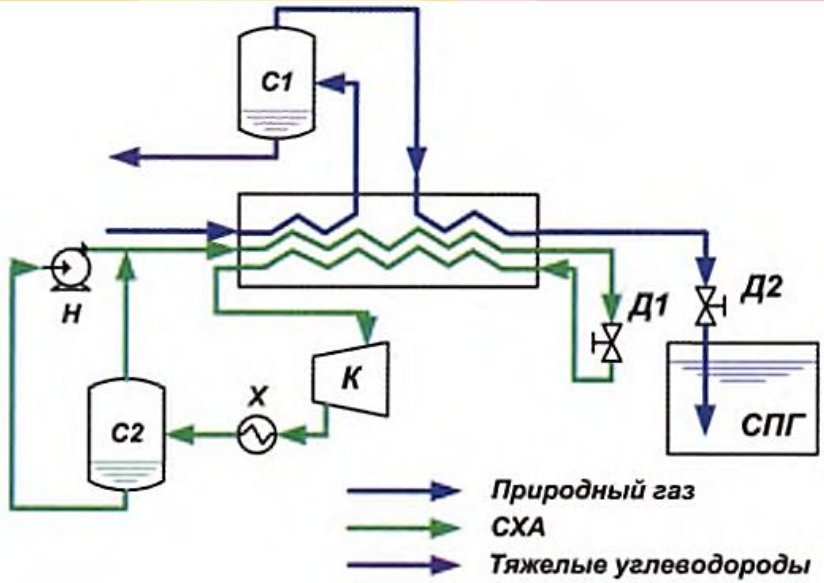
Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

ПРОЦЕСС TEALARC С ДВУМЯ УРОВНЯМИ ДАВЛЕНИЯ

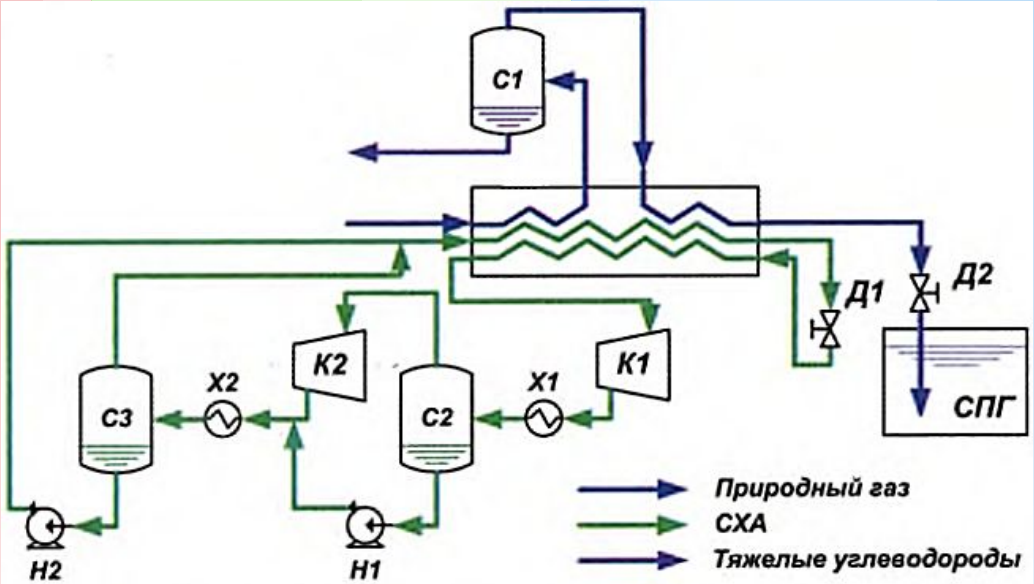


Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

ПРОЦЕСС PRICO



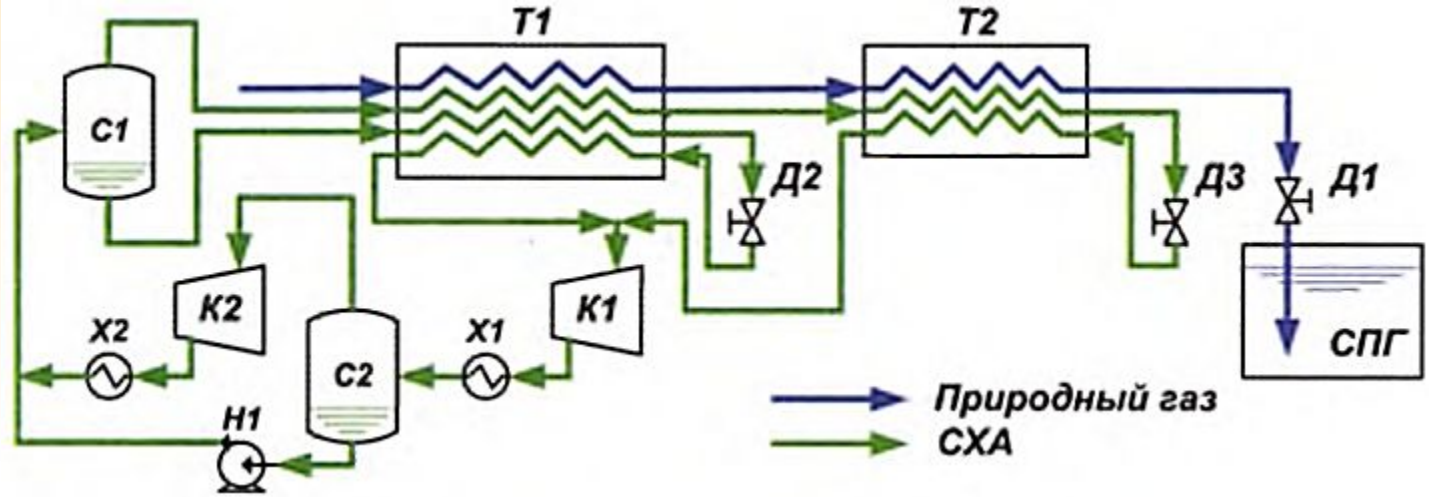
МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ПРОЦЕСС PRICO



PRICO - (Poly Refrigerant Integrated Cycle Operations)

Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

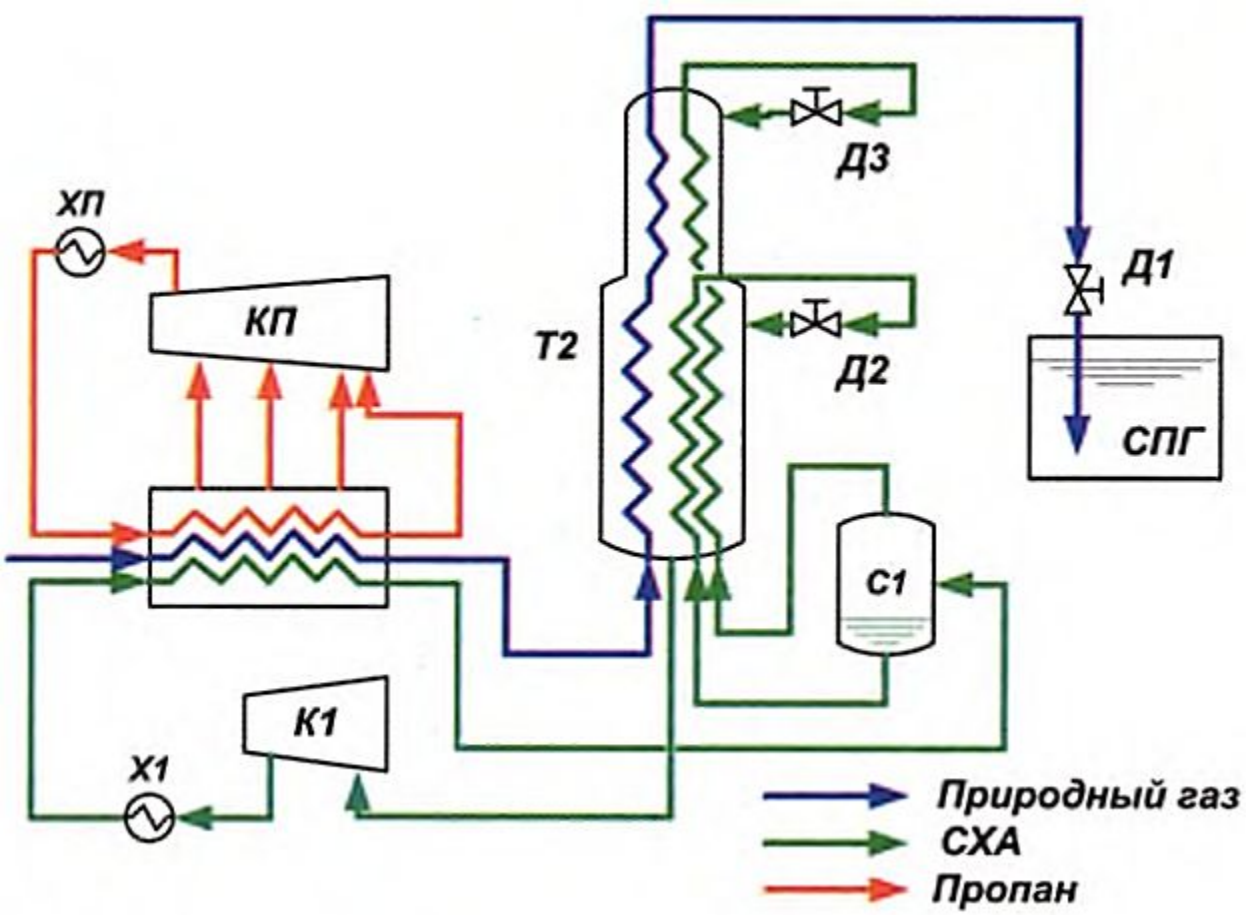
ПРОЦЕСС APCI SMR



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

Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

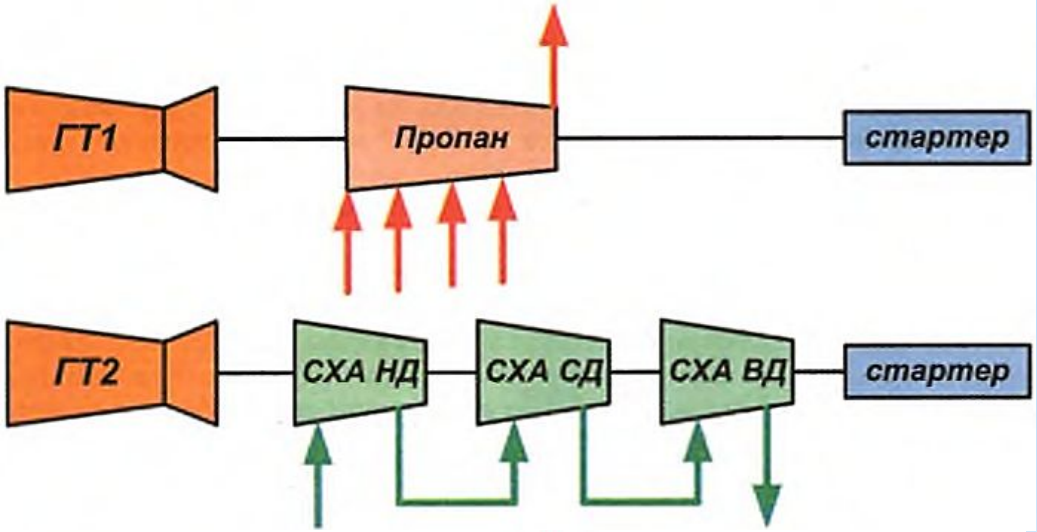
ПРОЦЕСС APCI C3MR



Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

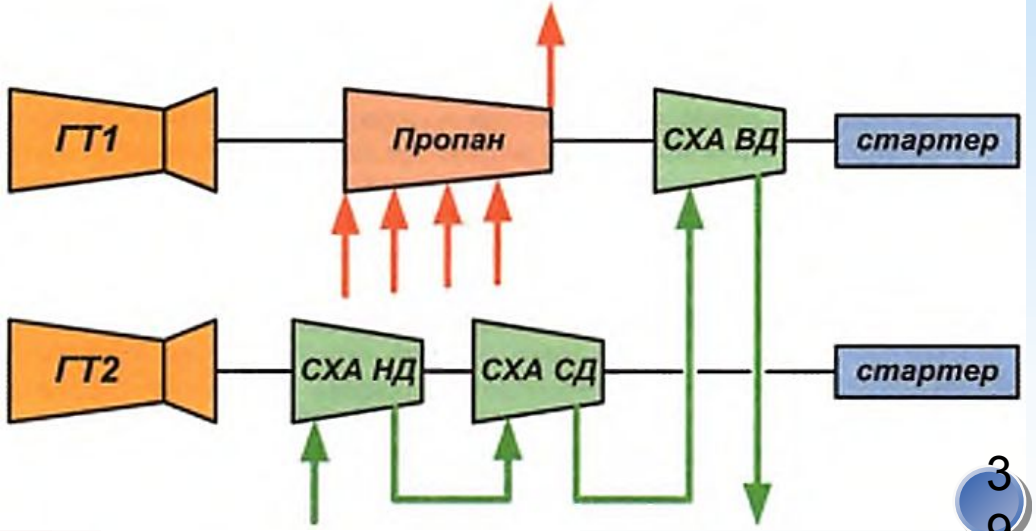
а

Конфигурация компрессоров в процессе APCI C3MR



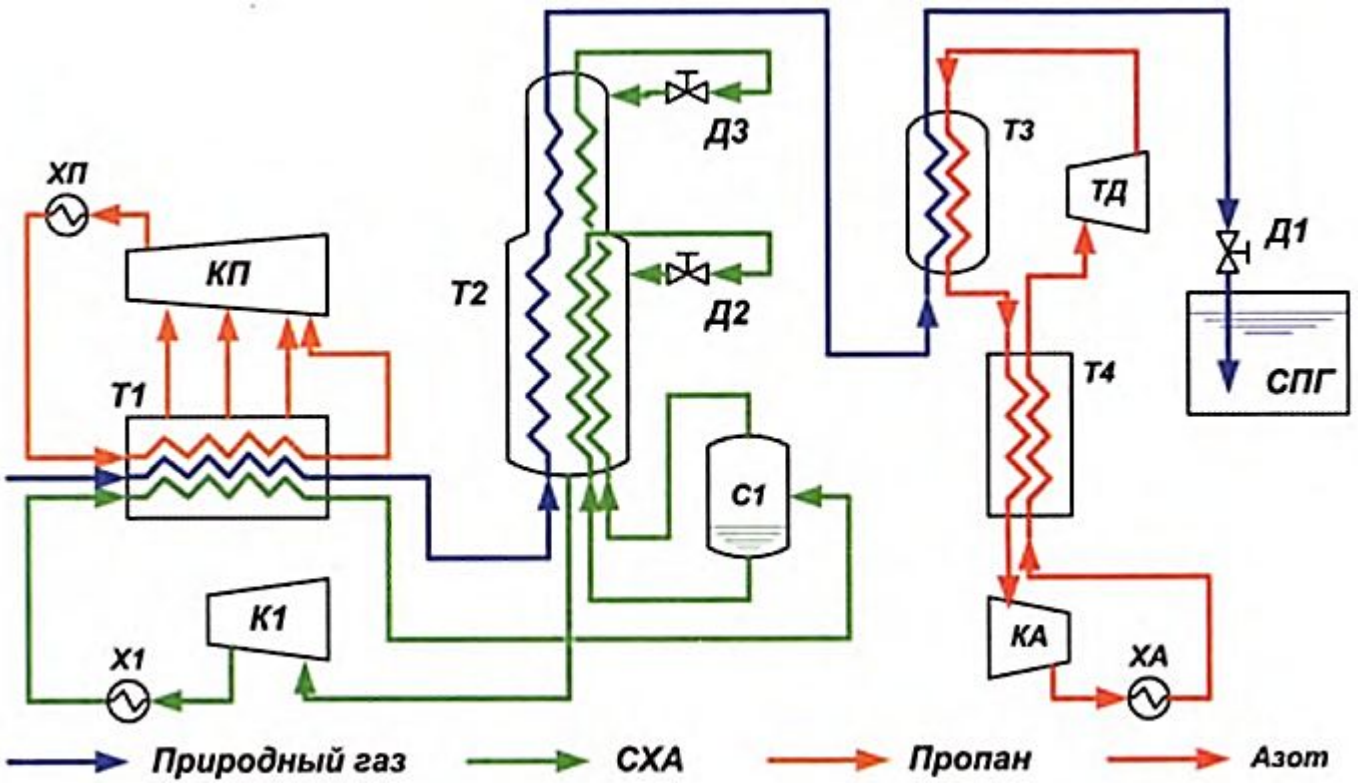
б

Конфигурация компрессоров в процессе APCI C3MR/SplitMR



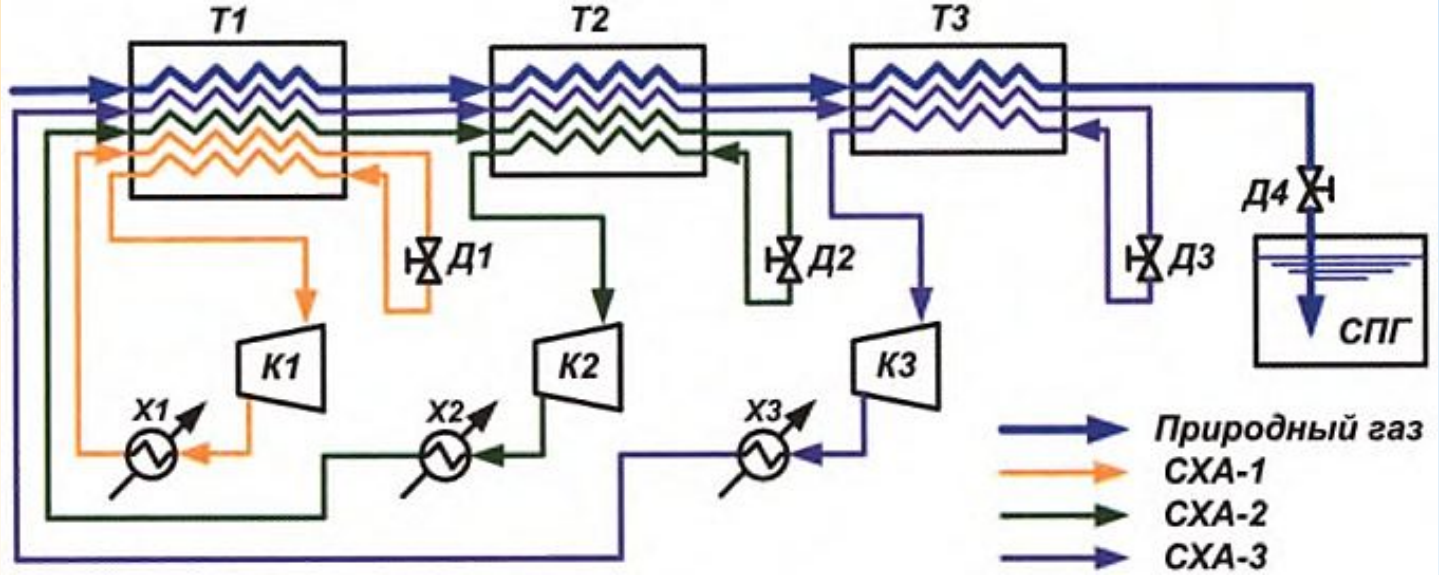
Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

ПРОЦЕСС АРС-Х



Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

ПРОЦЕСС STATOIL-LINDE MFC (Mixed Fluid Cascade)

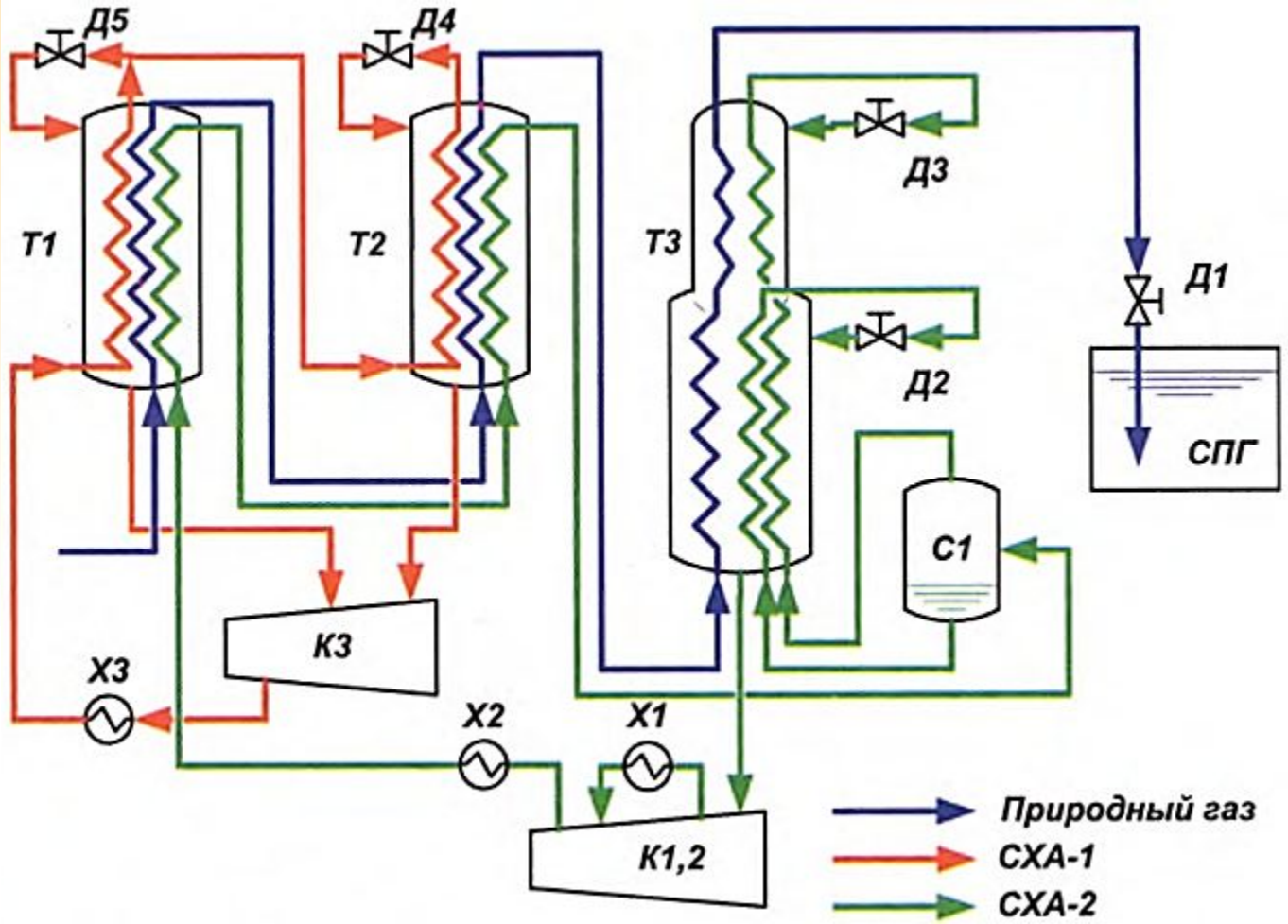


СОСТАВЫ ХЛАДАГЕНТОВ ПРОЦЕССА STATOIL-LINDE MFC

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

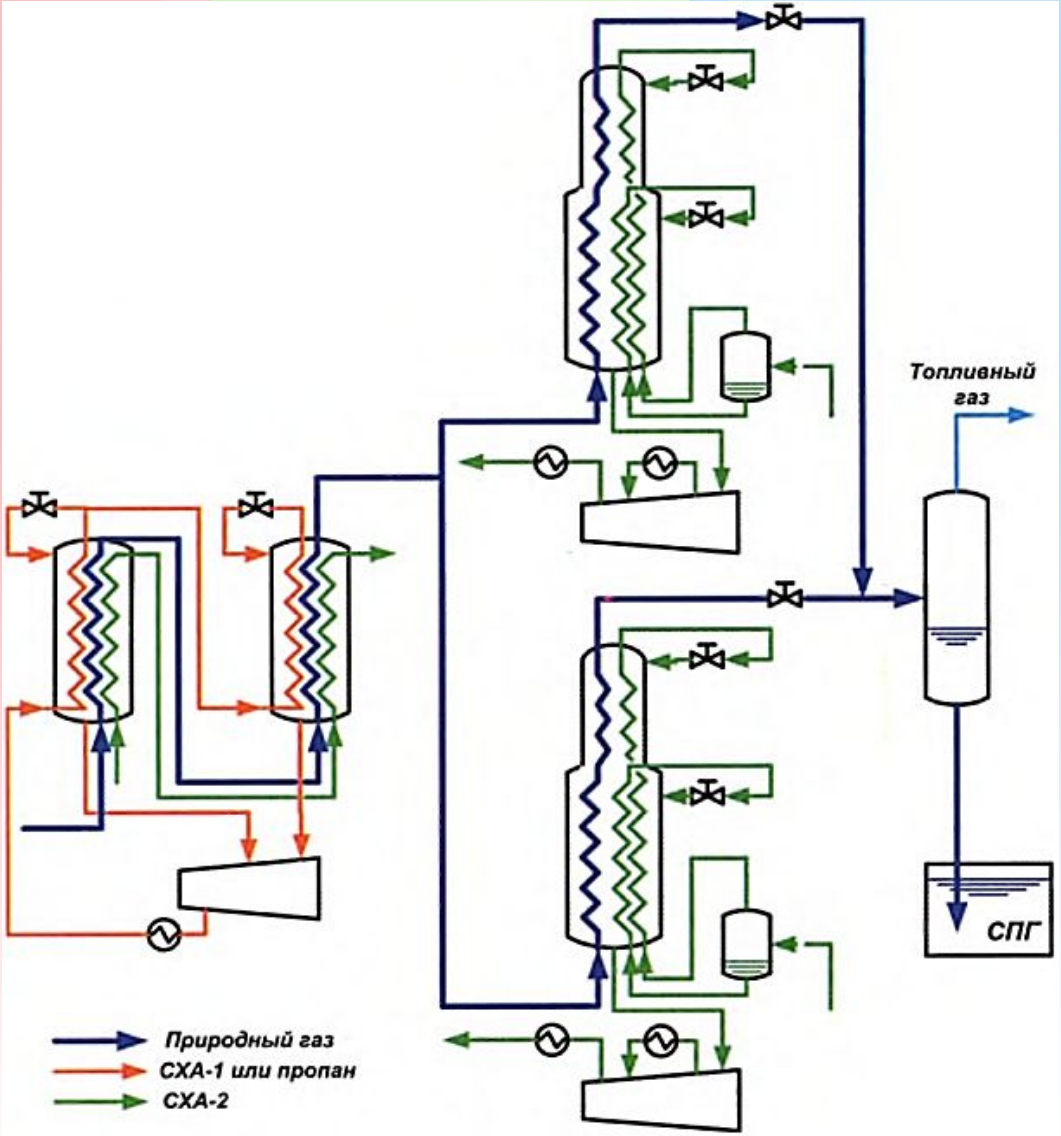
ПРОЦЕСС SHELL DMR (Double Mixed Refrigerant)



Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

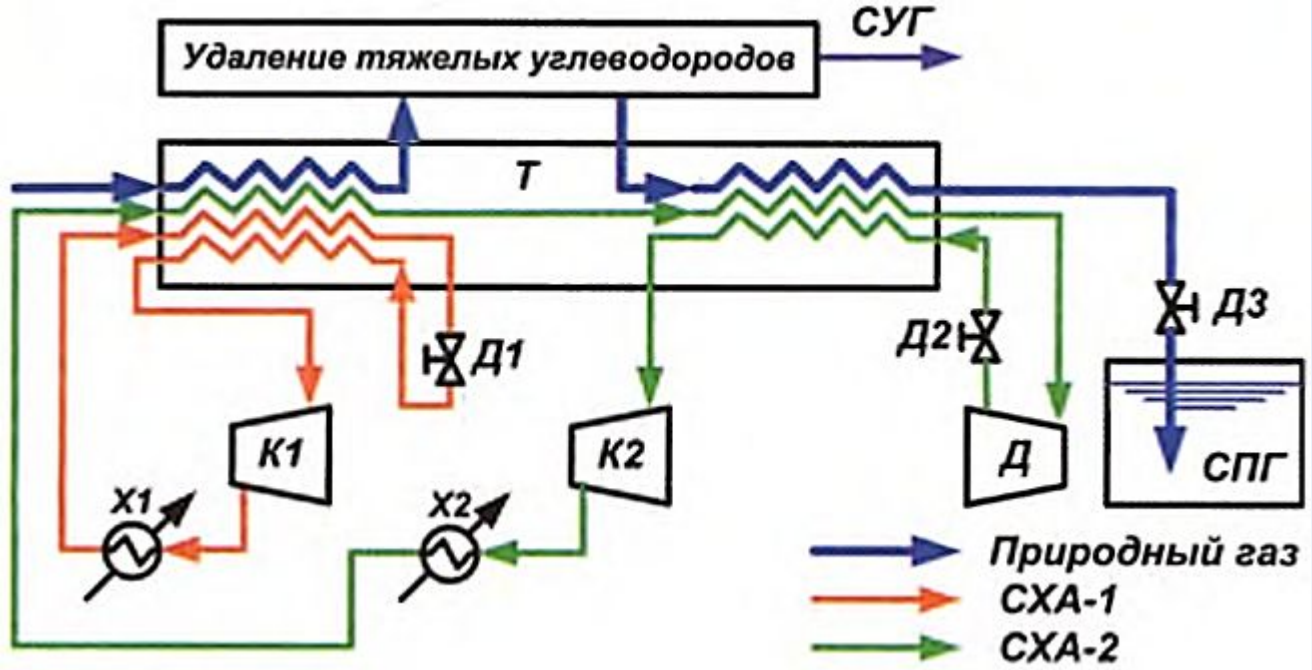
ПРОЦЕСС SHELL PMR

(Parallel Mixed Refrigerant)

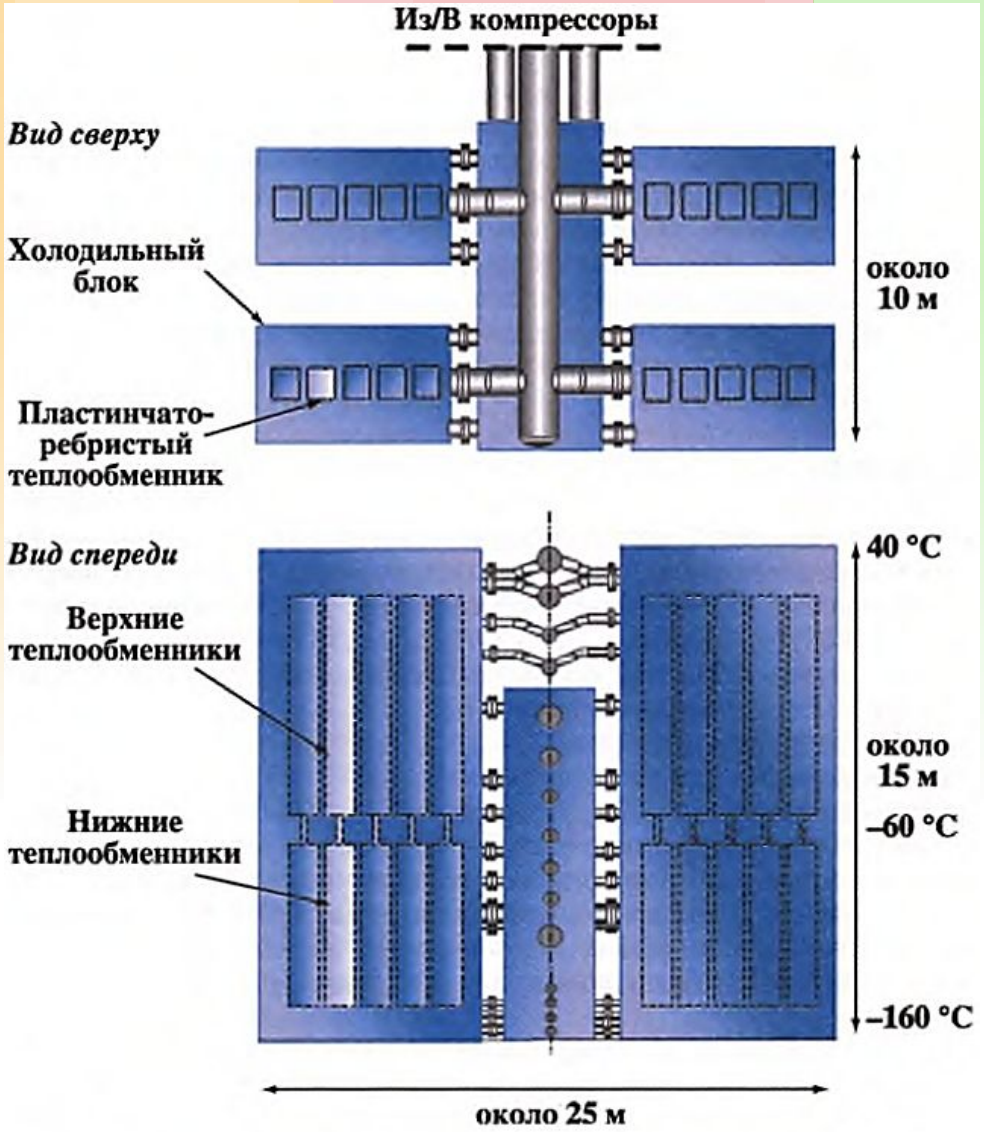


Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа

ПРОЦЕСС AXENS LIQUEFIN



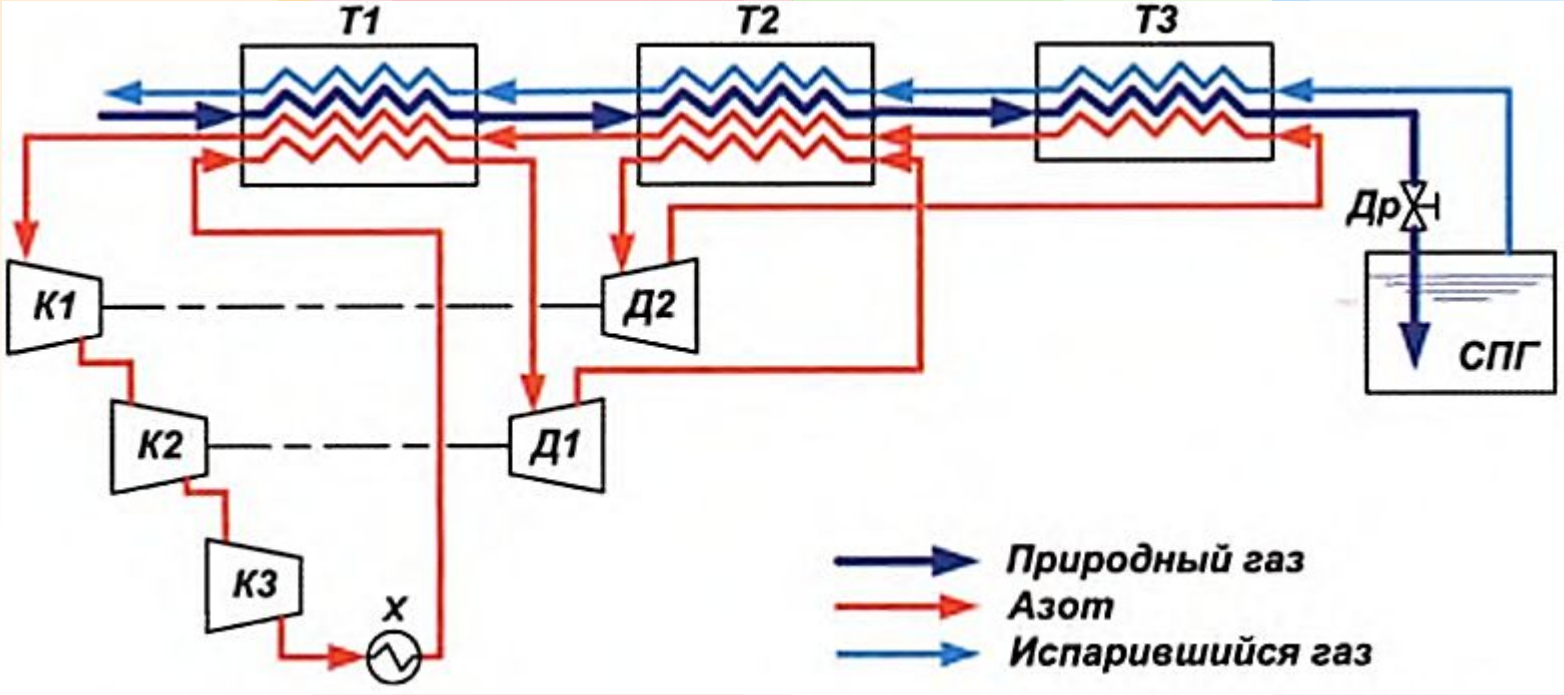
Каскадные процессы охлаждения и сжижения газа



КОНФИГУРАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ LIQUEFIN

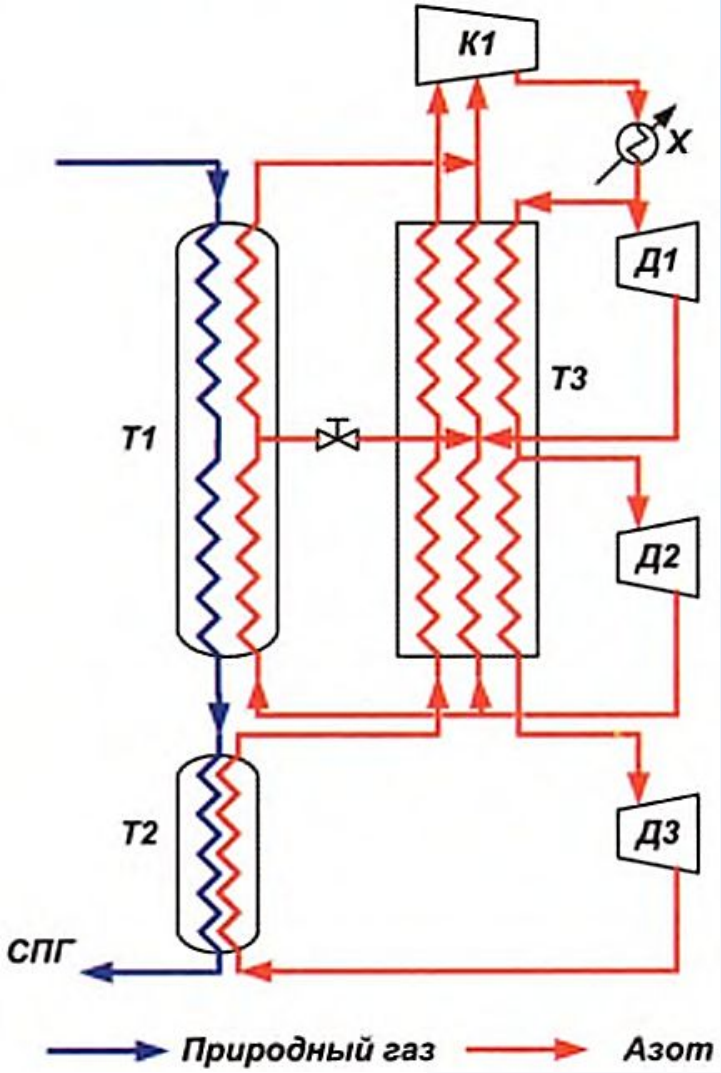
Малотоннажное производство СПГ

АЗОТНЫЙ ХОЛОДИЛЬНЫЙ ЦИКЛ С ДВУМЯ ДЕТАНДЕРАМИ



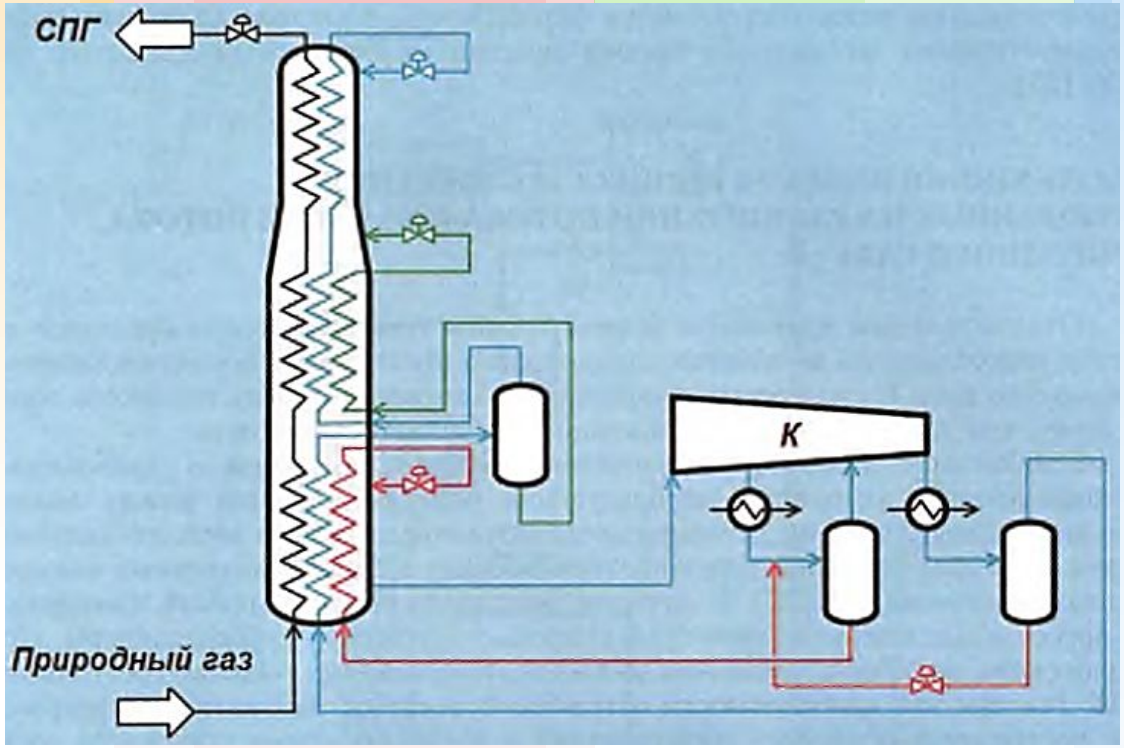
Малотоннажное производство СПГ

ПРОЦЕСС APCI N2 EXPANDER



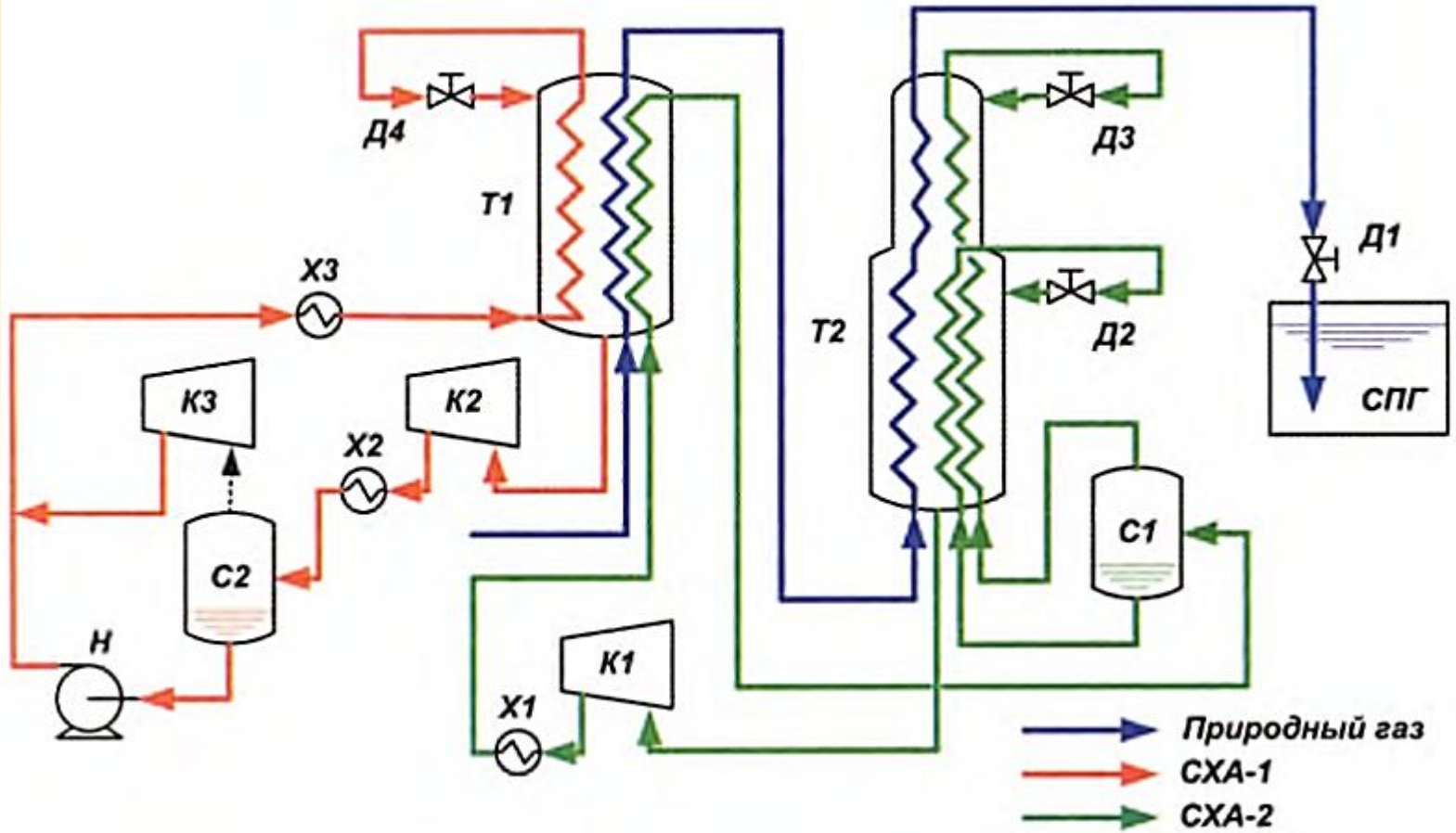
Малотоннажное производство СПГ

СХЕМА ПРОЦЕССА LINDE LIMUM



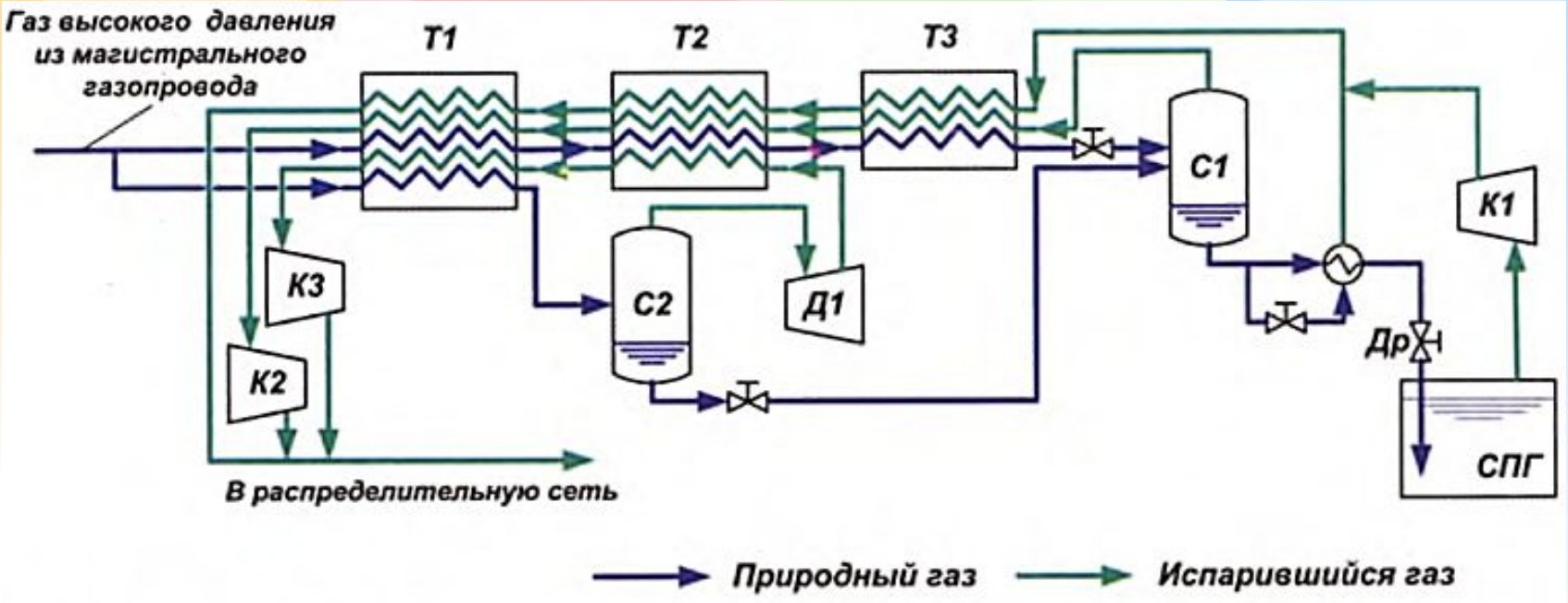
Малотоннажное производство СПГ

ПРОЦЕСС APCI DMR (Dual Mixed Refrigerant)



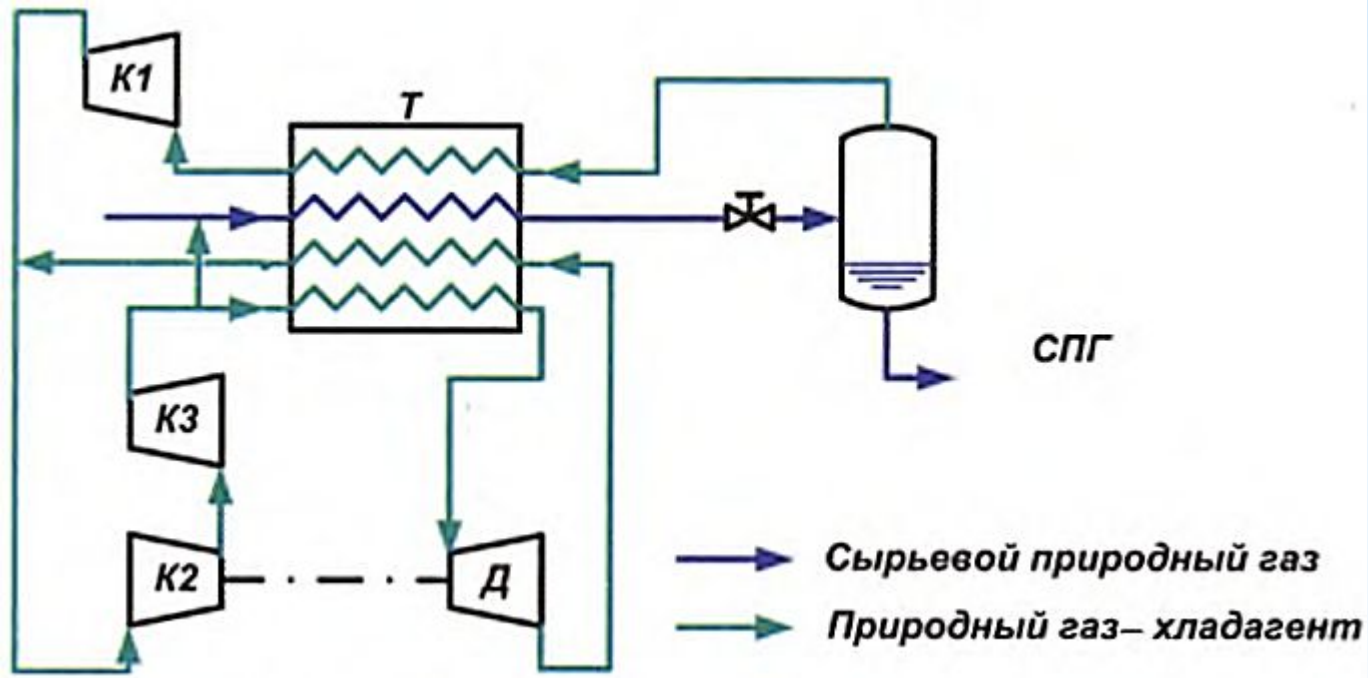
Малотоннажное производство СПГ

ПОЛУЧЕНИЕ СПГ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ



Малотоннажное производство СПГ

Процесс MUSTANG OCX-2



Приложение

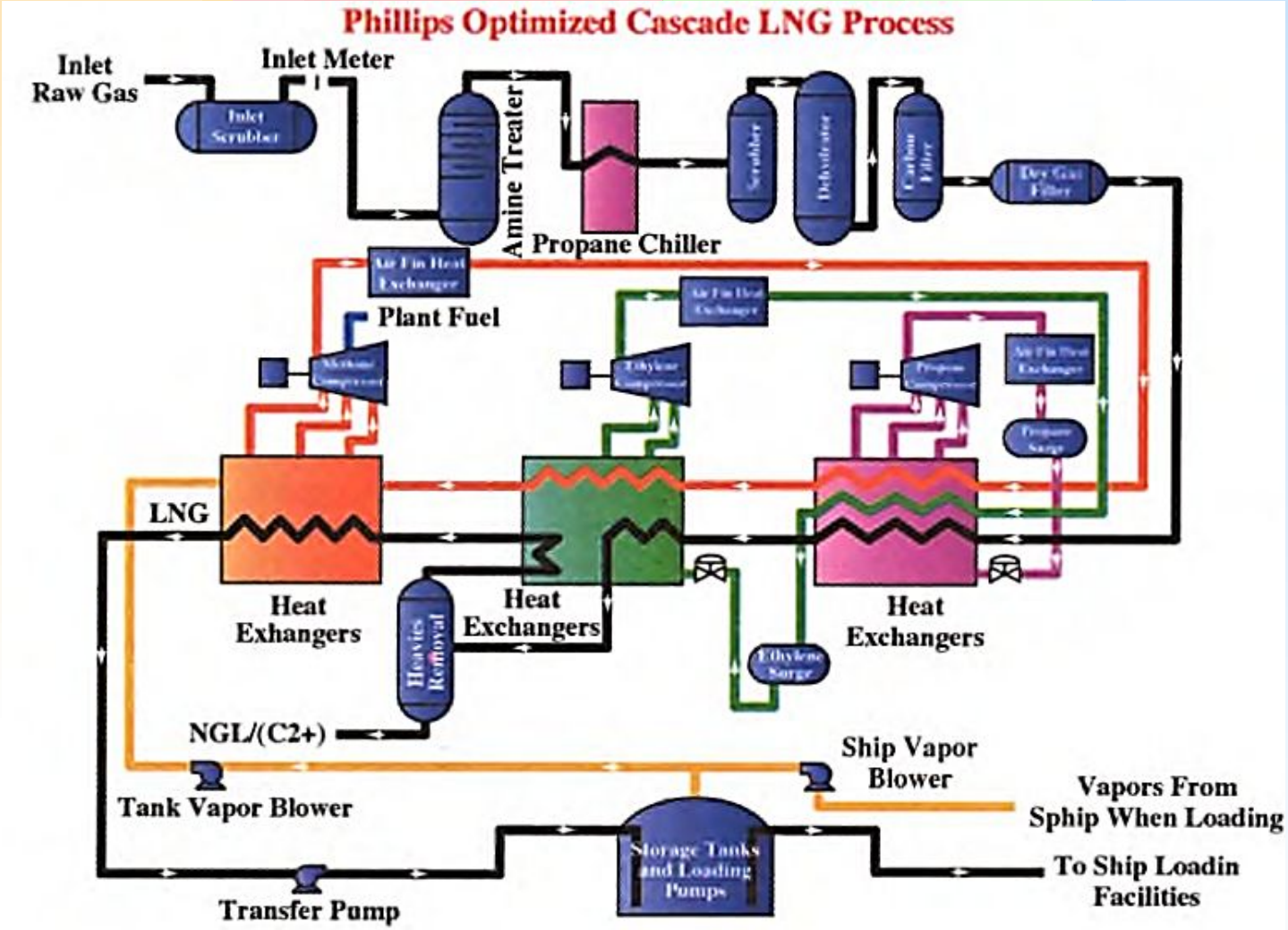


Рис. П-1. Модернизированный каскадный процесс Phillips (ConocoPhillips Optimized Cascade^{SM}).

Приложение

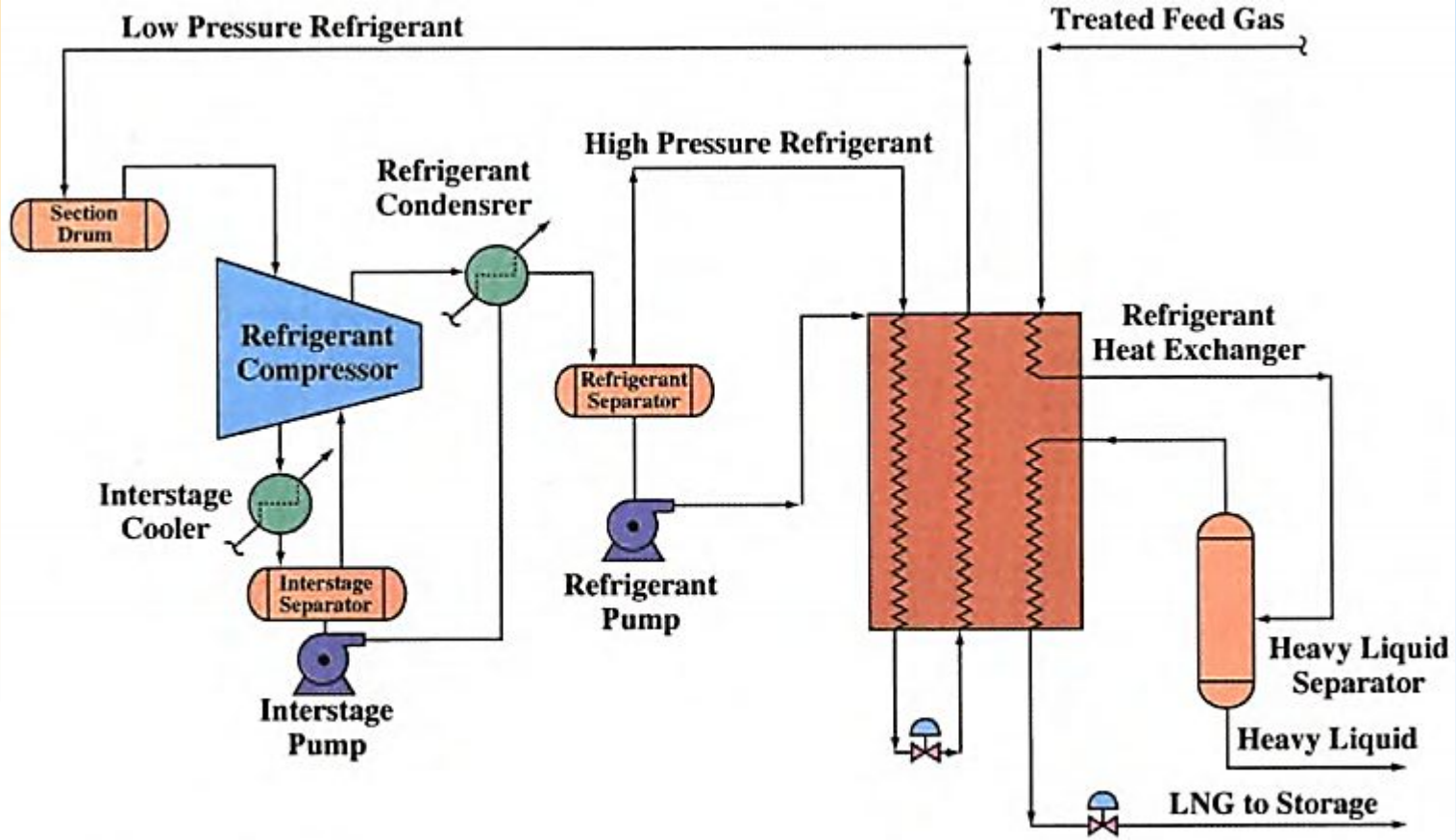


Рис. II-2. Процесс PRICO®.

Приложение

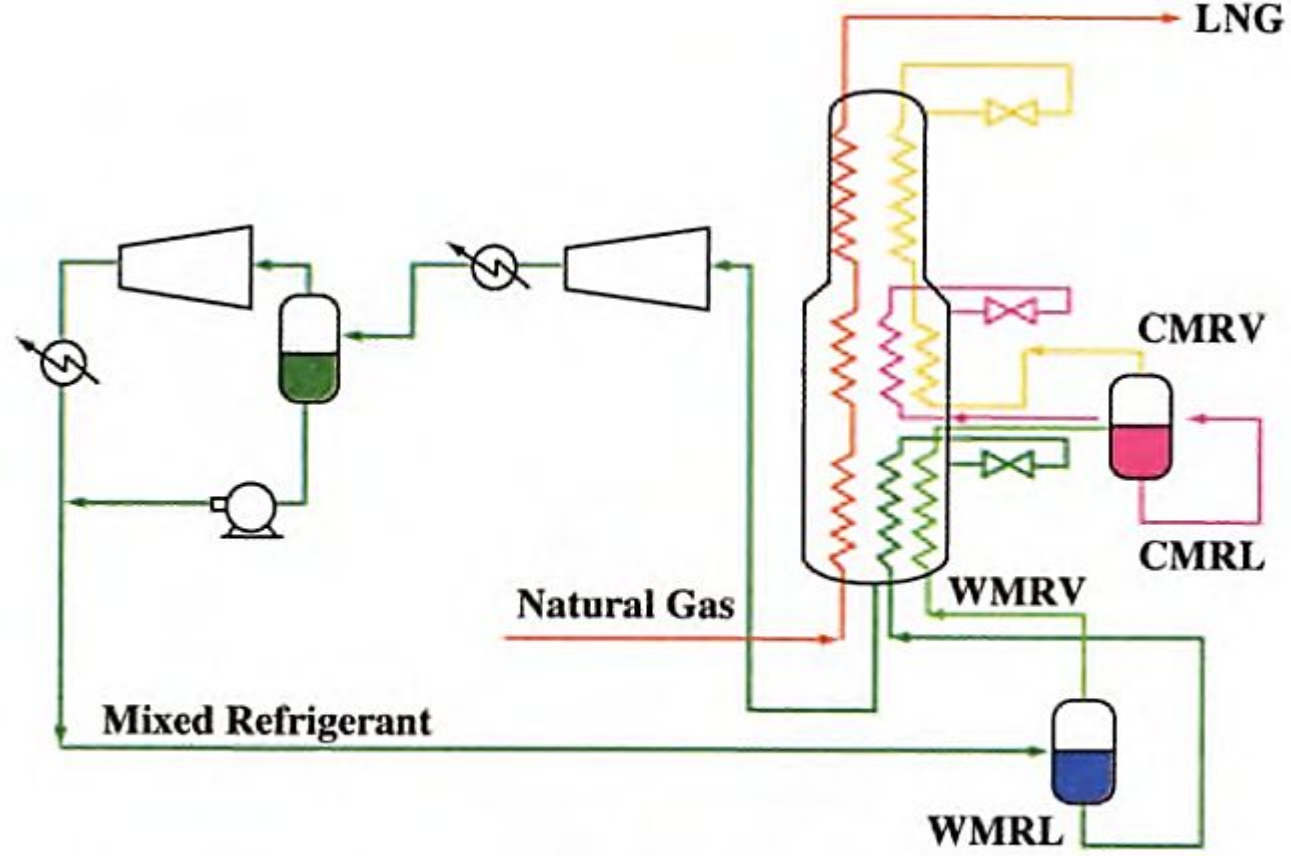


Рис. П-3. Процесс APCI SMR (Single Mixed Refrigerant Process).

Приложение

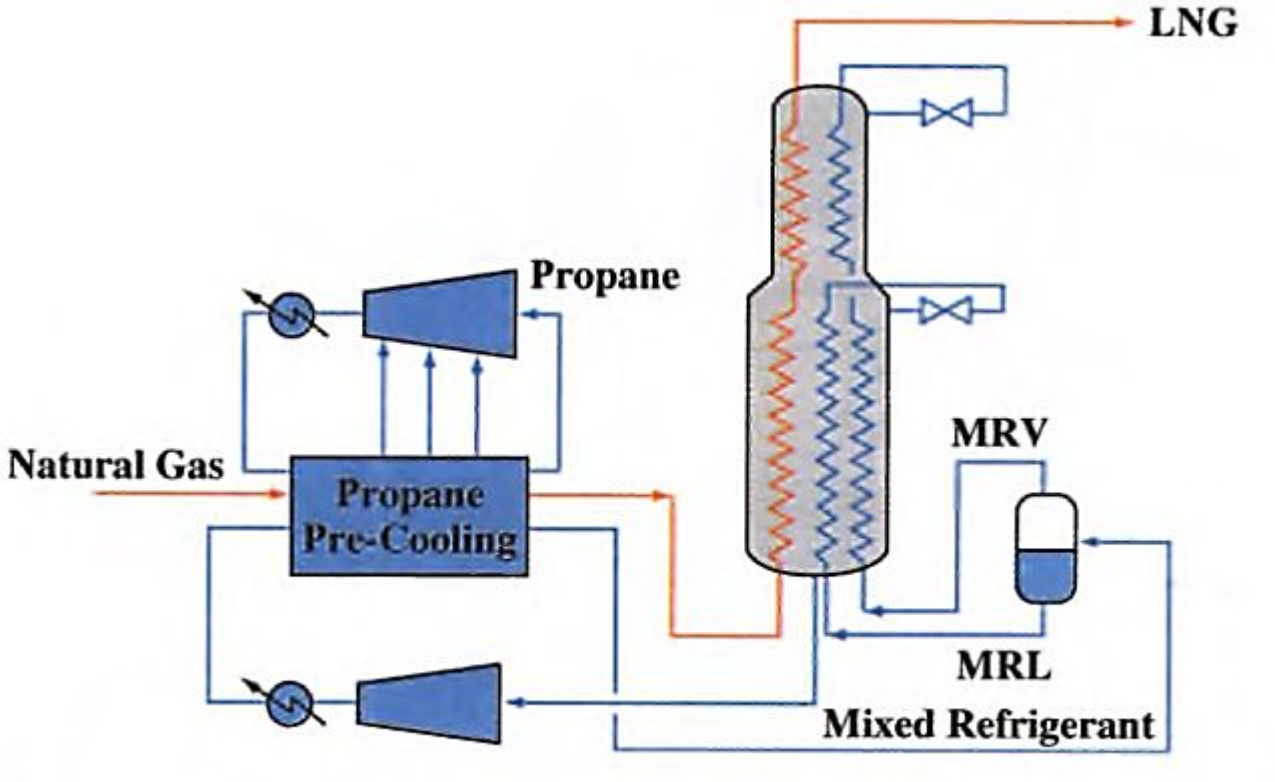


Рис. II-4. Процесс APCI S3MR (Propane Precooling Mixed Refrigerant Process).

Приложение

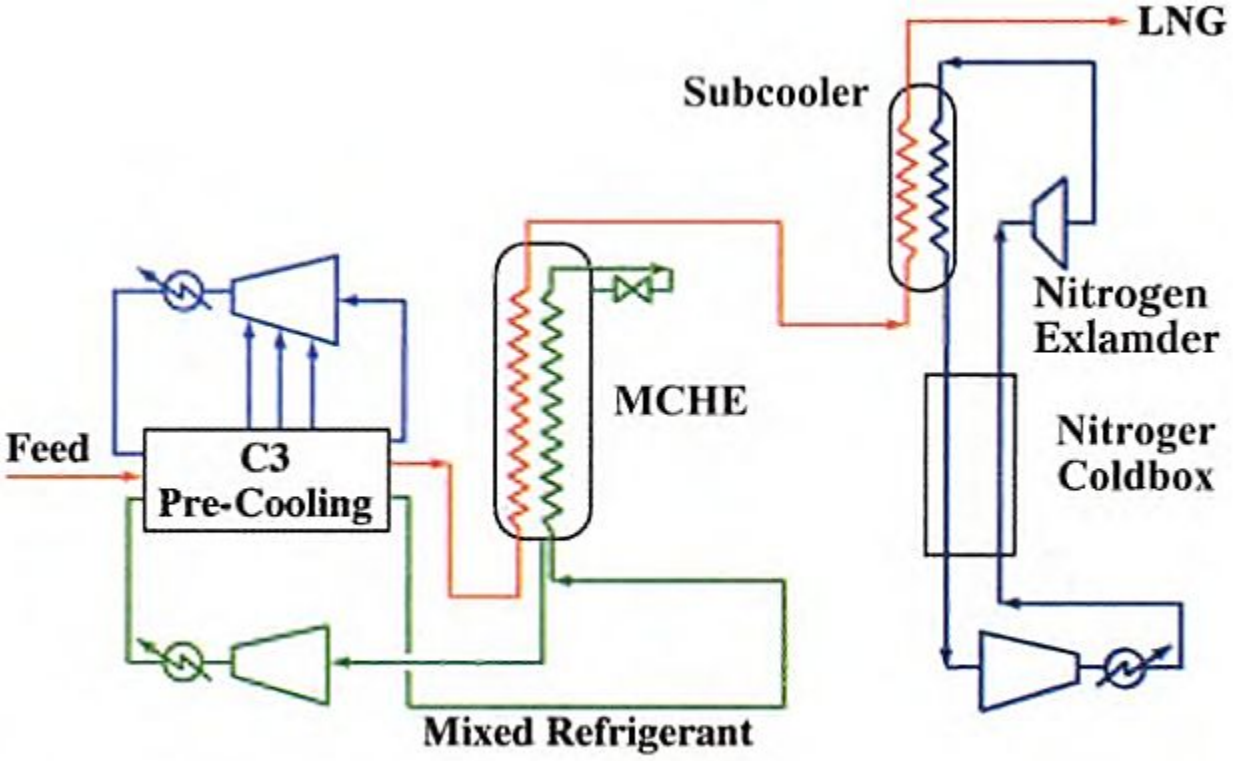


Рис. П-5. Процесс APCI AP-X™.

Приложение

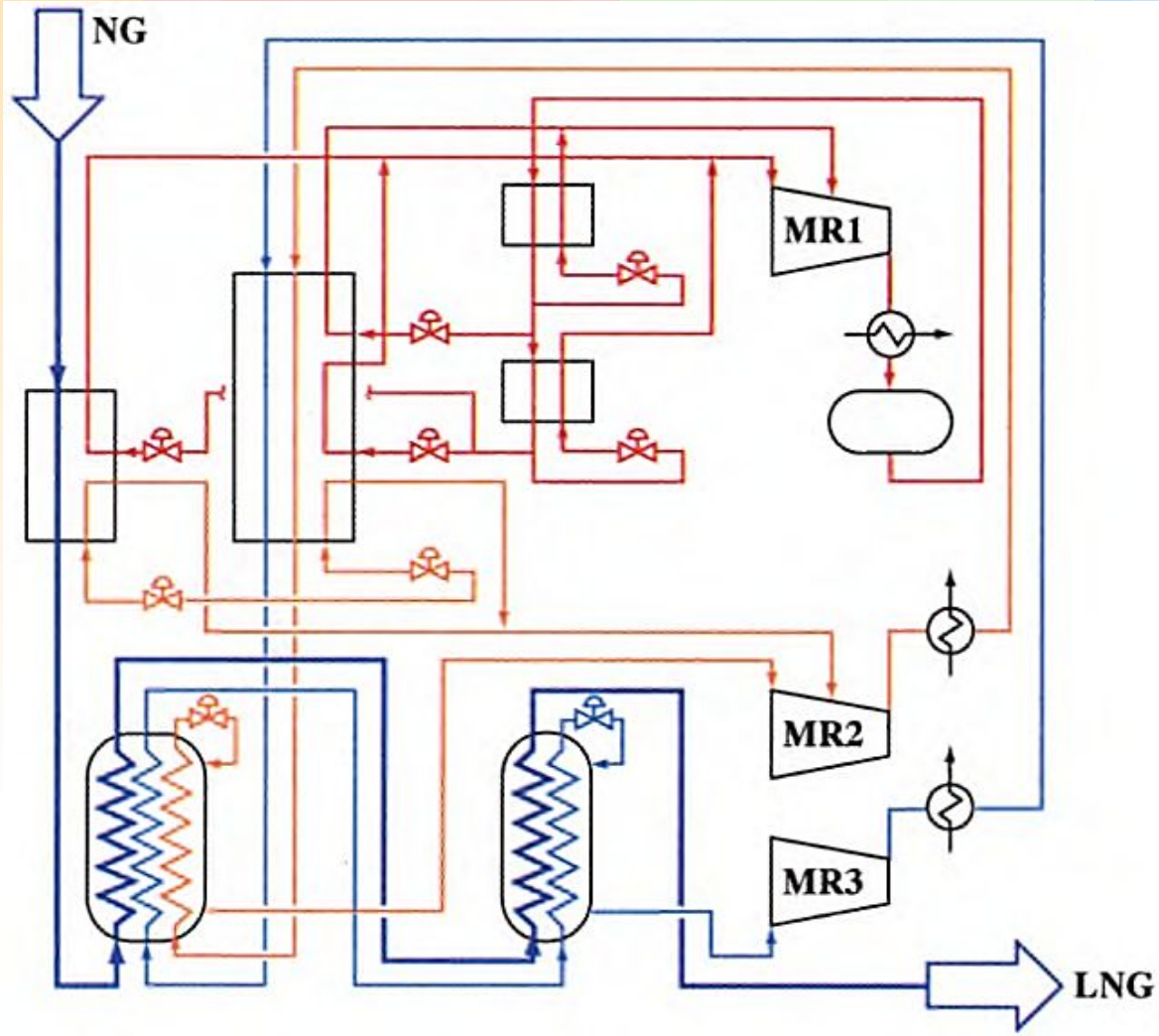


Рис. П-6. Процесс Statoil/Linde MFC®.

Приложение

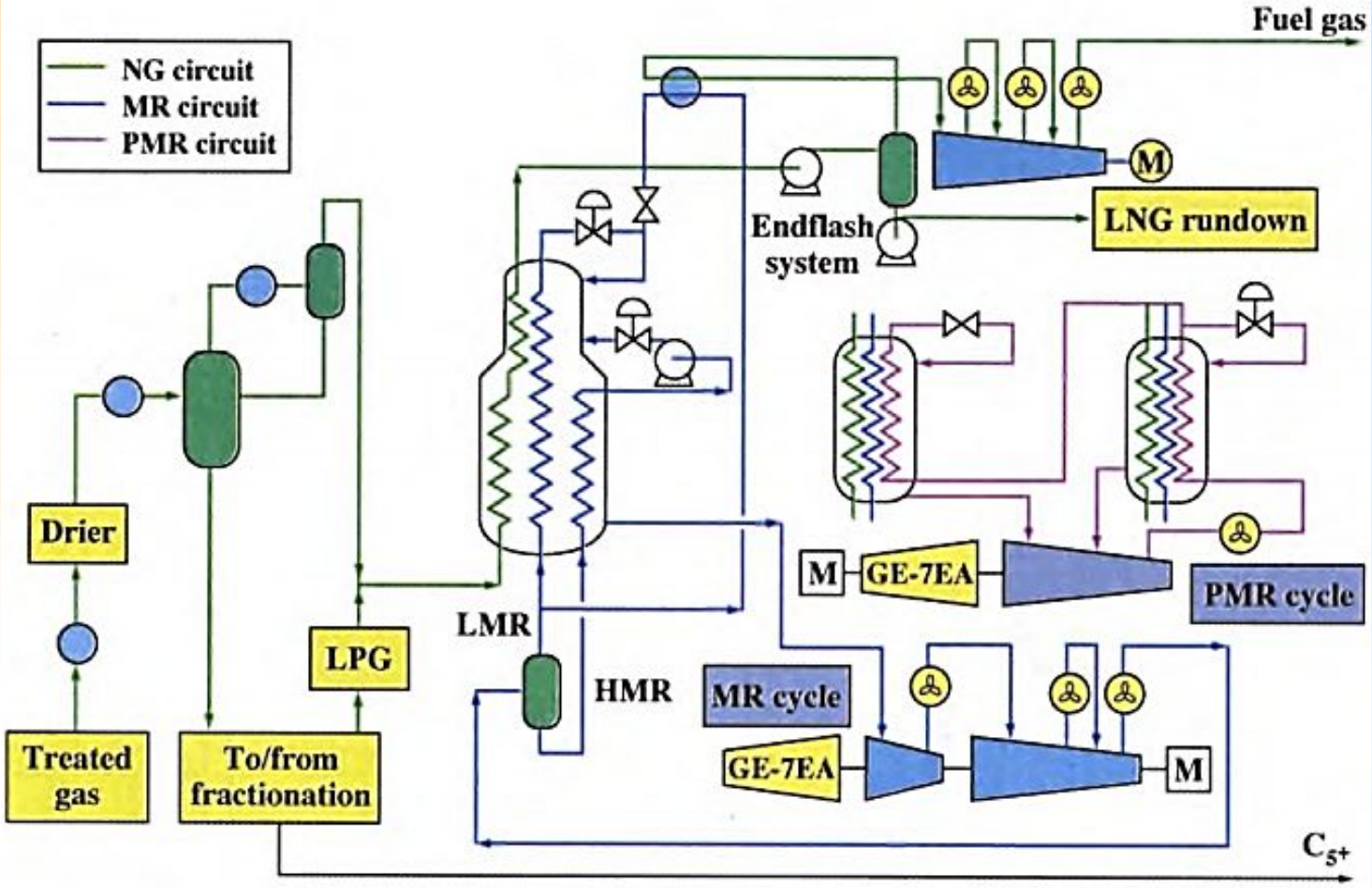


Рис. II-7. Процесс Shell DMR.

Приложение

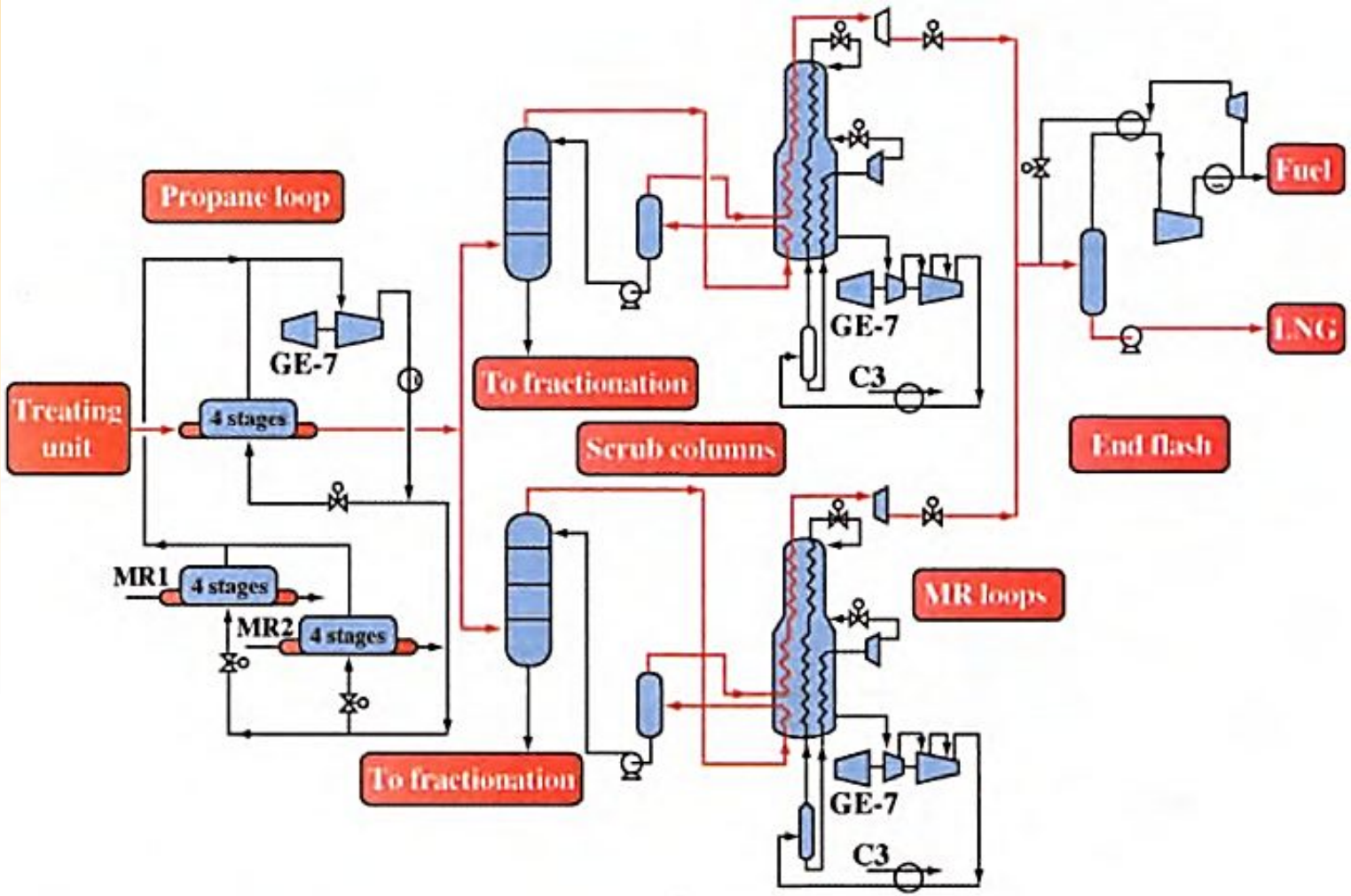


Рис. II-8. Процесс Shell PMR.

Приложение

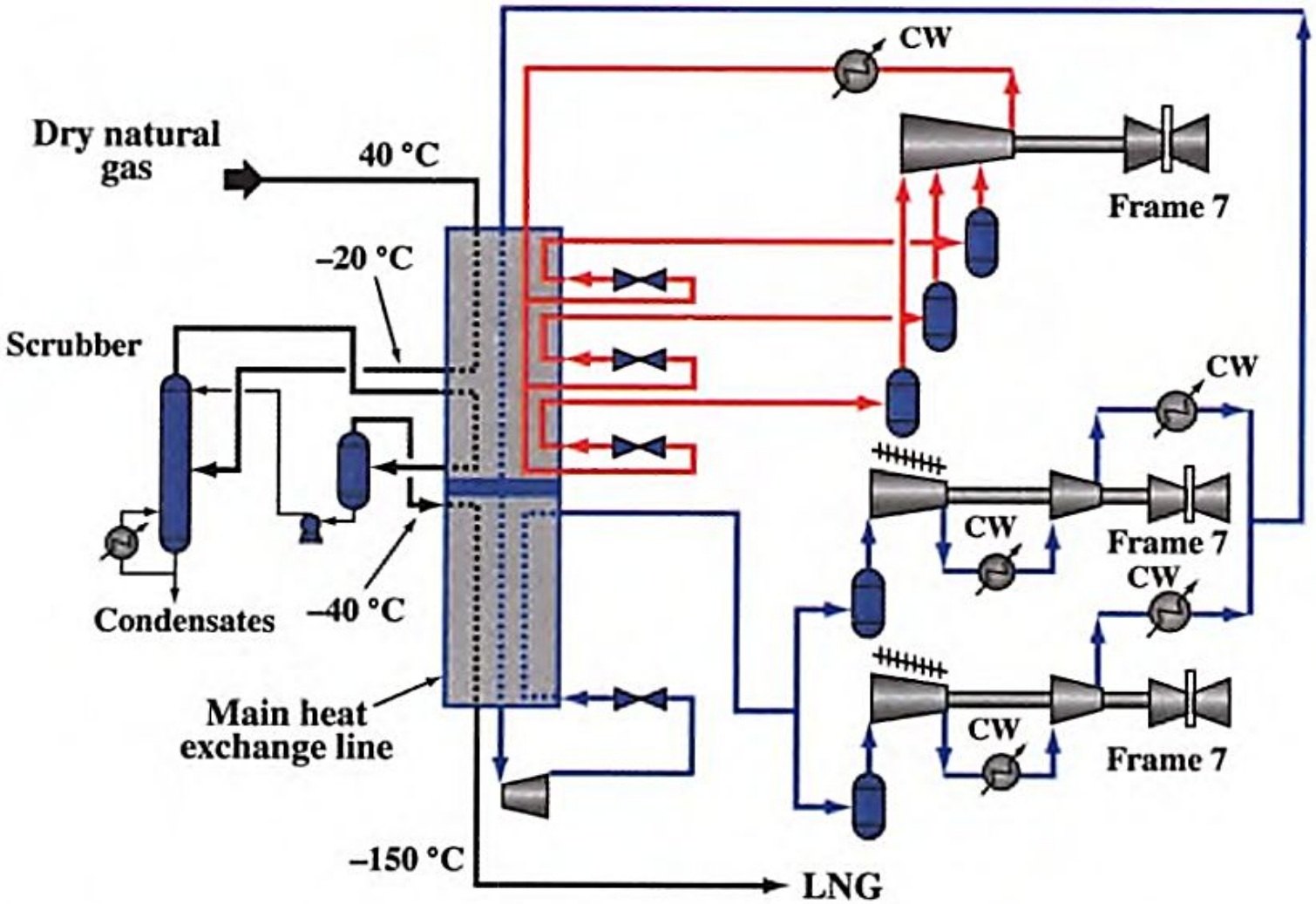


Рис. П-9. Процесс Liquefin.

Спасибо!