

Будущее криогеники. Решение сверхзадач в условиях Низких температур

Кротов Александр Сергеевич
Исполнительный директор инжинирингового центра
«Криогенные технологии в энергетике»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.

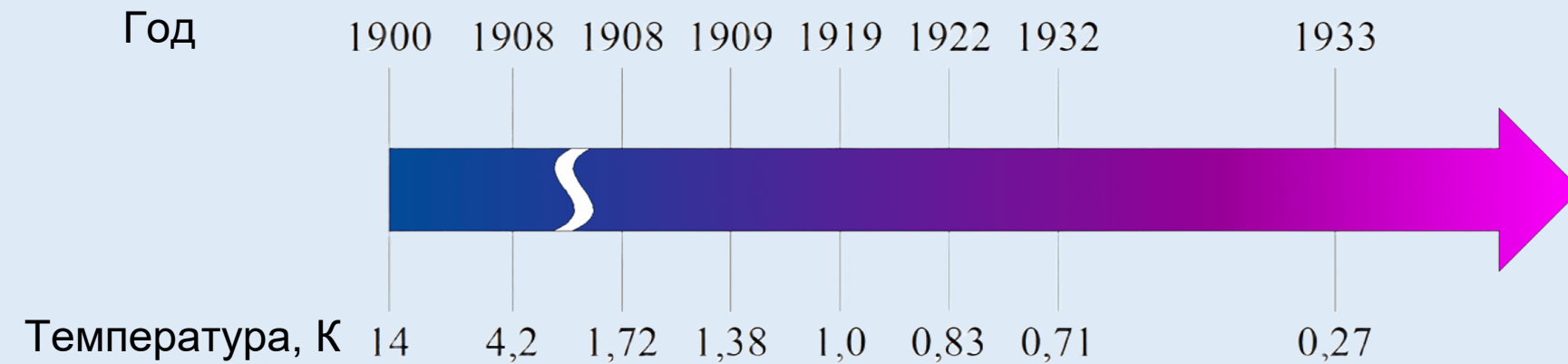
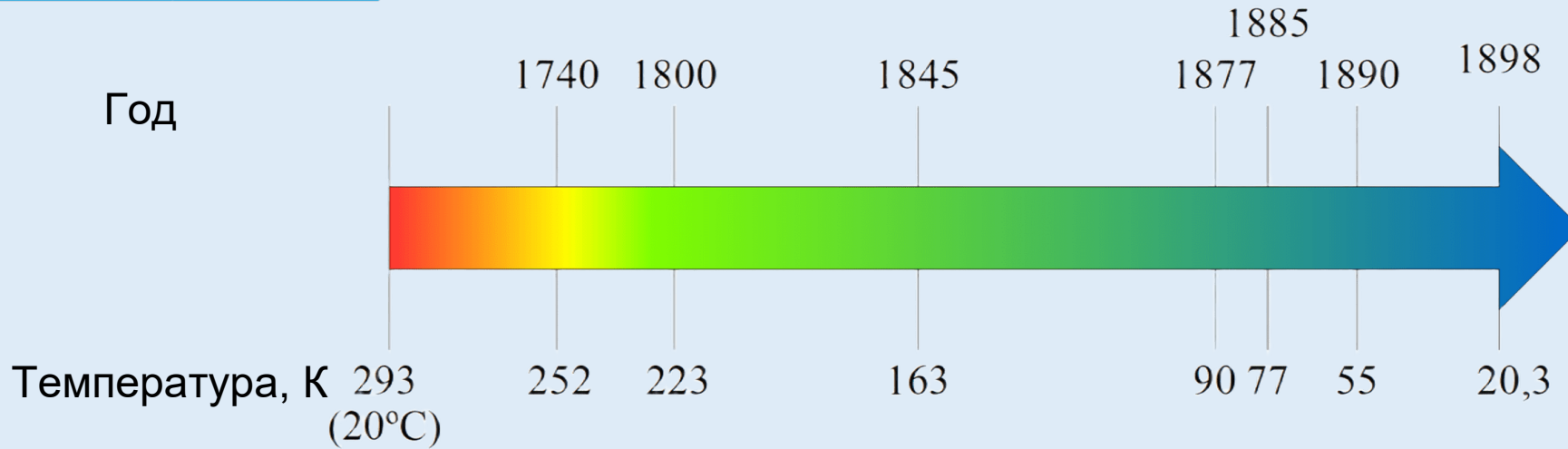


2025
Инженеры
будущего





Хронология получения криогенных температур



Получение сверхнизких температур

- 1935–0,0044 К*
 - 1940..50–0,00114 К*
 - 1954–0,2..0,3 К
 - 1956–0,00002 К*
 - 1963– $1,2 \cdot 10^6$ *
 - 1965–0,025 К
 - 1965–0,018 К
 - н.в. - <0,001 К
- *однократно

II-й закон термодинамики

Теплота не может самопроизвольно переходить от более холодного тела к более теплому

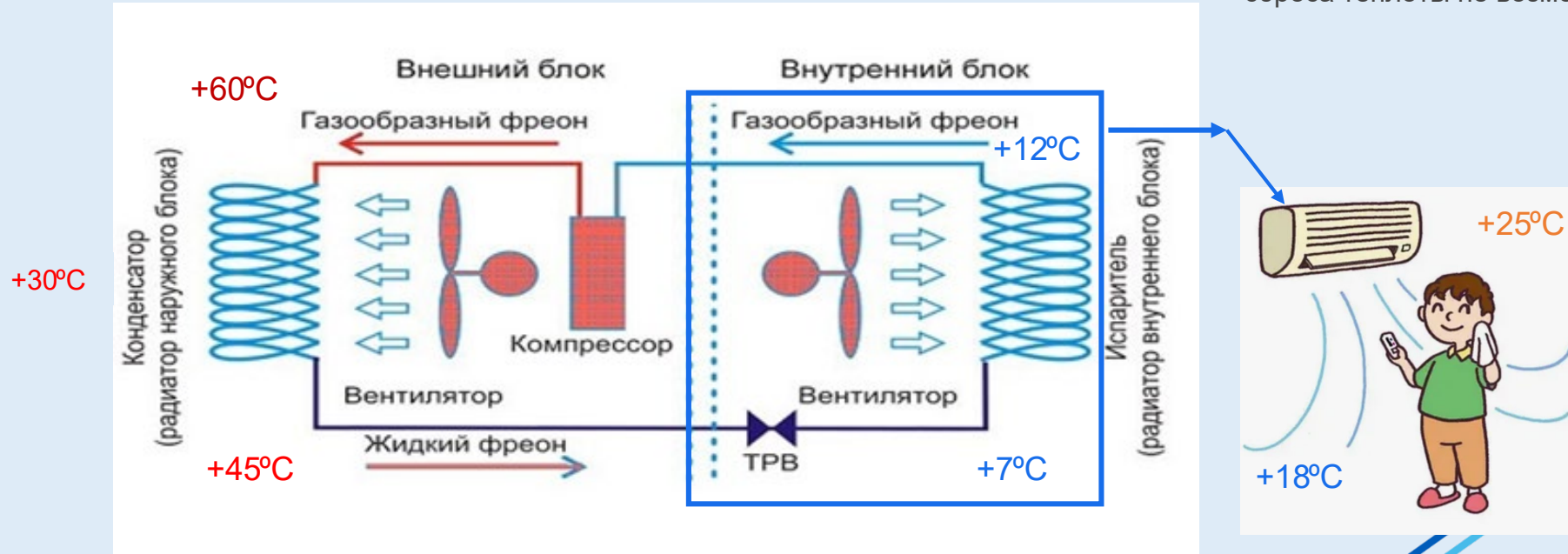
Вечный двигатель не возможен

Нельзя произвести работу без затрат энергии или самопроизвольно преобразовать тепловую энергию в механическую

Чтобы перенести теплоту от более холодного тела к более теплому, необходимо совершить работу

Пример: Чтобы отведенная фреоном теплота (энергия) от объекта охлаждения могла быть сброшена в окружающую среду, необходимо совершить над фреоном работу: повысить давление и, как следствие, температуру.

Температура окружающей среды заведомо выше, чем фреона после получения теплоты от объекта охлаждения. Самопроизвольно процесс сброса теплоты не возможен.



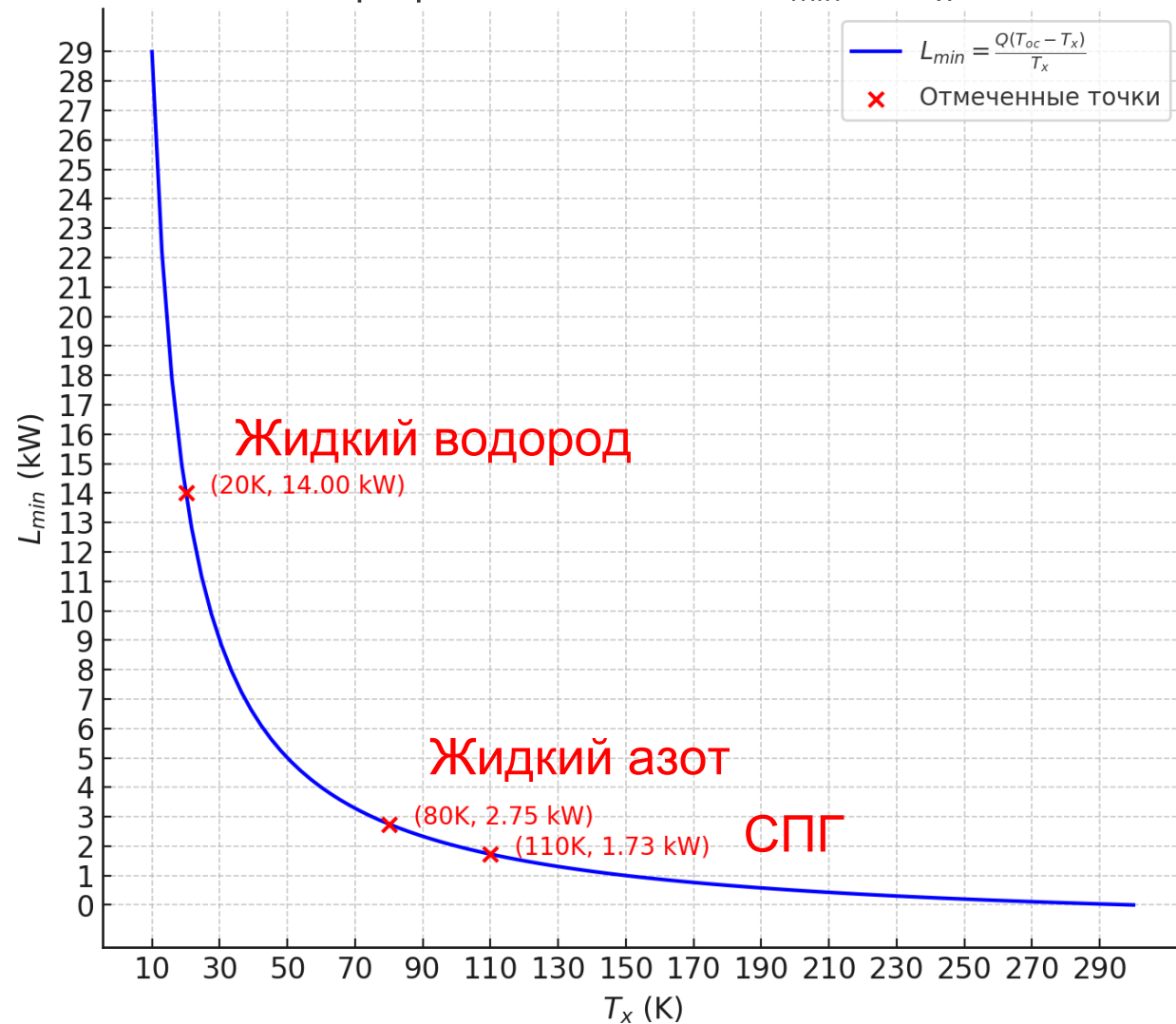


II-й закон термодинамики

$$L_{\min} = Q(T_{\text{oc}} - T_x) / T_x$$

Стоимость холода
увеличивается с понижением
температуры

График зависимости L_{\min} от T_x





Подготовка фракционирование и сжижение природного газа

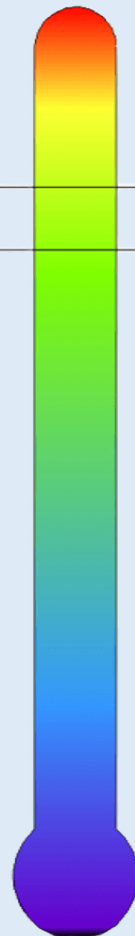


> 120 K

Область криогенных температур

110 K

Сжижение природного газа



Свойства СПГ

СПГ – это природный газ, искусственно сжиженный путем охлаждения до минус 160, для облегчения хранения и транспортировки.

Температура кипения минус 158 ... минус 163 °С.

Доля метана от 75% (Марка В) до 99 % (Марка А),.

СПГ представляет собой бесцветную жидкость без запаха, плотность которой в два раза меньше плотности воды.



Более высокие показатели массовой низшей теплоты сгорания топлива и коэффициент полезного действия энергетического оборудования



Снижение количества вредных выбросов в атмосферу



Меньшая стоимость топлива и экономия на топливных затратах



Увеличение срока службы оборудования вследствие чистоты топлива



Свойства СПГ



КПГ (CNG)

КОМПРИМИРОВАННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

ГАЗООБРАЗНОЕ СОСТОЯНИЕ,
при сжатии объем газа
уменьшается в 200-250 раз



СПГ (LNG)

СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

ЖИДКОЕ СОСТОЯНИЕ,
природный газ сжимается при температуре -161.5° ,
объем газа уменьшается в 600 раз



Преимущества СПГ:

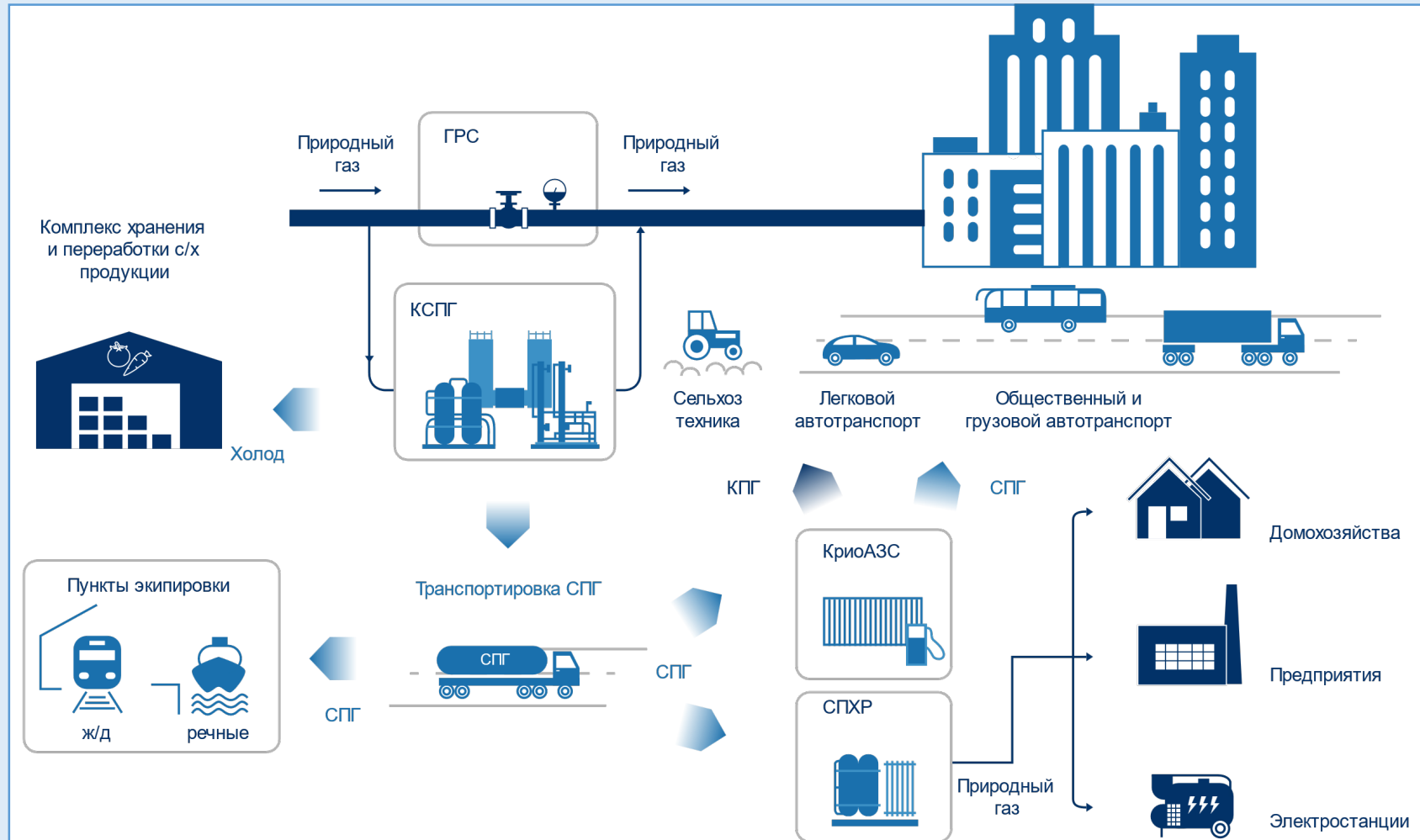
Увеличенная длина пробега транспортных средств (СПГ: 700-1500 км, КПГ: 300-500 км)

- Выше скорость заправки
- Меньшие габариты, масса топливных баков
- Возможность расположения заправочных станций СПГ независящих от газопровода
- Возможность выдачи регазифицированного СПГ для заправки автомобилей на КПГ

Заправочная станция СПГ



Области применения СПГ





Инженеры
будущего

Малотоннажный завод СПГ



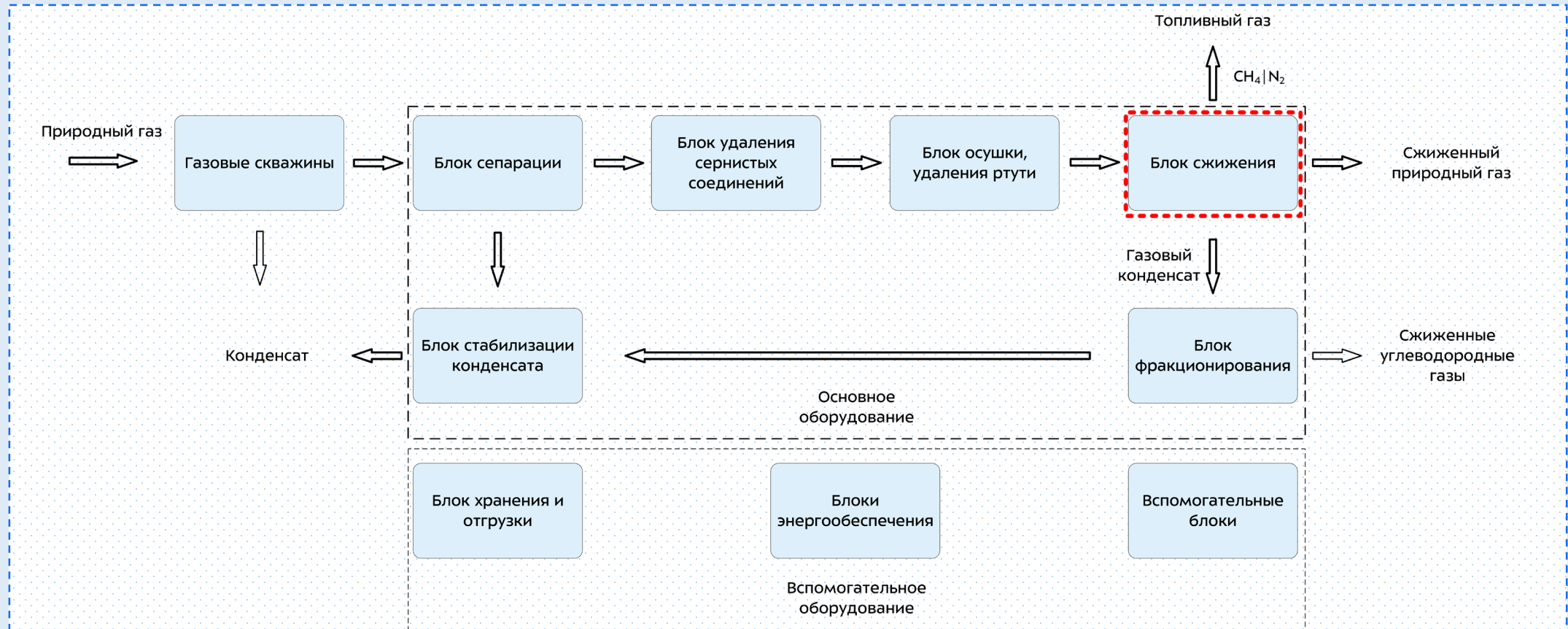
Крупнотоннажный завод СПГ



Арктик СПГ 2



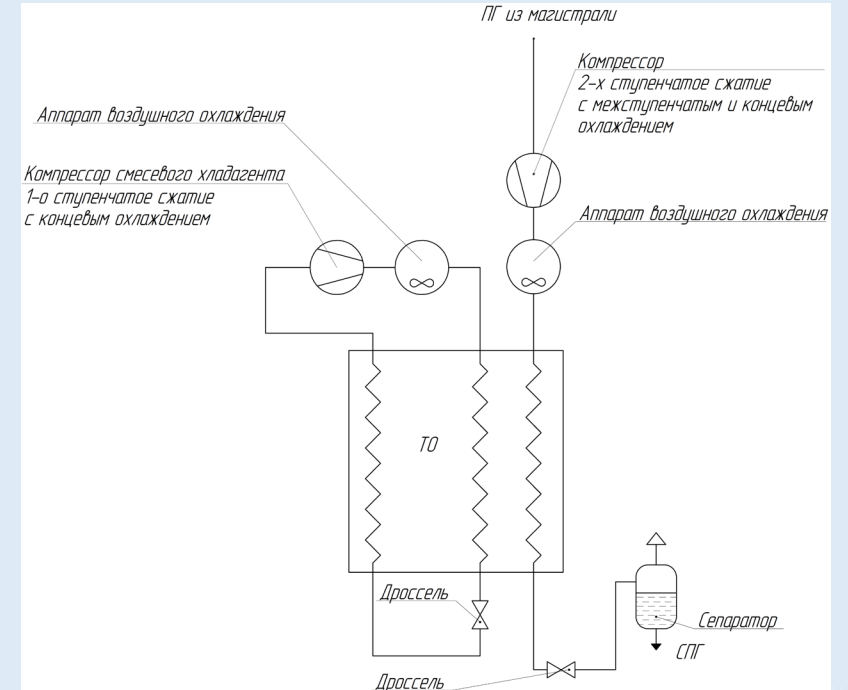
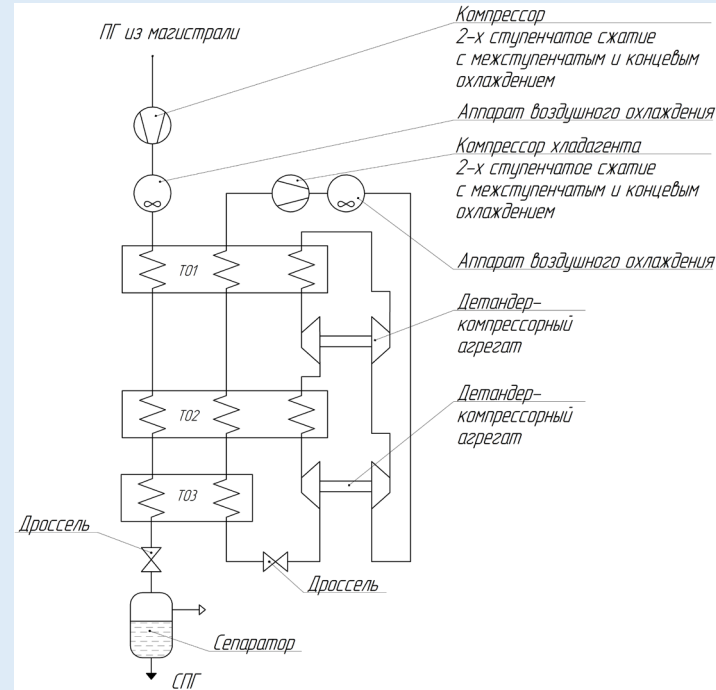
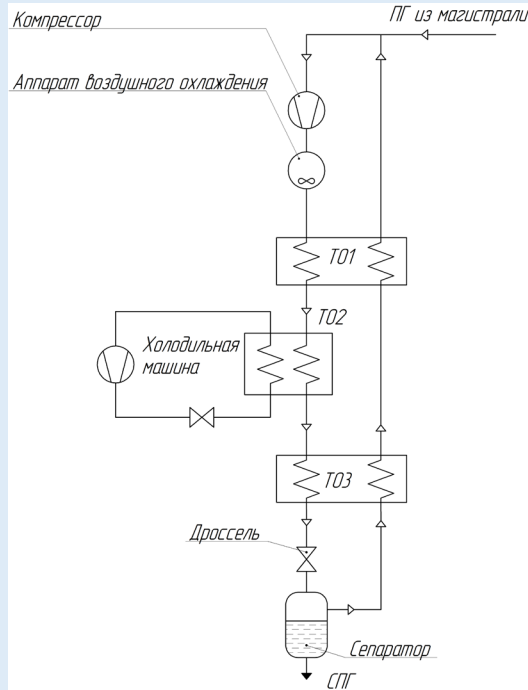
Блок-схема типового комплекса по производству СПГ



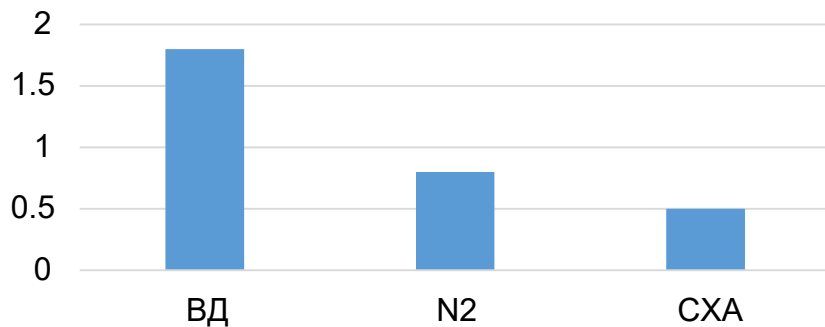
Блок сжижения – основной структурный элемент КСПГ, определяющий его энергоэффективность



Основные технологии производства СПГ



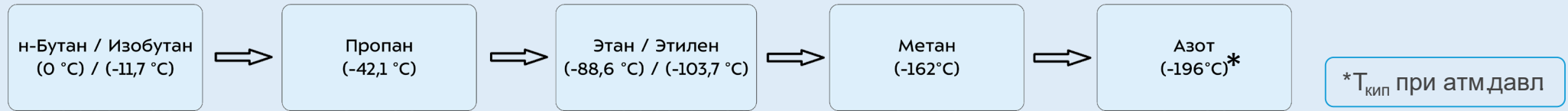
Удельное энергопотребление



Параметр	Значение		
	ВД	N2	СХА
Удельное потребление энергии на подготовку газа и компримирования, кВт·ч/кг	0,7 – 1,5	0,4 – 0,7	0,3 – 0,5
Коэффициент ожижения	0,2 – 0,5	1	1
Удельные относительные капитальные затраты	низк.	средн.	выс.



Как достичь температуры ожижения ПГ? Смесевые хладагенты



Смесевой хладагент – смесь углеводородов и азота (те же компоненты, что содержатся в природном газе, но смешанные в другой пропорции)

Типовые рабочие режимы:

Контур СХА:

- Давление нагнетания: 230 бар;
- Давление всасывания: 2 бар

Преимущества:

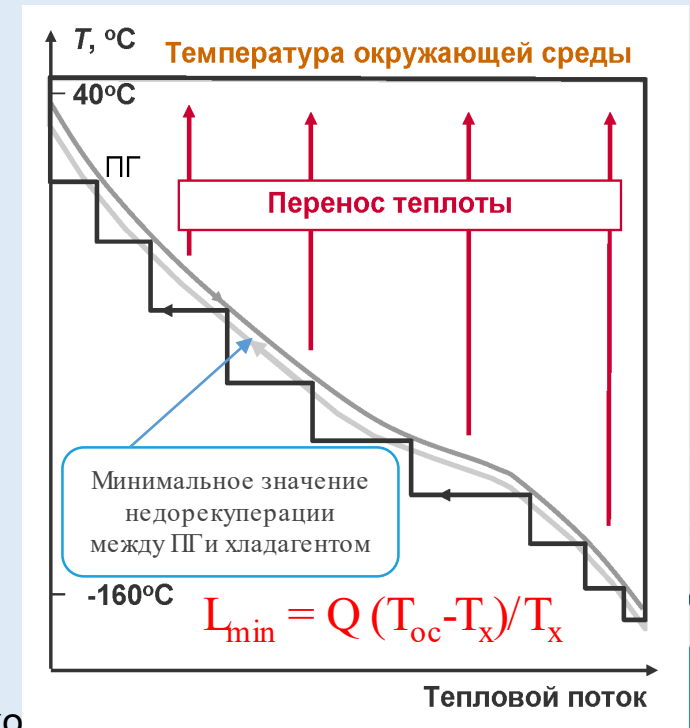
- Низкие рабочие давления
- Доступность оборудования

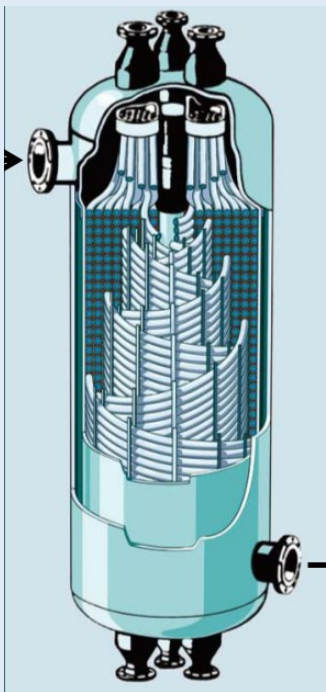
Недостатки:

- Значительные габариты теплообменных аппаратов (расход СХА в ~ 5 раз больше расхода ПГ)
- Сложность процессов конструирования оборудования, контроля процесса работы

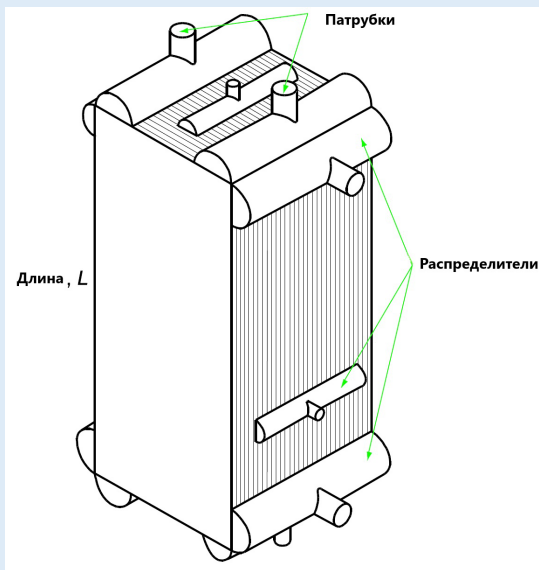
Контур ПГ:

- Давление ПГ: 300 бар;
- Давление СПГ в блоке хранения 4 бар





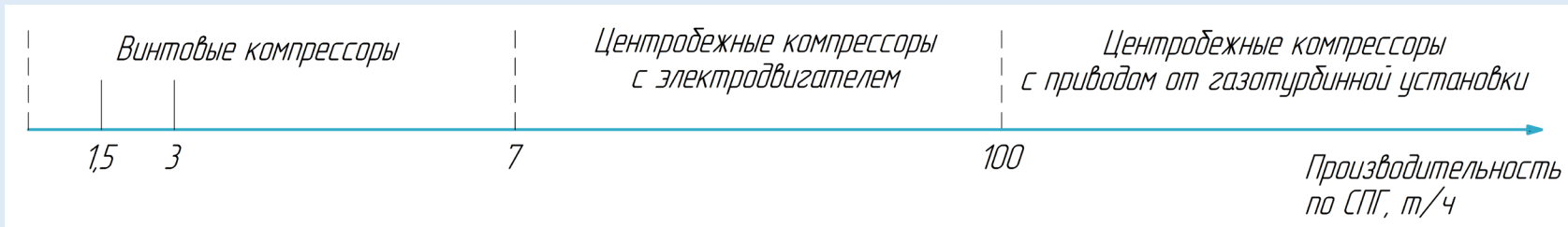
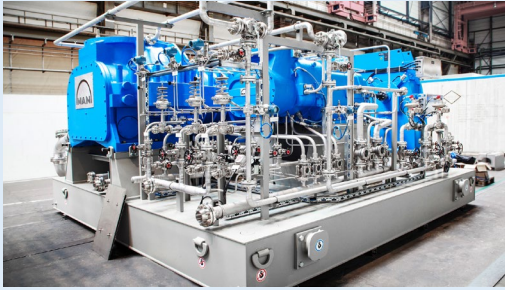
Спиральновитые



Пластинчатеребристые



Практическая реализация технологии СХА. Компрессоры



Уплотнение вала компрессора — основная точка возможной утечки СХА, следовательно нужен блок хранения и заправки хладагента

Минимальные утечки может обеспечить винтовой компрессор



- Оборудование любой линии производства СПГ обязательно включает в себя компрессорные блоки хладагента
- Выбор типа компрессорного агрегата зависит от расхода и перепада давлений рабочей среды
- Соотношение расходов природного газа и смесового хладагента составляет 1/51/10



Доступность технологического оборудования СХА

Блок/Тип оборудования		Россия (собственное изготовление)		
		Малотоннажное	Среднетоннажное	Крупнотоннажное
Производство				
Блок замера газа		+	+	+
Блок очистки газа		+	+	-
Блок осушки газа		+	+	+
Теплообменное оборудование	ПРТ	-	-	-
	Витые ТОА	+	+	+
Компрессорное оборудование	Поршневые КМ	+	+	-
	Винтовые КМ с Э/Д	+	Не исп.	Не исп.
	Центробежные КМ с Э/Д	+	+	+/-
	Центробежные КМ с приводом ГТУ	Не исп.	+	-
Ёмкостное оборудование		+	+	+
Аналитическое оборудование		+	+	+

Оборудование для всей линейки

производительностей установок СПГ на СХА доступно в РФ

Для реализации оборудования необходим инжиниринг

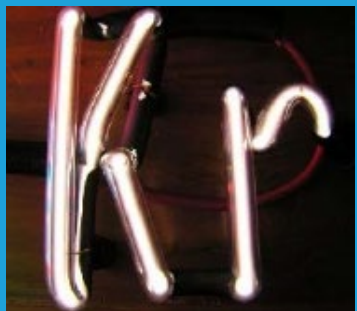
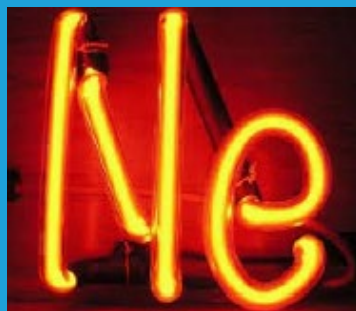
Степень локализации можно повышать по мере реализации проектов



Разделение воздуха, ВТСП, криоконсервация



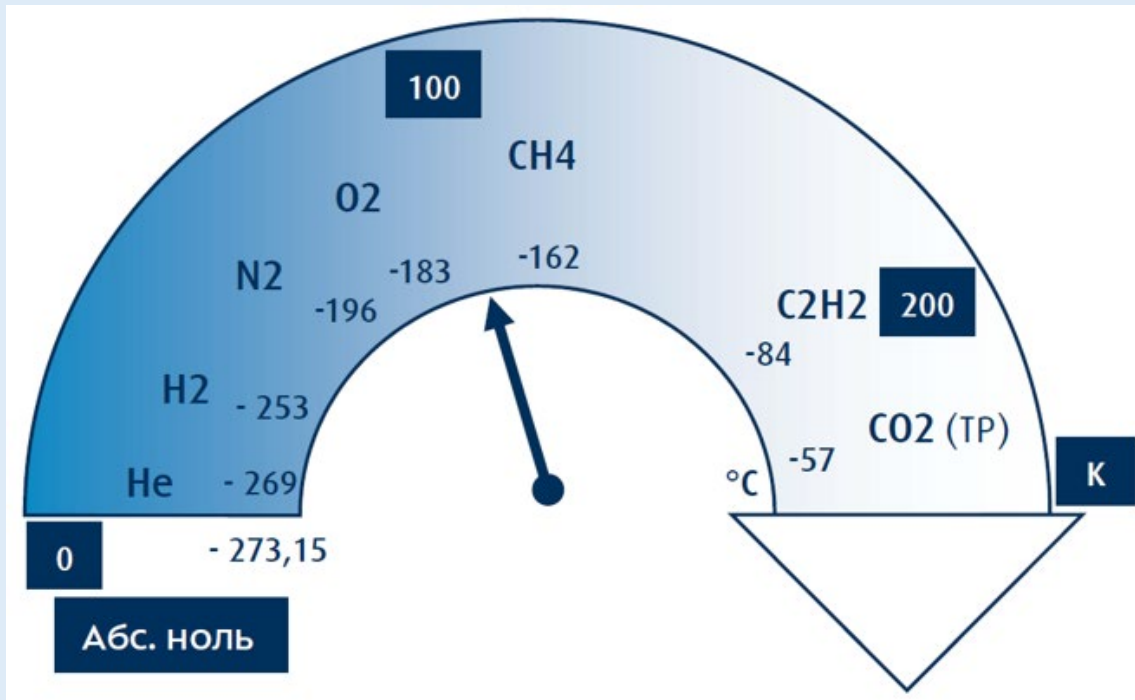
Инертные газы



Состав воздуха



Применение компонентов воздуха и их температура ожидения



Кислород: дыхательные смеси, защитный газ (сварка), ракетное топливо, упаковочный газ, окислитель

Азот: продувка систем, упаковочный газ, нефтехмия средство пожаротушения

Гелий: защитный газ (сварка), производство электрических чипов, опрессовка и продувка систем, рабочее вещество криокулеров

Неон: лазеры, рабочее вещество криокулеров, плазменные экраны, фолитография (изготовление схем с нормами менее 180 нм)

Аргон: защитный газ (сварка), дыхательный газ (дайвинг), лазеры, огнетушащее средство

Криптон: лазеры, изоляционный газ

Ксенон: освещение, плазменные экраны, лазеры, производство чипов, двигатели спутников

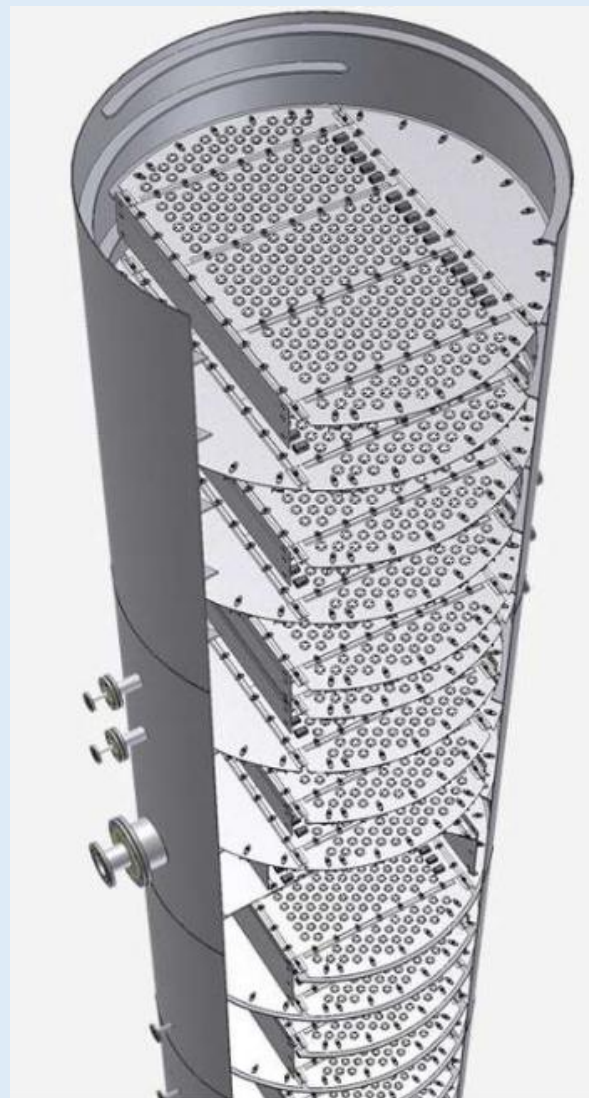
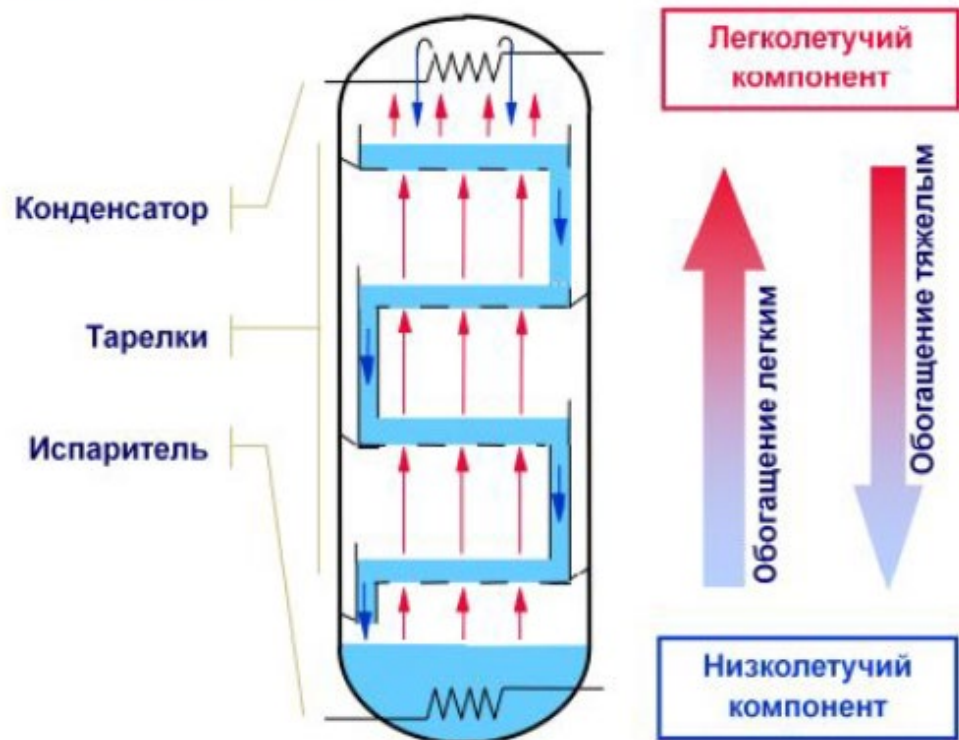
ВРУ. ТЕХНОЛОГИИ, ПРОЦЕСС МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

	РЕКТИФИКАЦИЯ	АДСОРБЦИЯ	МЕМБРАНЫ
Компани-основатели	 	 	   
Оборудование	Криогенные блоки	PSA, VSA (цеолиты)	Мембраны (полые волокна)
Чистота	O ₂ : 85%-99.9% N ₂ : ... 10ppb Ar, Kr, Xe	O ₂ : 90%-93% N ₂ : ... 99.9%	N ₂ : 95%-99.9%
Производительность	100 т/д - 3000 т/д	5 т/д - 150 т/д	<5 т/д при 99.9% <80 т/д при 95%
Преимущества	<ul style="list-style-type: none"> • Крупные установки • Эффективность • Источник жидкости 	<ul style="list-style-type: none"> • Малые затраты • Быстрый запуск 	<ul style="list-style-type: none"> • Малые затраты • Простота



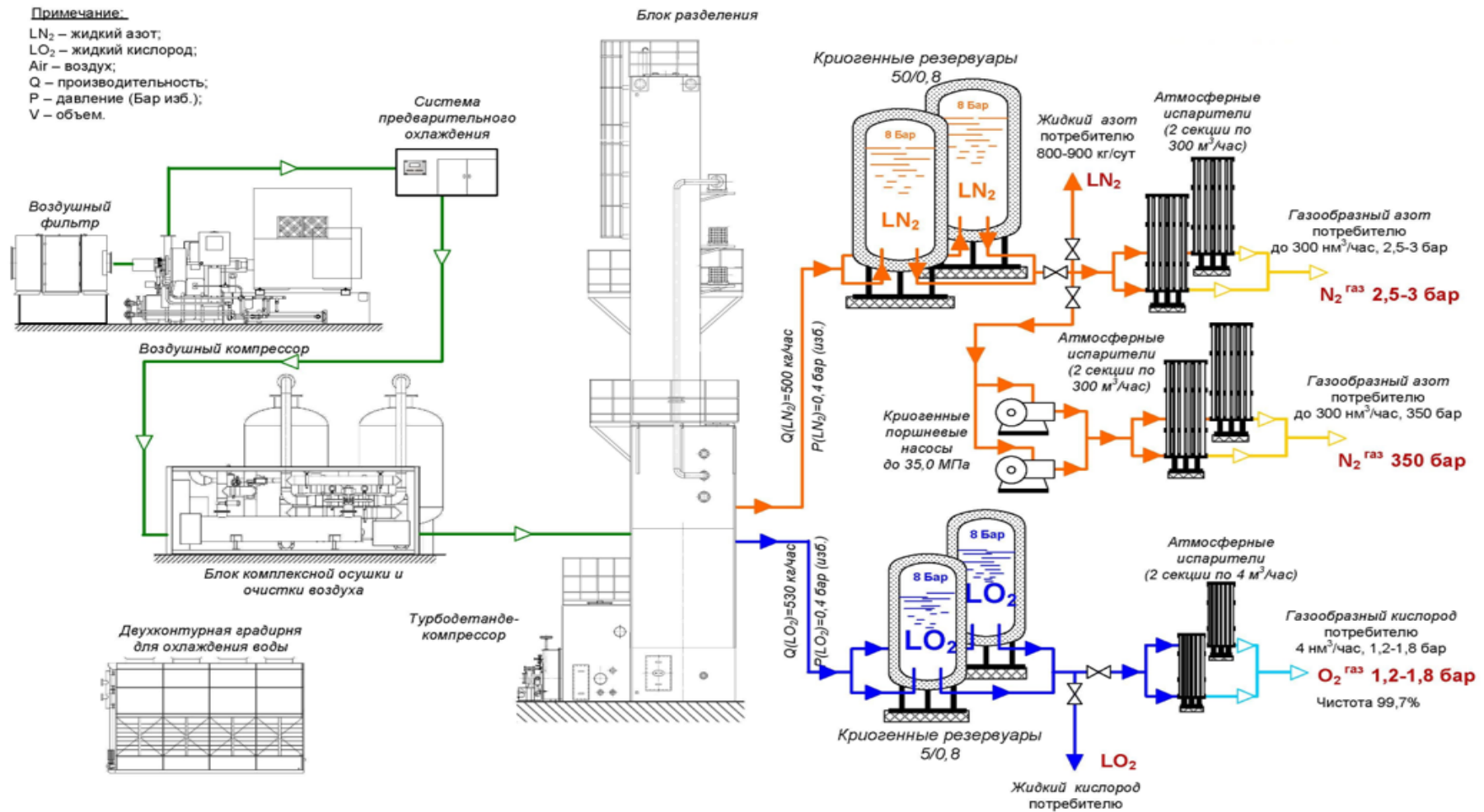
Работа ректификационной колонны

СХЕМА КОЛОННЫ





Принципиальная технологическая схема ВРУ





Внешний вид ВРУ





Хранение жидкого аргона



Транспортная емкость
ж. кислорода



Разгрузка грузовика с ж. азотом

Кислород

- Металлургия
- Ракетное топливо
- Аппараты ИВЛ

Азот

- Криомедицина
- Хранение биоматериалов
- Инертная среда

Аргон

- Защитная инертная среда;
- Обработка металлов;
- Плазменная сварка и резка;

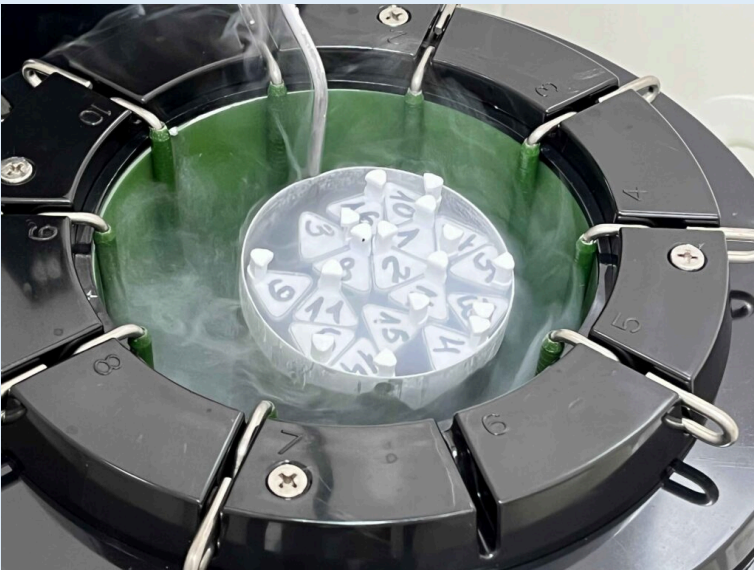
Неон

- Светотехника лазеры
- Ракетное топливо
- Электротехника

Гелий

- Производство полупроводников
- Детекторы частиц
- Хроматография
- Наполнение воздушных шаров

Криоконсервация — процесс низкотемпературного сохранения живых биологических объектов длительное время, что предполагает возможность размораживания и восстановления его биологических функций. Материал хранится в специальных ёмкостях — сосудах Дьюара, под слоем азота, в жидкой форме — при 196°C .

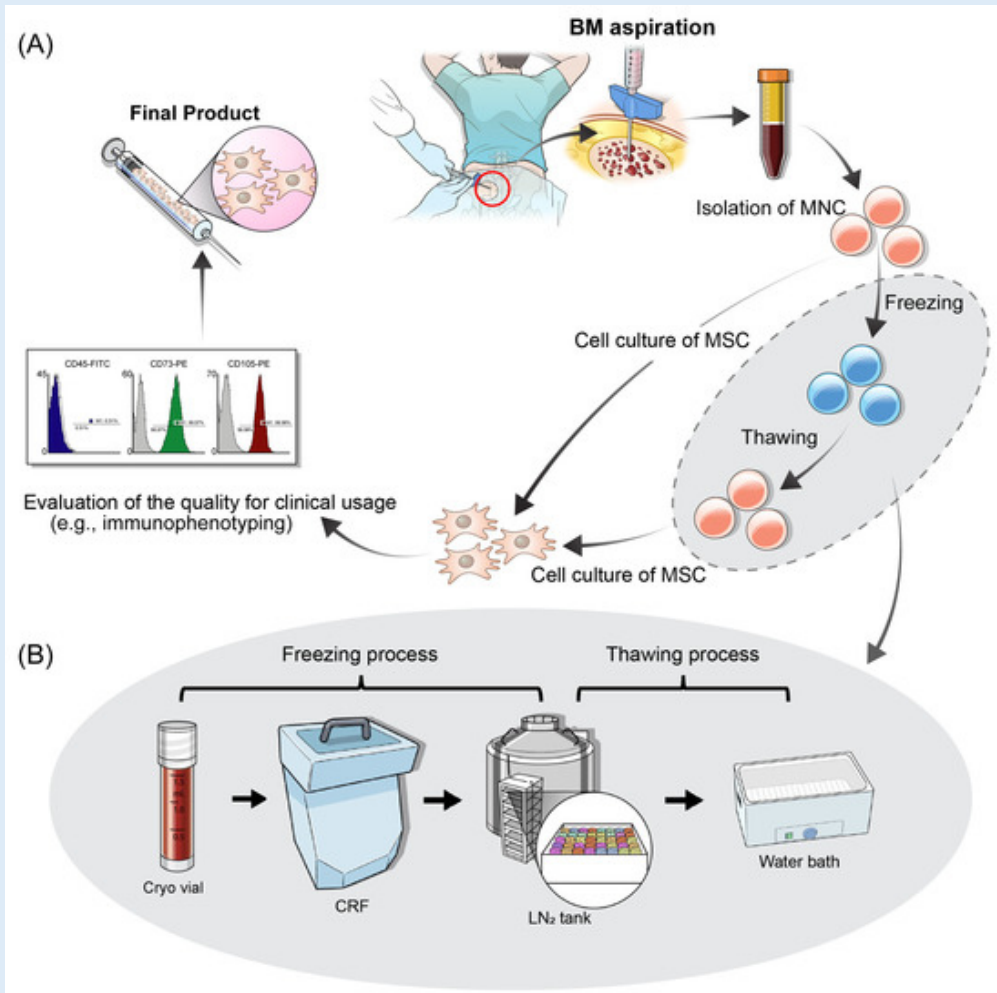


Области применения:

- Сохранение биологического материала
- Замораживание клеточных культур, бактерий, вирусов и других образцов для экспериментов
- Поддержание микробных культур в фармацевтических и пищевых производствах
- Сохранение генетического материала исчезающих видов растений и животных (генетические банки)

Заморозка стволовых клеток при трансплантации костного мозга или при лечении онкологических заболеваний, особенно лейкозов, лимфом и множественной миеломы позволяет сохранить жизнеспособные клетки до их пересадки пациенту после высокодозной химиотерапии или облучения.

1. Сбор клеток из крови или костного мозга.
2. Добавление криопротектора, чтобы предотвратить повреждение клеток льдом.
3. Постепенное охлаждение в специальных устройствах до -80°C .
4. Перемещение в жидкий азот для длительного хранения.



Криотерапия



Общая криотерапия– интенсивное охлаждение большей части поверхности тела человека, характерной длительностью от 3 до 6 минут.

Криотерапия вызывает адаптационную реакцию организма (коррекцию гомеостаза, стимуляцию иммунитета, тренировку системы терморегуляции).

Данный метод не имеет серьезных ограничений по уровню здоровья, не вызывает простудных заболеваний и не требует дополнительной подготовки.

Прототип серийной установки, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана

- 4 степени свободы регулирования (температура, расход, направляющие струи газа, длительность)
- Зональное регулирование (торс, конечности)
- Бесконтактный контроль температуры кожи



Криотерапия



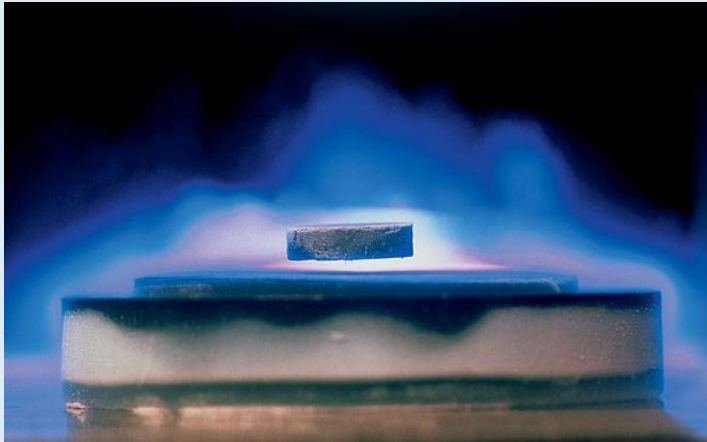
Локальная криотерапия – местное воздействие низкими температурами на организм человека.

Основной областью применения локальной криотерапии является реабилитация после операций и травм костей, мягких тканей, а также лечение заболеваний костно-мышечной системы, включая остеоартрит, воспаления суставов

Макетный образец, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана

- Проведены испытания локальной криотерапии
- Доказана работоспособность установки
- Ведутся работы по созданию серийного образца

Высокотемпературные сверхпроводники

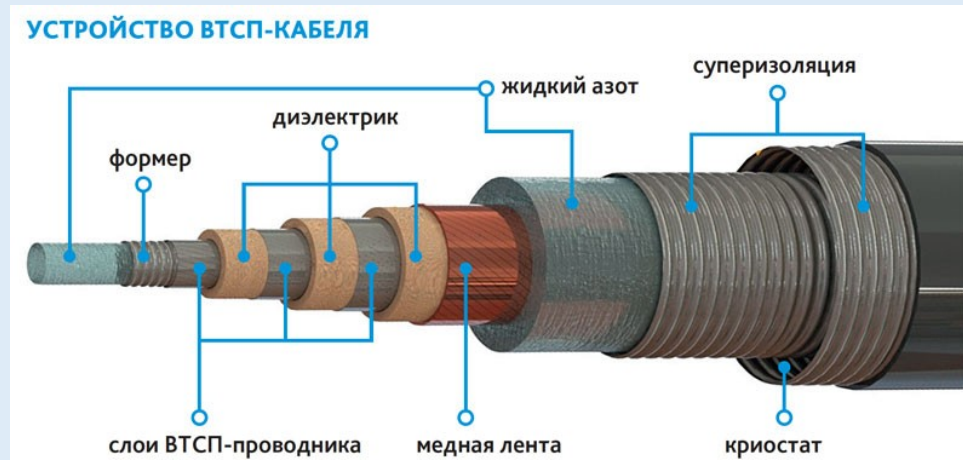


Сверхпроводимость - утрата материалом электрического сопротивления при охлаждении ниже характерной для данного материала критической температуры.

Границей высокотемпературной сверхпроводимости принимается температура 30К, однако, существуют сверхпроводники работающие на температурном уровне жидкого азота (77К).

С понижением температуры ВТСП увеличиваются максимально допустимые поле и токи, которые он может передавать.

Ведутся исследования в области применения ВТСП материалов для проводов, электрических машин (двигателей и генераторов) и транспорта.





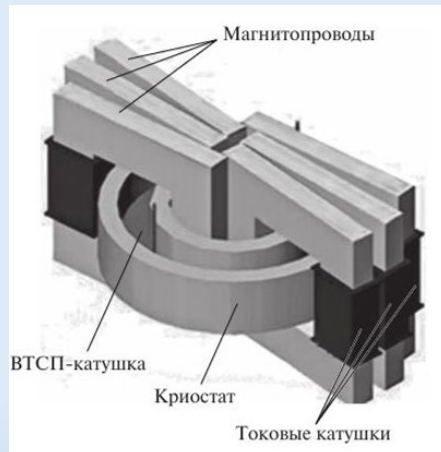
Области применения ВТСП



В Санкт-Петербурге планируется установка сверхпроводящей линии постоянного тока мощностью 50 МВт протяженностью 2,5 км, что сделает ее самой длинной ВТСП линией в мире



В 2021 году в Новосибирске стартовал этап наземных отработок самолета-летающей лаборатории с демонстратором гибридной силовой установки, ВТСП электродвигателем мощностью 500 кВт.



В России были разработаны токоограничители, основанные на эффекте ВТСП.

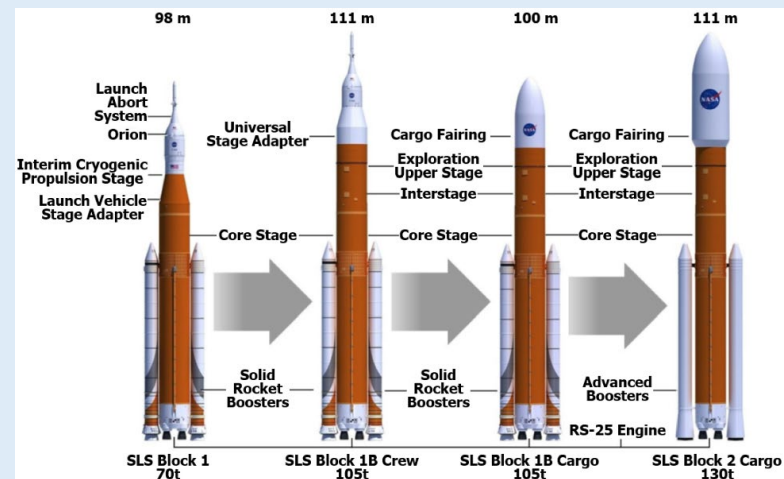


Области применения криогенных температур



>120 К

Область криогенных температур



20 К

Получение жидкого водорода
Охлаждение ВТСП
Ракетное топливо

Применение водорода



Электробус водородной ЛиАЗ
62744H2. 2021 г.



Энергетическая платформа
Урал 7513H2. 2023 г.



Экспериментальный самолет ТУ155, СССР, 1988 г.



Карьерный самосвал БелАЗ
7513H2. 2023 г.



Электросудно Sitronics Group,
2023 г.



БПЛА на водороде ФИЦ
ПХФ и МХ РАН, 2023 г.

Способы транспортировки водорода



	Трейлер газообразного водорода	Трейлер сжиженного водорода	Газовый трубопровод	Аммиак (хранение в связанном виде)	Танкер сжиженного водорода
Кап. затраты	Низкий	Средний	Высокий	Высокий	Средний
Экспл. затраты	Высокий	Средний	Низкий	Высокий	Средний
Стоимость транспортировки на 1 кг	Высокий	Низкий	Низкий	Низкий	Средний
Расстояния	160 км	800 км	1600 км	>1600 км	>1600 км
Возможный масштаб	1..10 т/сутки	10..500 т/сутки	100+ т/сутки	100+ т/сутки	100+ т/сутки

Процесс ожижения H_2 энергозатратен от 25 до 45% энергии сжижаемого H_2 расходуется на процесс сжижения.

Контроль соотношения орто- и пара водорода.

На крупных установках эффективность может быть повышена:

1. Использование СХА или LN для предварительного охлаждения
2. Высокоэффективные компрессоры и турбомашины
3. Улучшенная теплоизоляция криогенного блока
4. Более эффективные теплообменники и конвертеры

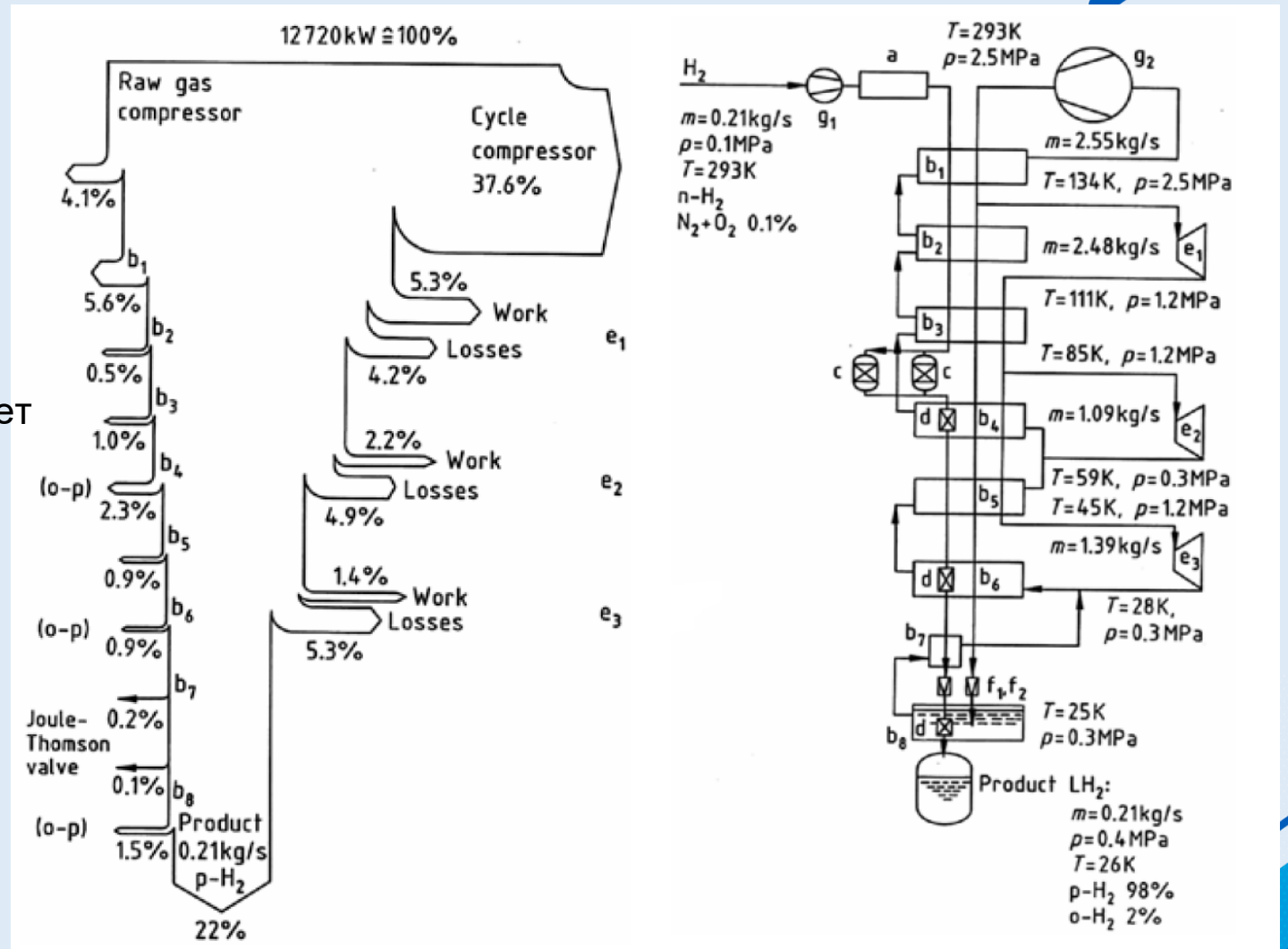


Диаграмма Санкей для
ожижительного цикла Линде

Ожижение водорода. Крупнотоннажные установки

Предв. охлаждение

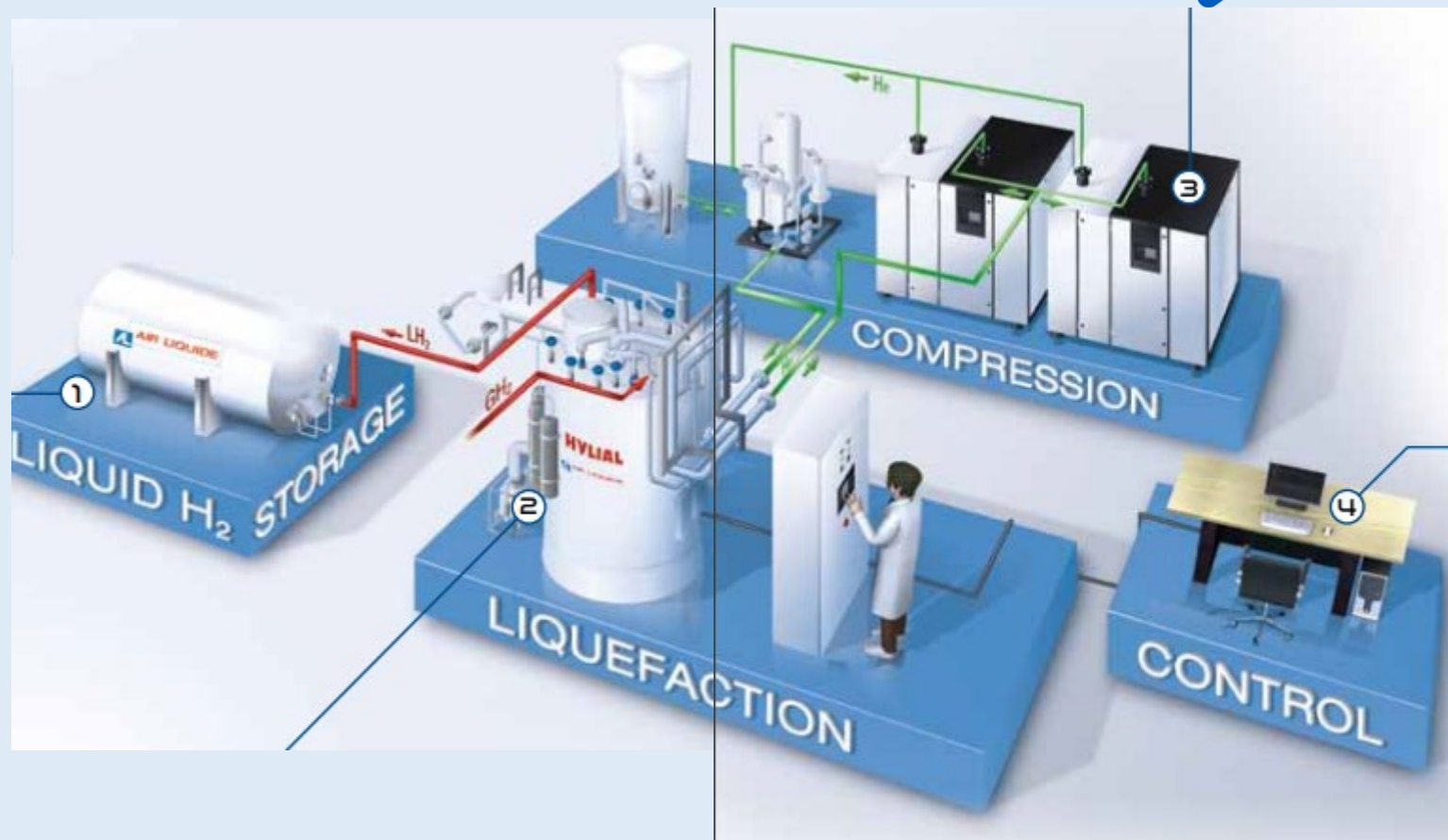
- 1 Азотные компрессора
 - 2 Блок предв. охлаждения
 - 3 Азотные детандеры
 - 4 Колдброк с перлитом
- ### Ожижение
- 5 Вакуумный колдброк
 - 6 Водородные детандеры
 - 7 Компрессора водородного контура охлаждения



Ожижение водорода. Малотоннажные установки



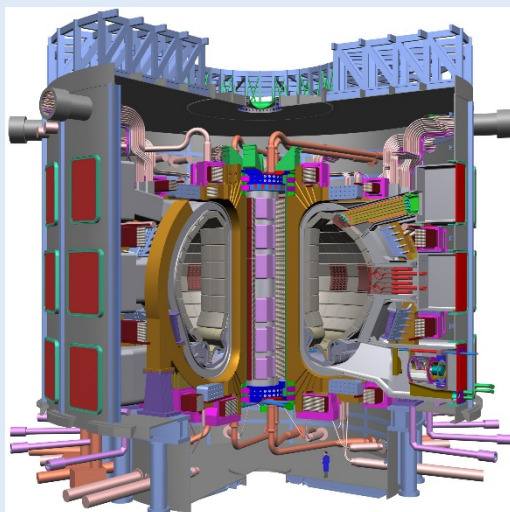
Ожижитель водорода Linde на гелиевом внешнем цикле производительностью 20 кг/ч



Ожижитель водорода HYLIAL (Air Liquide) производительностью от 40 до 100 кг/час



Области применения криогенных температур



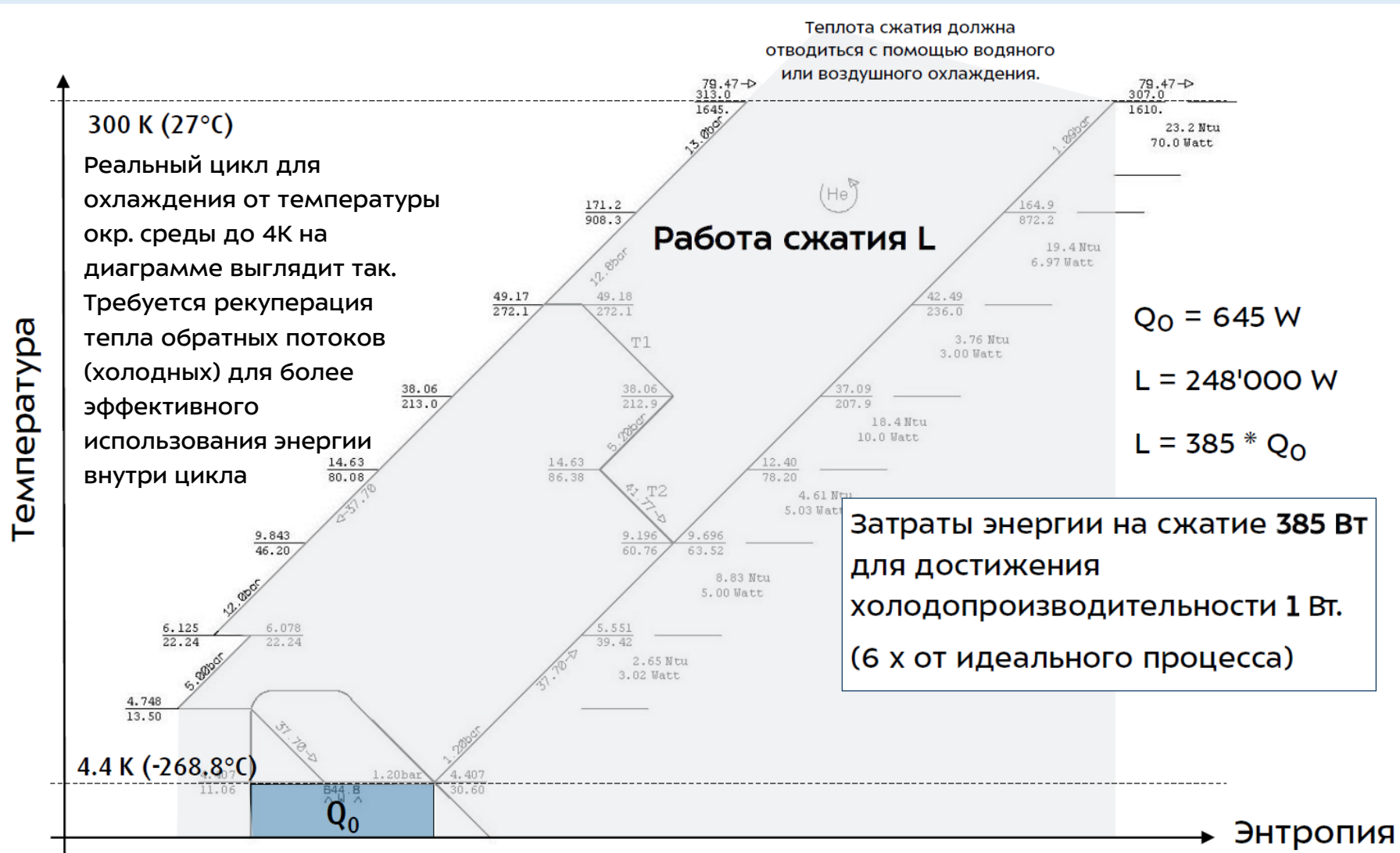
>120 К

Область криогенных температур



4 К

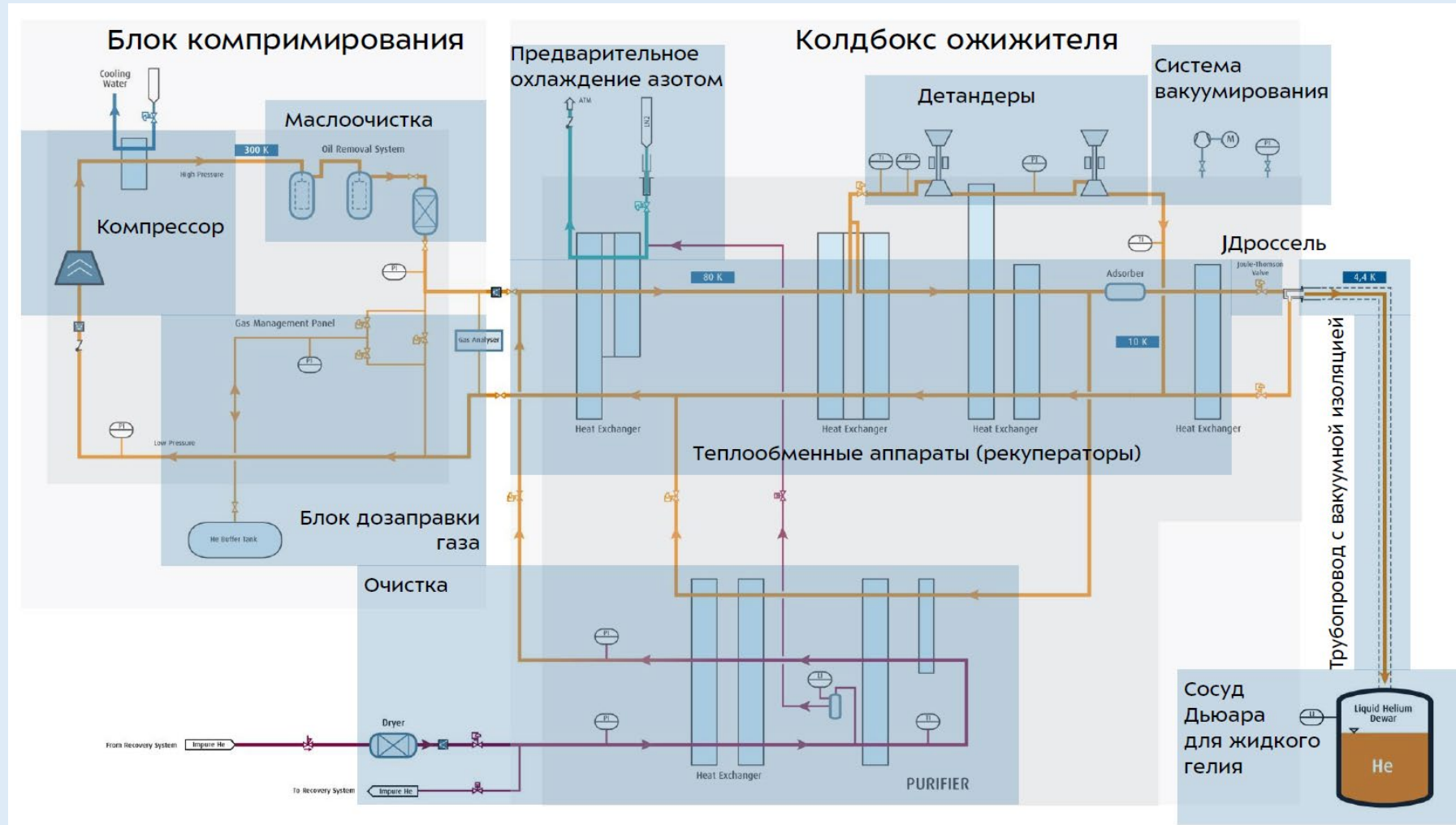
Получение ж. гелия
Охлаждение низкотемпературных сверхпроводников





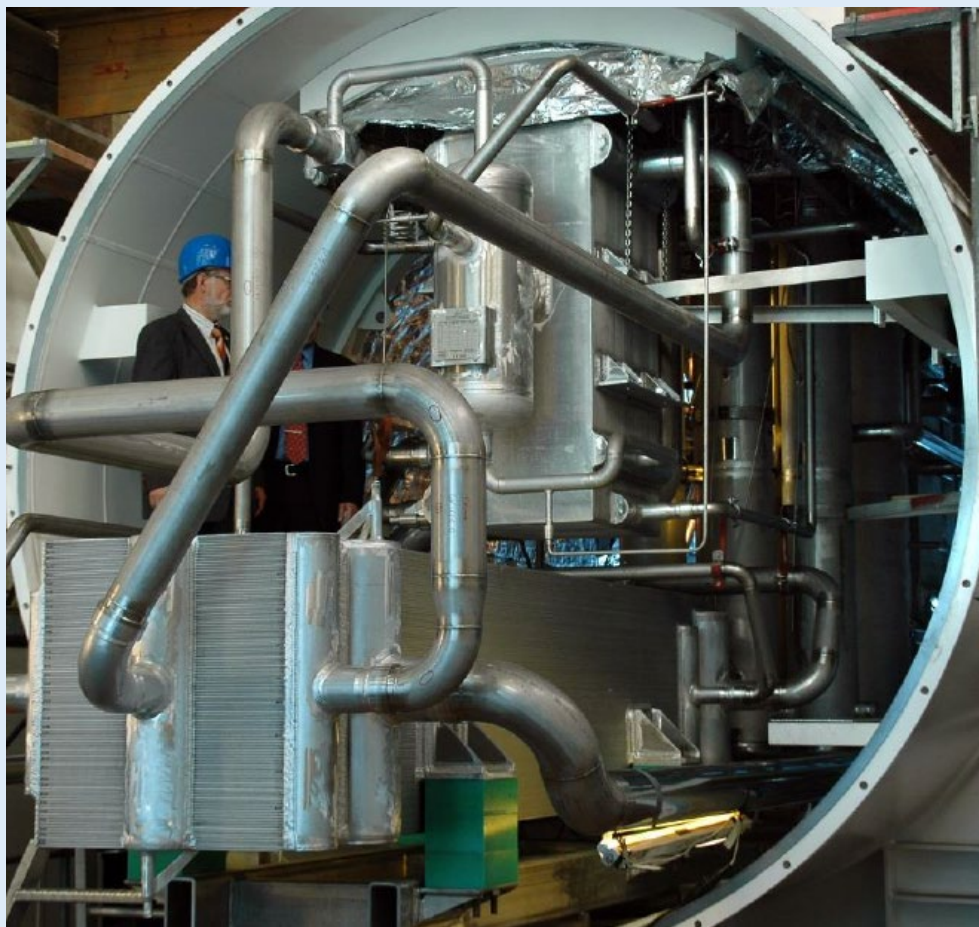
Ожижение гелия с азотным предварительным охлаждением

Газообразный гелий охлаждается обратными холодными потоками. Часть потока охлаждается и накапливается в теплоизолированном сосуде: Дьюаре.





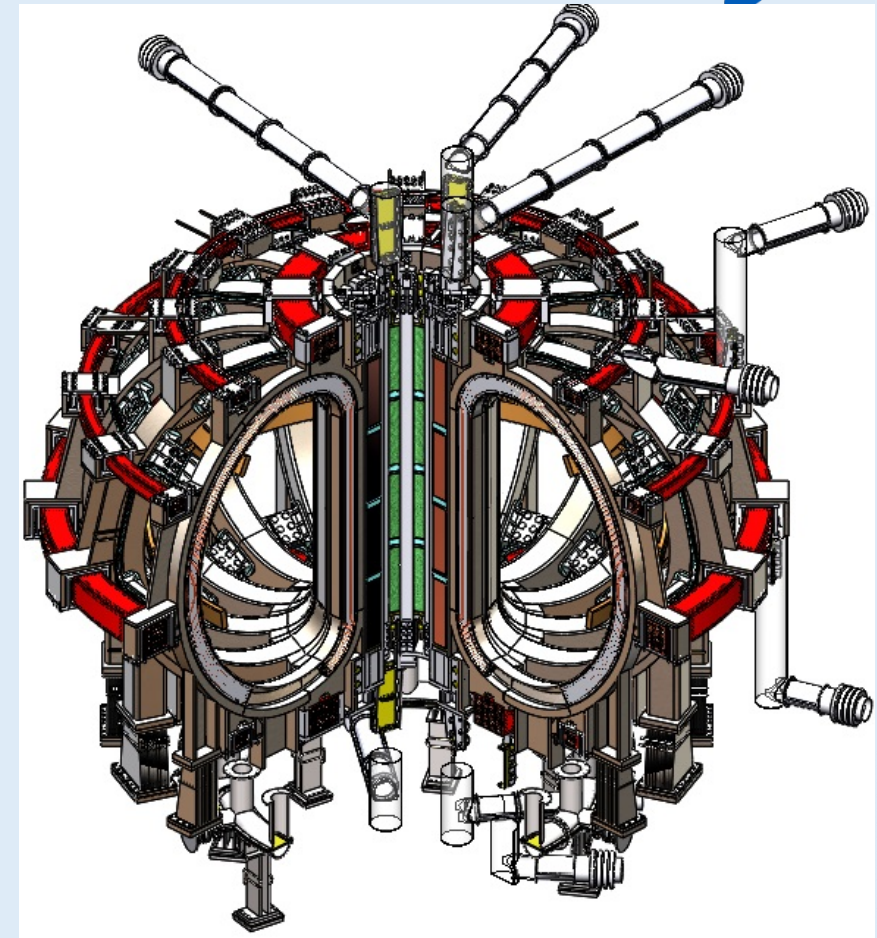
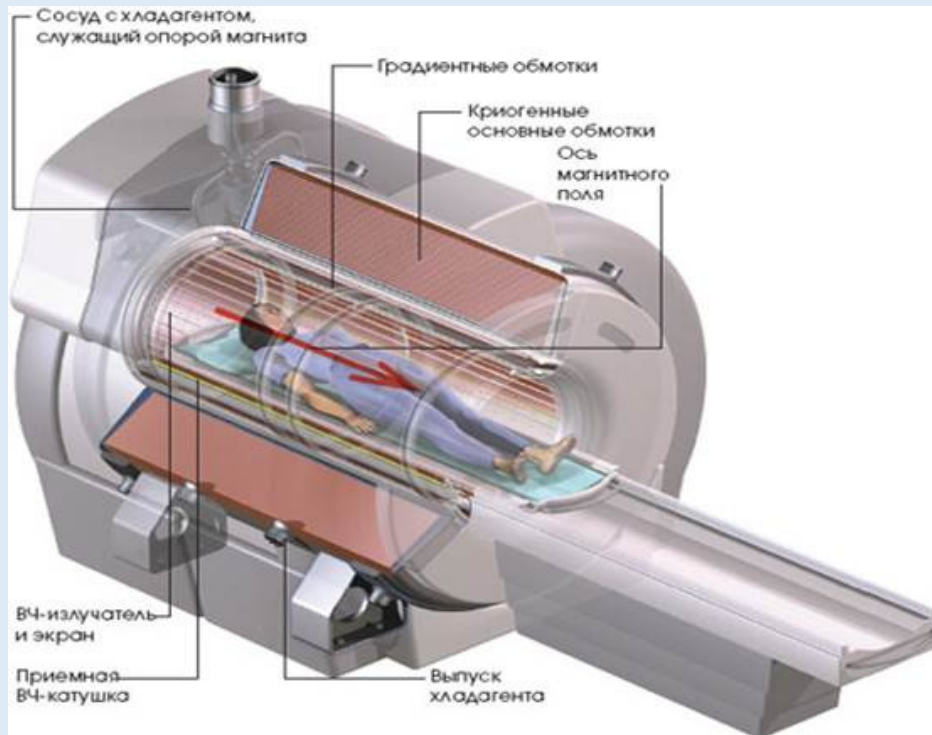
Оборудование: Колдбокс





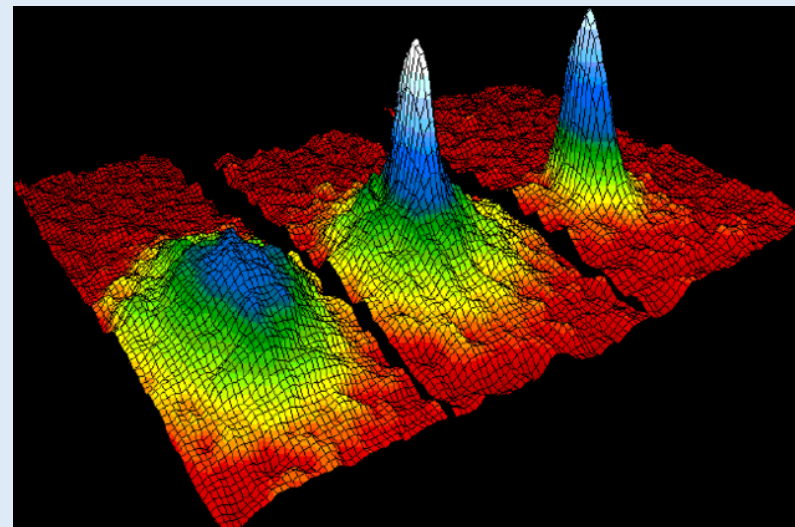
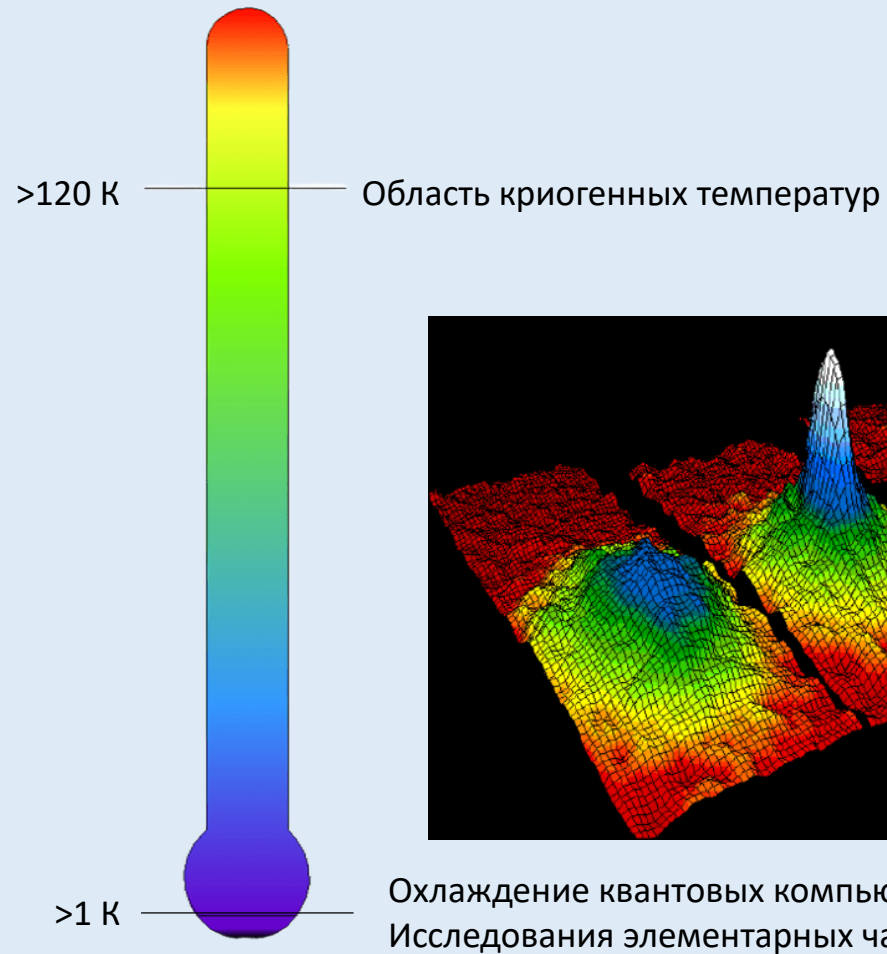
Применение жидкого гелия

- ✓ Ускорители частиц
- ✓ Термоядерный синтез
- ✓ Сверхпроводники
- ✓ Магнитно-резонансная томография
- ✓ Транспортировка гелия в сжиженном виде



Токамак ТРП с магнитными катушками, охлаждаемыми жидким гелием

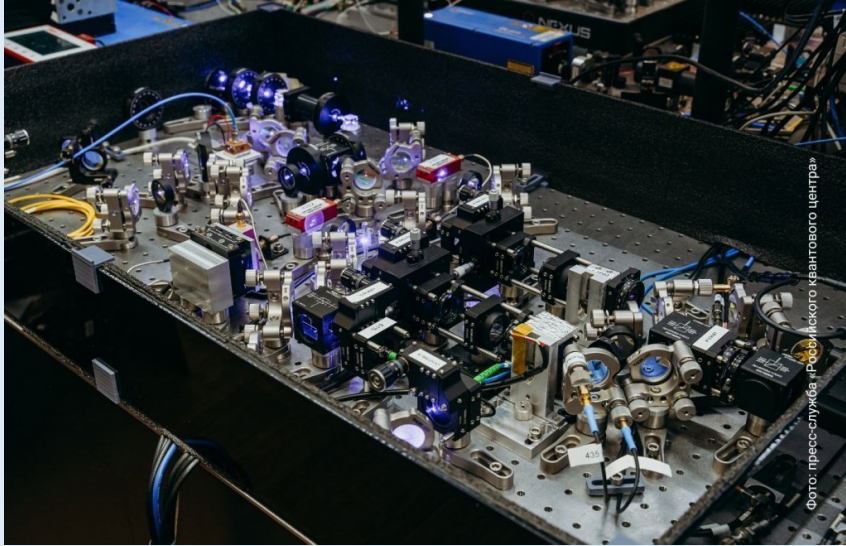
Области применения криогенных температур



Охлаждение квантовых компьютеров
Исследования элементарных частиц

Квантовые компьютеры

Квантовый компьютер — вычислительная машина. Используются явления квантовой механики для передачи и обработки данных. Информация представляется в виде **кубитов** которые могут одновременно иметь значения и 0 и 1, что позволяет экспоненциально увеличить скорость определенных вычислений в области криптографии и математического моделирования.



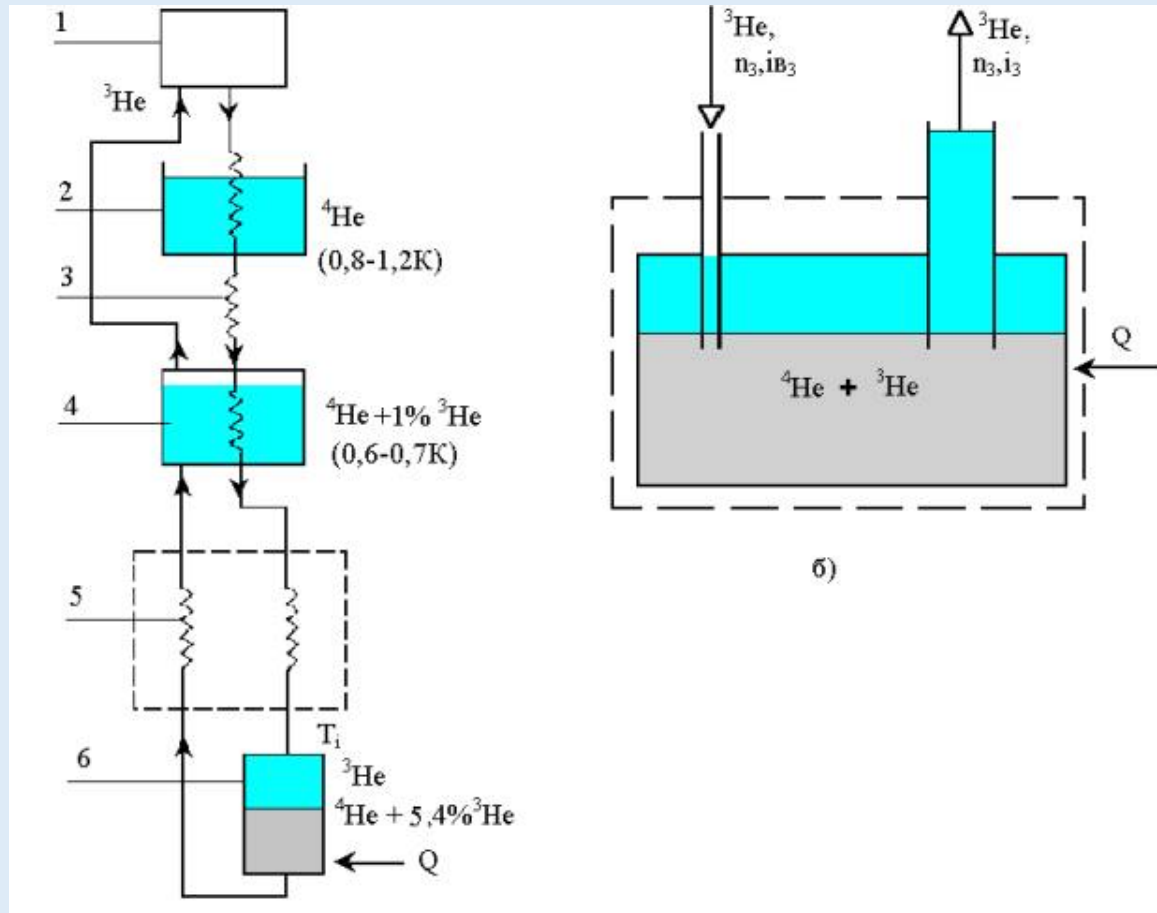
Для работы квантового компьютера необходима система криогенного охлаждения.

Материал кубитов ВТСП.

Охлаждение кубитов осуществляется криогенной машиной основанной на цикле растворения гелия в гелии-4, что позволяет достичь температур близких к абсолютному нулю ($<0.05\text{K}$).



Рефрижератор растворения гелия-3 в гелии-4



В смесительной ванне происходит расслоение фаз: ^3He располагается в верхней части, а внизу концентрируется раствор $^3\text{He} - ^4\text{He}$ (5,4 % ^3He). Переход ^3He из верхней концентрированной фазы в раствор сопровождается поглощением теплоты. Температурный уровень в смесительной ванне обычно поддерживается в интервале 0,1—0,01 К. Минимально достигнутая температура в таких рефрижераторах составляет 0,002 К.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

Кротов Александр Сергеевич
Исполнительный директор инжинирингового центра
«Криогенные технологии в энергетике»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.