

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Система криогенное обеспечения в  
кабелях на основе  
высокотемпературных  
сверхпроводников.

Аспирант - Глушаев А.В.  
Науч. Руководитель- д.т.н. Баранов А.Ю.

Санкт-Петербург, 2019

# На сегодняшний день широко развивается сверхпроводниковое оборудование на основе высокотемпературного сверхпроводника

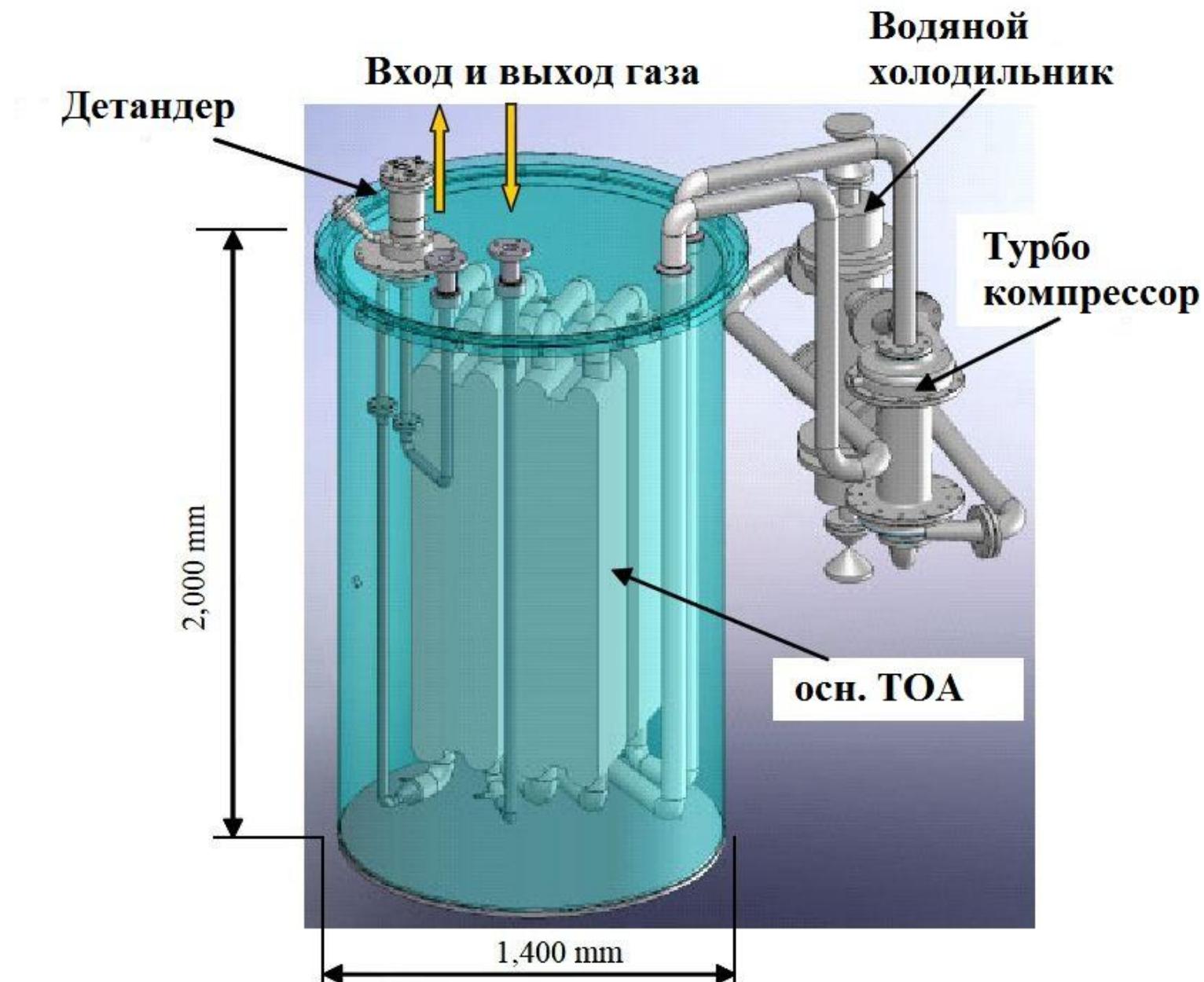


Сверхпроводниковый ограничитель тока  
От компании NEXANS



Однофазный ВТСП кабель установленный в Шеньян, Китай

Это связано с экономичным охлаждением с помощью жидкого азота.



Схематичное изображение неоновой криорефрижератора на обратном цикле Брайтона

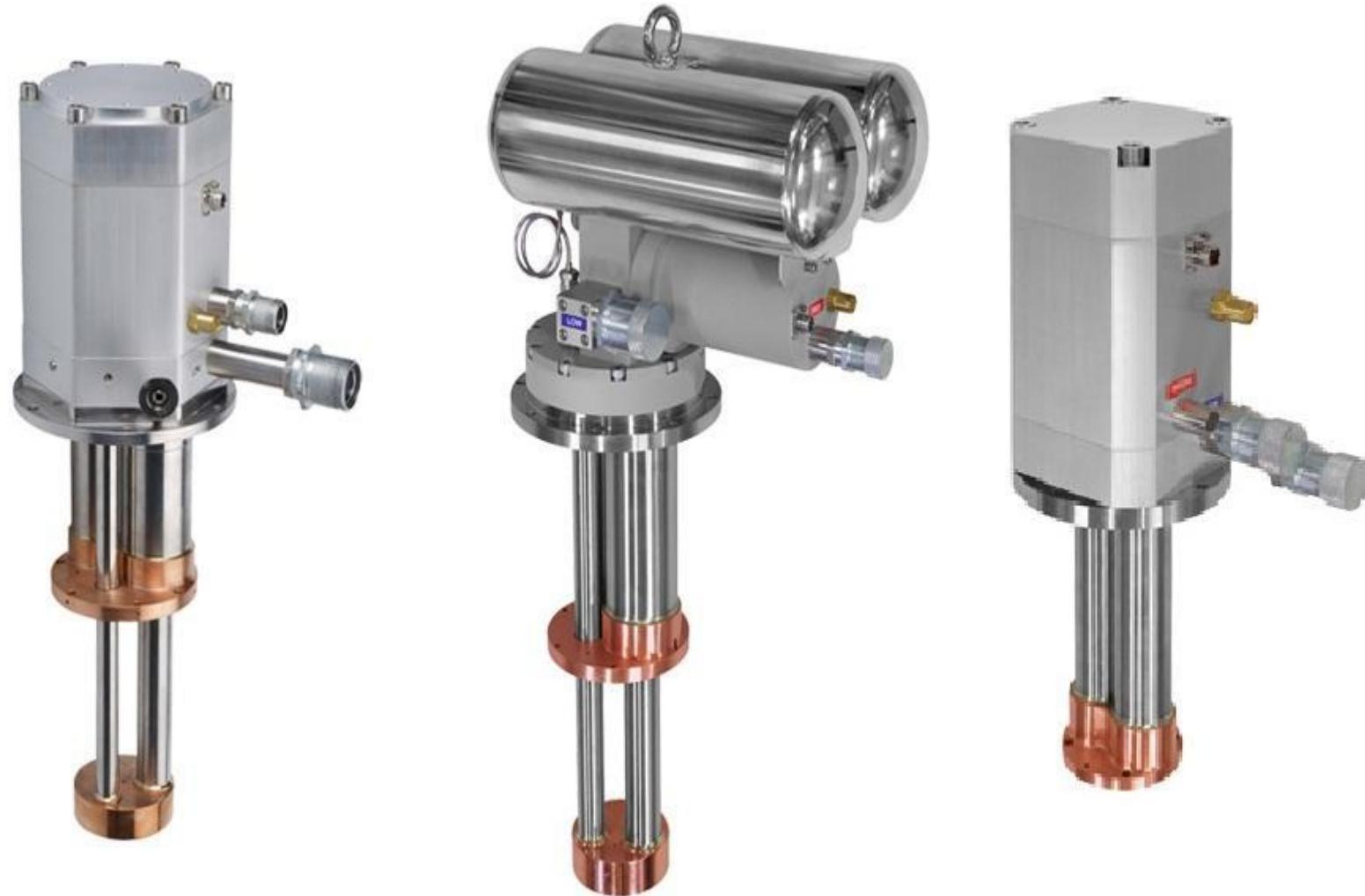
Для успешной разработки сверхпроводящего оборудования необходима отлаженная криогенная система, которая поддерживает заданную температуру сверхпроводника на определенном уровне.

# Система криостатирования должна обеспечить следующие эксплуатационные условия:

- Охлаждение сверхпроводника до стабильной рабочей температуры, при которой проводник достигает рабочих параметров. Компенсацию подвода теплоты от объекта, источником выделения которой могут быть вихревые токи, джоулевая теплота в электрических контактах и переключателях и т.д.
- Стабилизацию температуры для поглощения малых импульсов нагрева вызванных скачками электрического тока внутри
- Защита от квенча, то есть защита при неконтролируемом переходе всего сверхпроводника в нормальное состояние в устройстве с последующим выделением запасенной энергии из-за повышения сопротивления в цепи.

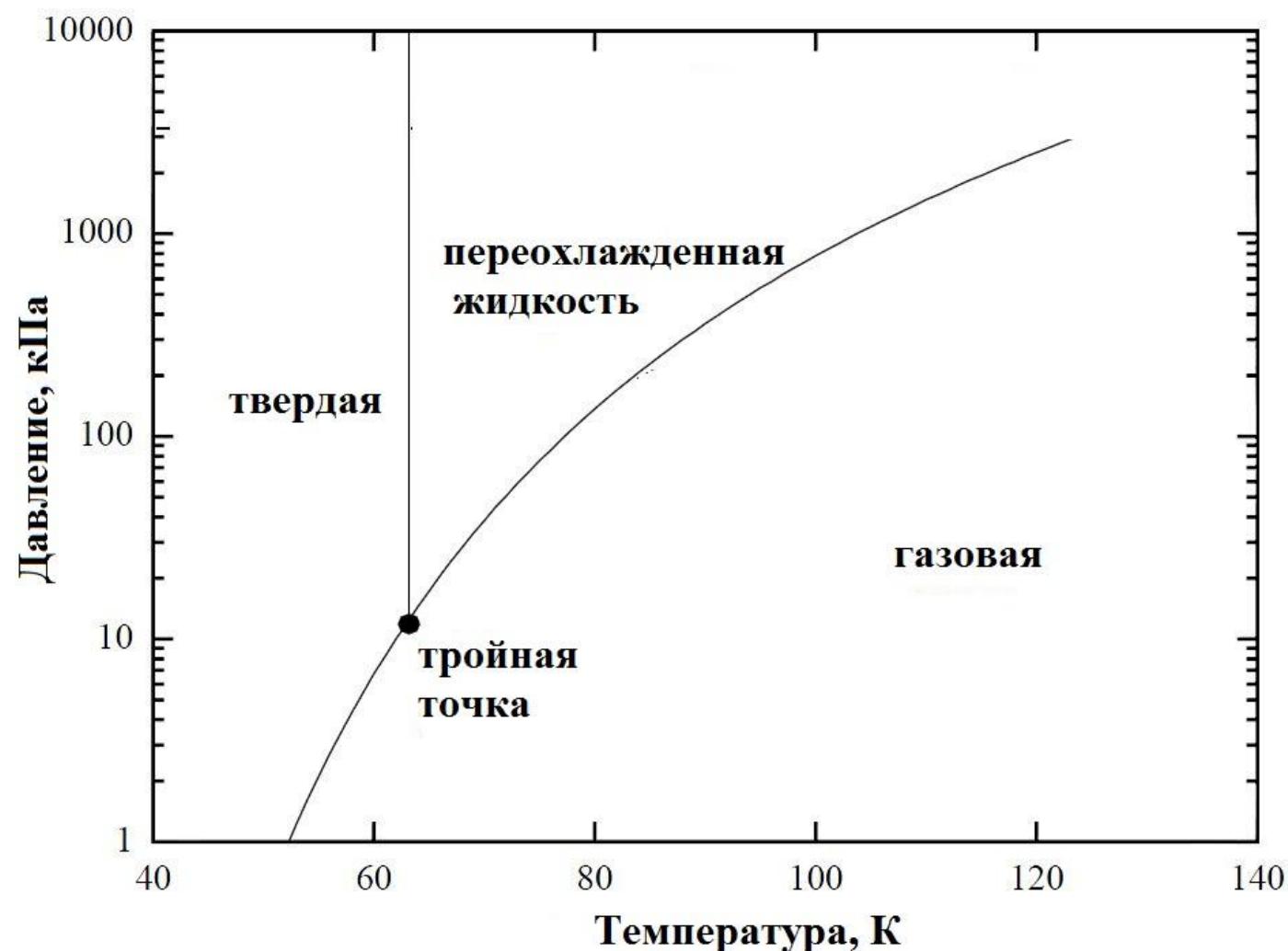
# Криорефрижераторы

Криорефрижераторы используют для создания закрытых( замкнутых) криогенных систем, которые длительное время могут работать автономно с минимальными скачками температур.



Так же с помощью них можно поддерживать заданную температуру криостатирования отличную от температур кипения известных криоагентов.

# Переохлажденный жидкий азот

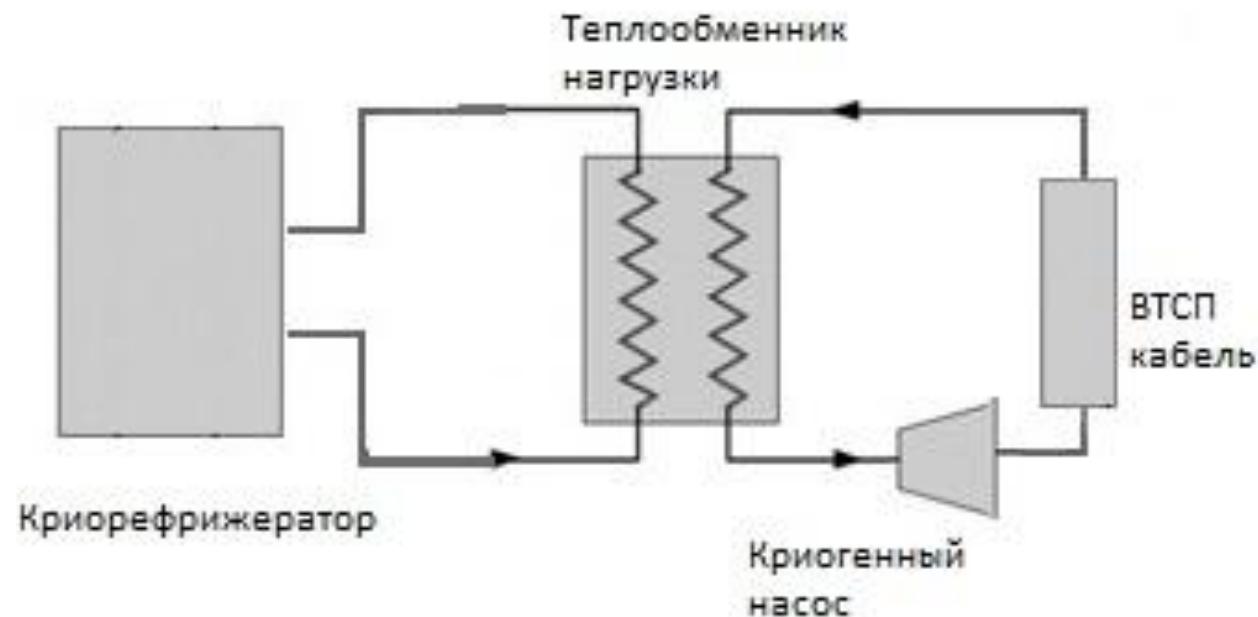


увеличивается максимально допустимая плотность электрического тока, поэтому магнитные системы могут быть уменьшены в размерах.

переохлажденная жидкость не кипит и в ней не образуются пузырьков, что улучшает электрическую изоляцию проводника, что очень важно в высоковольтном оборудовании, например ограничители электрического тока.

При резком нагреве в результате аварии, переохлажденная жидкость сначала поглотит избыточную энергию за счет перегрева до температуры насыщения и только потом будет испаряться.

# Схемы криостатирования

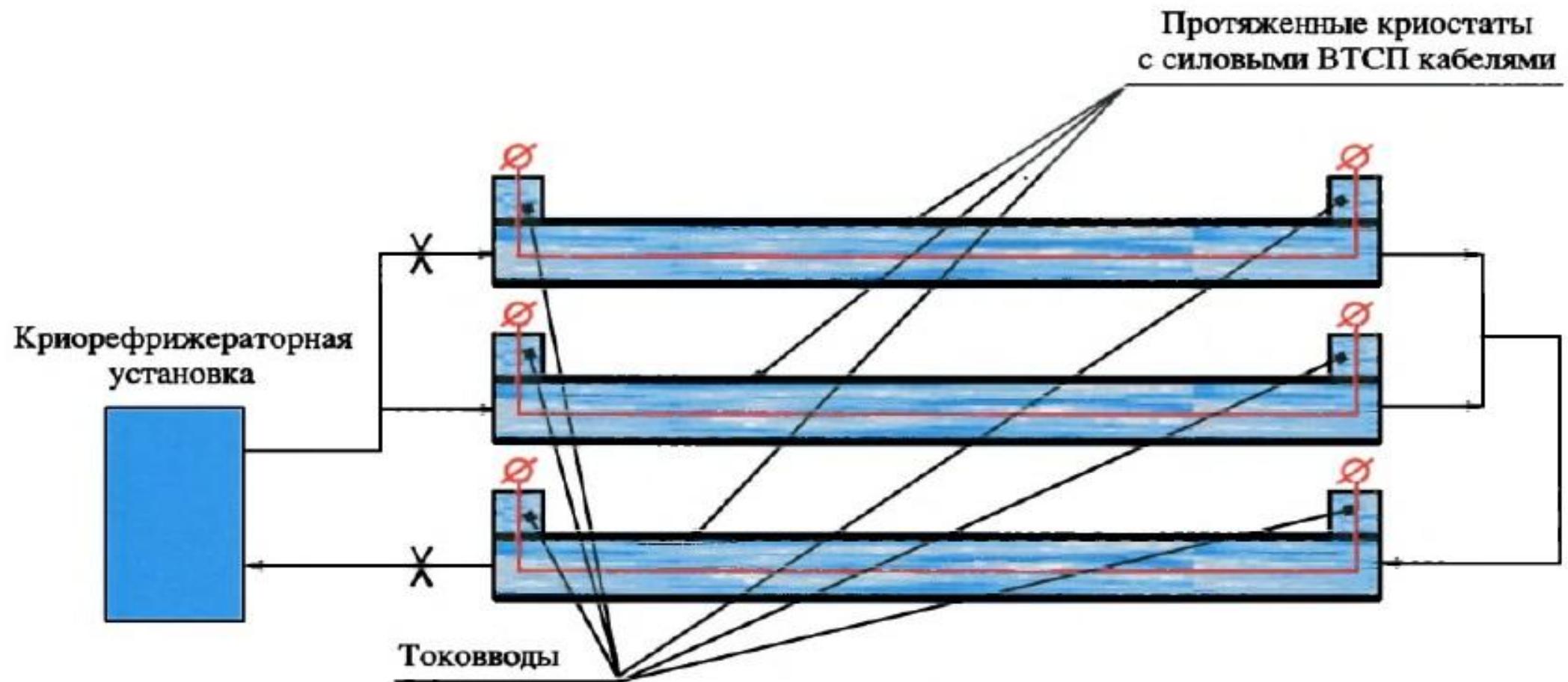


Циркуляционный насос СКО обеспечивает оптимальный расход жидкого азота.

Теплота из окружающей среды рассеивается по длине всего криостата, что вызывает разность температур криоагента на входе и выходе из ВТСПК.

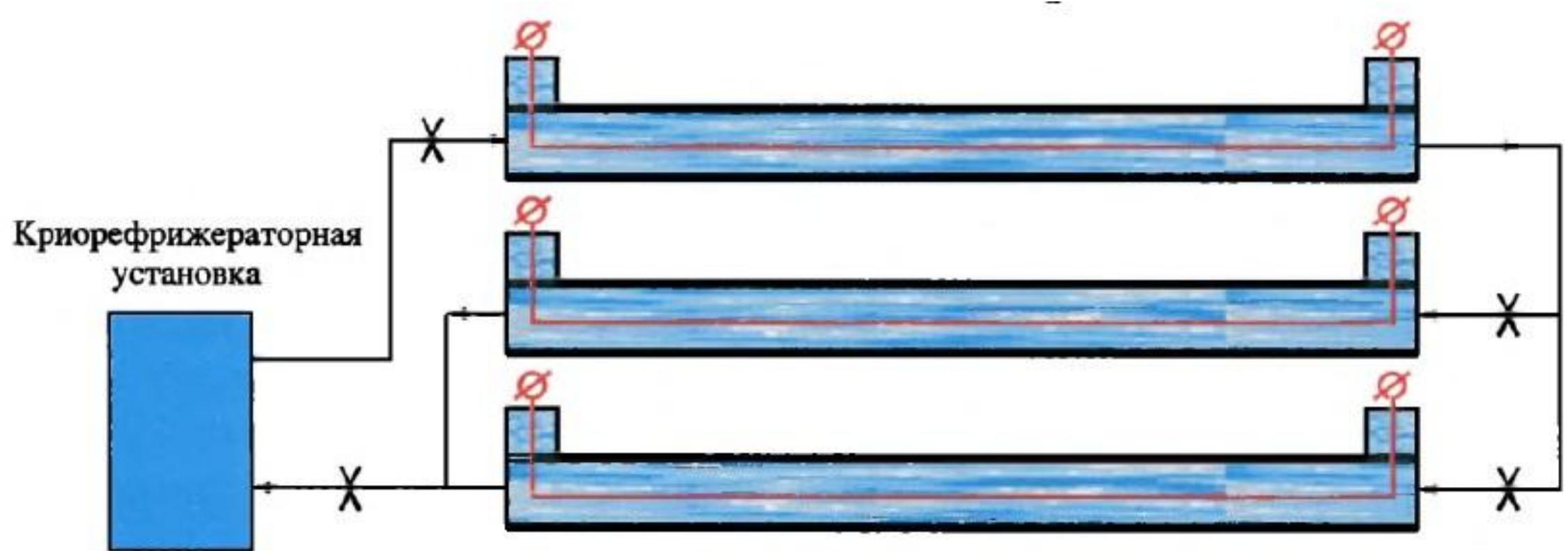
Выбор схемы циркуляции влияет на изменение температуры по длине криостата

# Схемы криостатирования



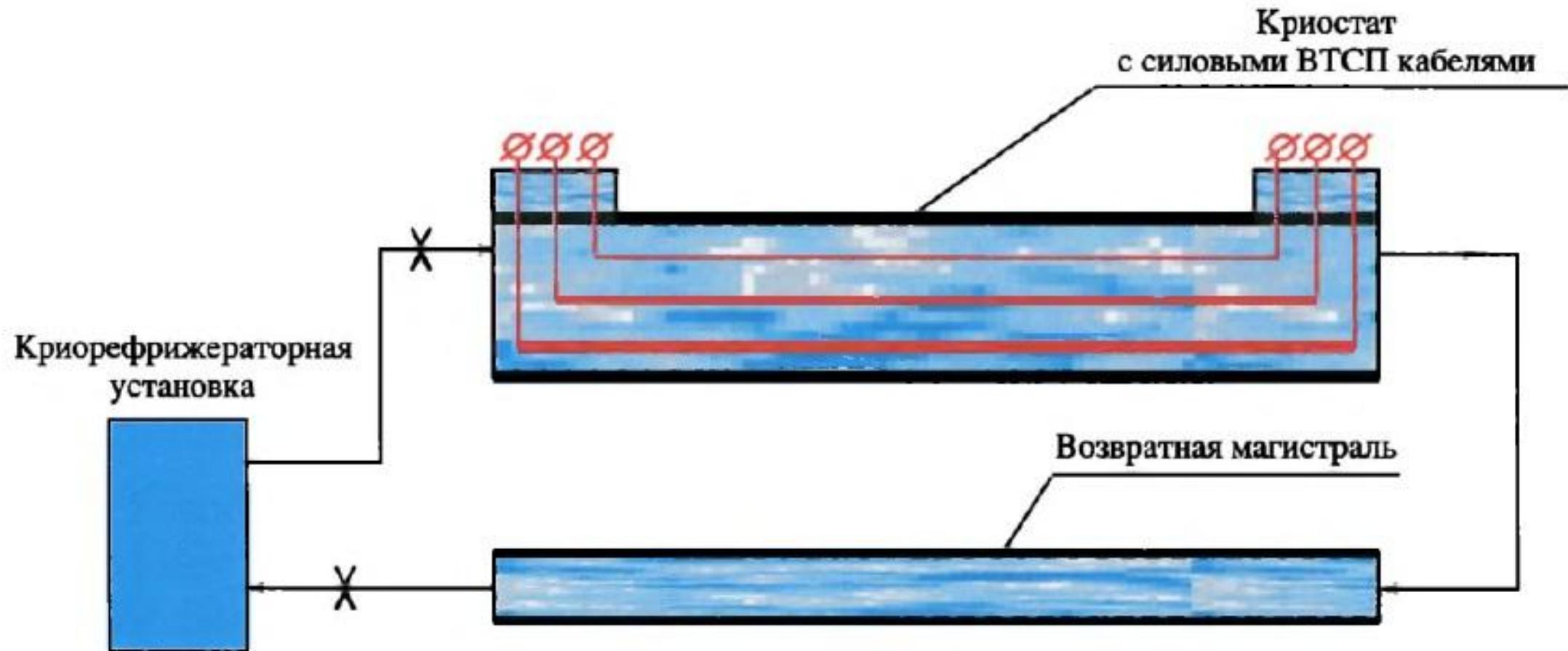
**Вариант 1**  
Прямой поток – 2 криостата  
Обратный поток – 1 криостат

# Схемы криостатирования



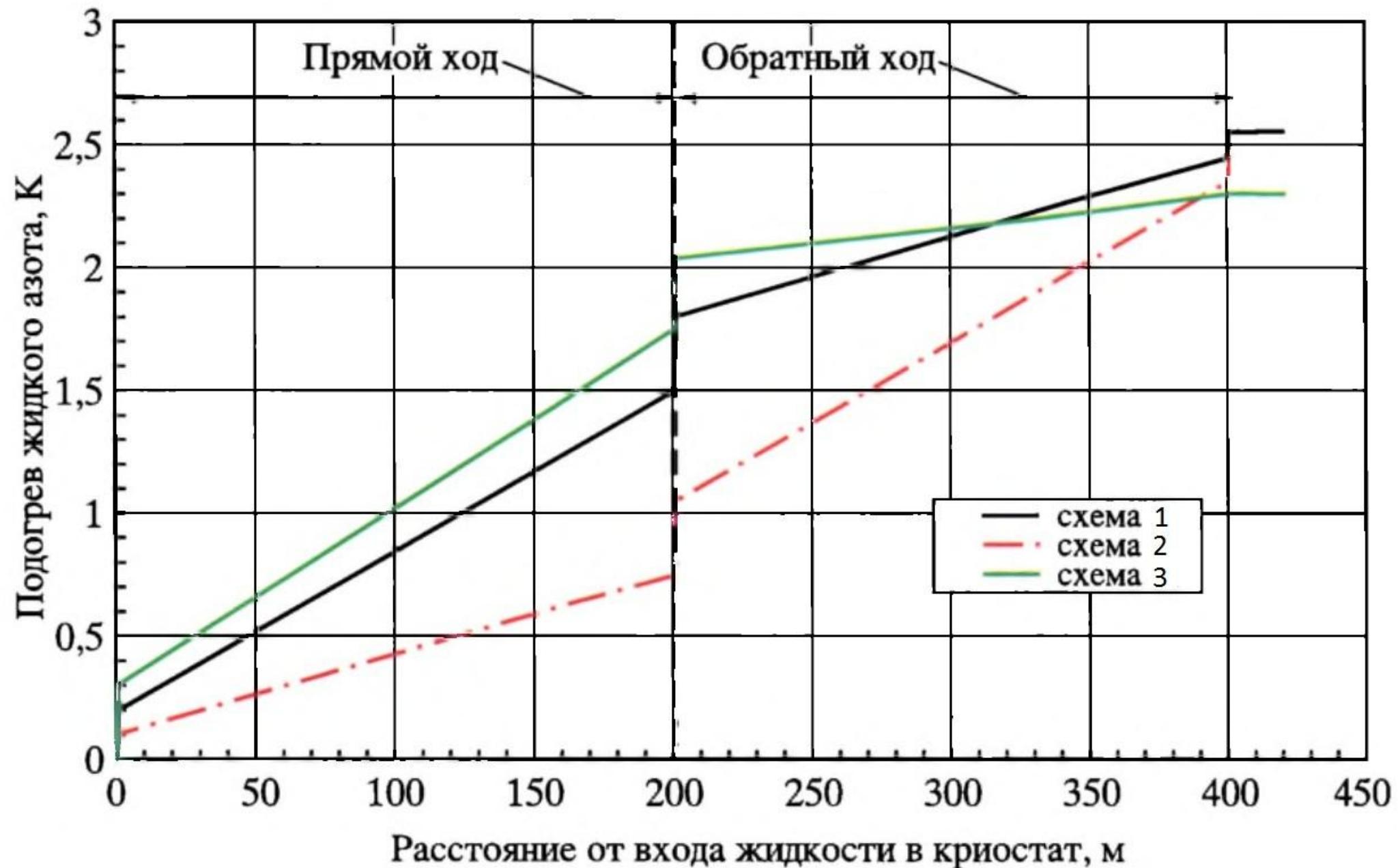
Вариант 2  
Прямой поток – 1 криостат  
Обратный поток – 2 криостата

# Схемы криостатирования



**Вариант 3**  
**Прямой поток – 3 криостата**  
**Обратный поток – возвратная магистраль**

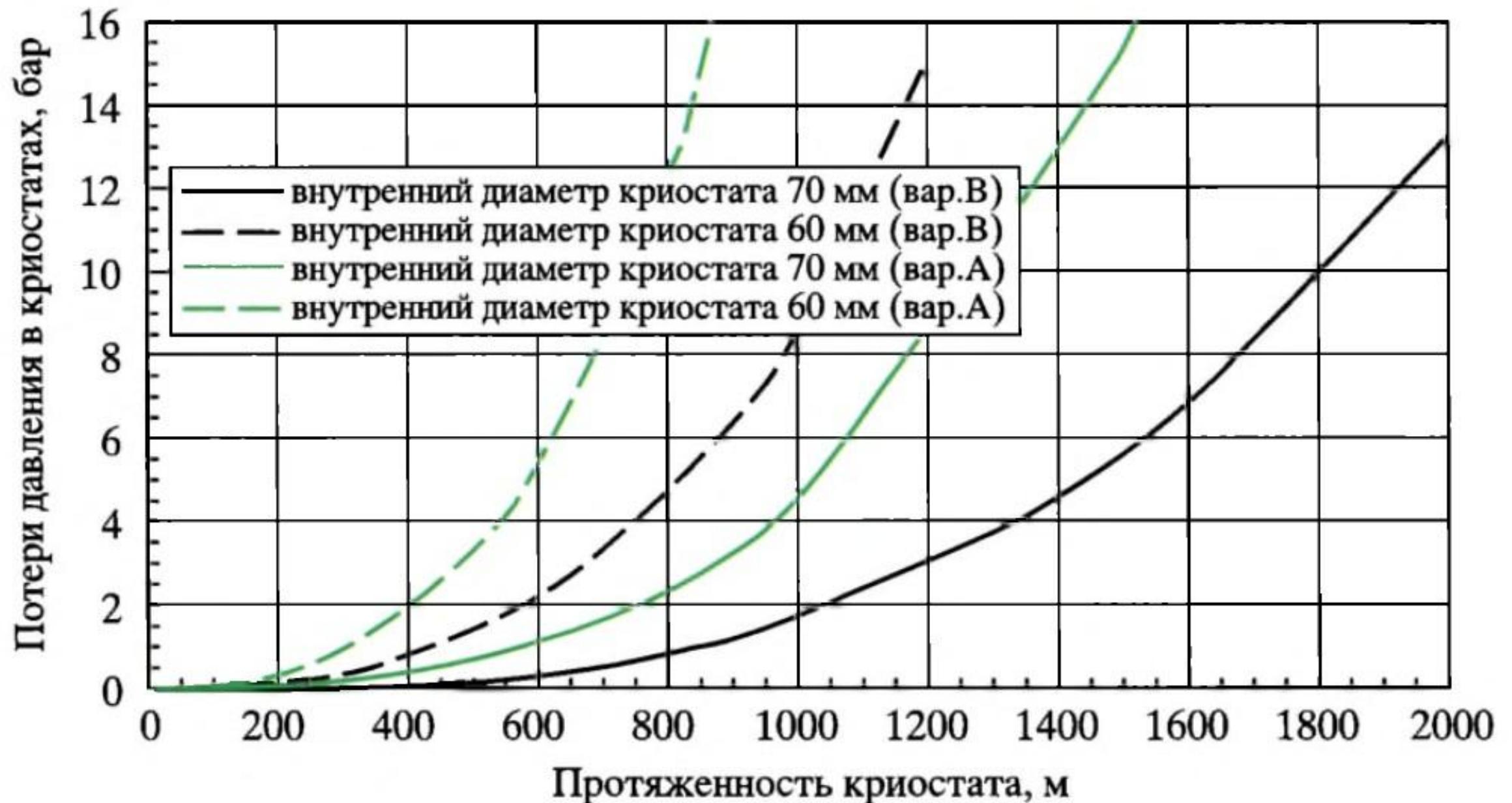
# Подогрев жидкости в криостатах



# Подогрев жидкости в криостатах

При увеличении количества фаз ВТСПК в прямом направлении увеличивается температура на выходе из участка при том же расходе криоагента. Это связано с тем, что при увеличении количества фаз увеличиваются тепловые потери, которые снимаются жидким азотом. Следовательно на прямом направлении минимальная температура на конце участка будет у 2 варианта, а максимальная у 3. Схема 1 и 2 имеют одинаковый общий теплоприток, но разную динамику изменения температуры по длине. Так как на конце прямого участка температура ниже будет во 2 варианте, то и средняя температура по длине криостатов будет ниже. Из всех вариантов лучше происходит процесс захлаживания в варианте 2. Так как в обратном направлении расположено 2 криостата и через них с меньшими гидравлическими потерями будет проходить однофазный или двухфазный поток. Если рассмотреть вариант 3, то в нем будет минимальный перепад температур по длине криостатов, так как в этом варианте общие тепловые потери меньше чем в 1 и 2 варианте.

# Гидравлические потери в кабеле



Вариант А – минимальный теплоприток  
Вариант Б – максимальный теплоприток

# Влияние длины силового кабеля на величину массового расхода жидкого азота

