

**Разработка стратегии системы контроля процессом сжатия гелия  
низкого давления**

# 02, февраль 2013

DOI: 10.7463/0213.0539096

Нагимов Р. Р.

УДК 62-932.2

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
nagimov@inbox.com**1 ВВЕДЕНИЕ**

Испытательный комплекс Национальной Ускорительной Лаборатории имени Энрико Ферми для тестирования криомодулей (Fermilab Cryomodule Test Facility) предназначен для тестирования сверхпроводящих радиочастотных резонаторов и сопутствующего криогенного оборудования. Для обеспечения данных тестов в криогенном департаменте Лаборатории Ферми ведется разработка специализированной криогенной системы для охлаждения сверхпроводящих радиочастотных резонаторов сверхтекучим гелием. Данные резонаторы предназначены для использования в качестве ускорительных элементов в проектах будущих ускорителей, таких как Project X, Международный Линейный Коллайдер, а также Мюонный Коллайдер. [1]

Для поддержания сверхпроводящего состояния резонаторов необходимо обеспечение для них экстремально низких температур. Для этих целей применяется сверхтекучий гелий при температурах 1,8 К...2,0 К. Охлаждение гелия производится в специальной криогенной установке, разрабатываемой для тестирования резонаторов.

В рабочем режиме тепловыделение резонаторов вследствие диссипации энергии радиочастотных электромагнитных колебаний изменяется в широких пределах. Данная тепловая нагрузка на криогенную систему значительно превышает тепловую нагрузку вследствие теплопроводности и излучения. [2] В связи с этим, одним из наиболее важных требований к криогенной системе является высокая эффективность ее работы в широком диапазоне тепловых нагрузок. С точки зрения возможностей обеспечения данного требования проведен анализ циклов холодного и гибридного сжатия.

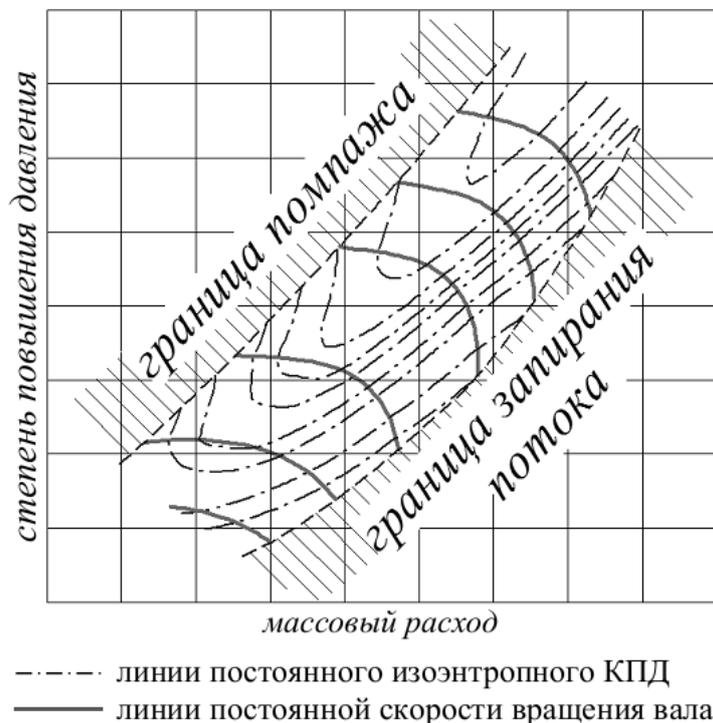
**2 ХОЛОДНЫЕ КОМПРЕССОРЫ**

Для поддержания температуры насыщения гелия в 1,8 К пары гелия низкого давления должны удаляться из испарителя путем его сжатия до атмосферного давления, степень сжатия гелия при этом достигает значений 60 и выше. При умеренных значениях массового расхода возможно применение объемных вакуумных насосов – роторных, Руте или жидкостно-

кольцевых, несмотря на высокие значения потребного объемного расхода гелия ввиду его низкой плотности при температуре окружающей среды.

Практически достижимый предельный расход объемных компрессоров для сжатия паров гелия достиг значений в  $20000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при этом такие машины достигают неоправданно больших размеров. [3] Так как количество сжимаемых паров гелия напрямую зависит от тепловой нагрузки гелиевого испарителя, для увеличения мощности охлаждения необходимо увеличение количества сжимаемых паров. Для решения данной задачи стало развиваться направление холодного сжатия паров гелия при более низкой температуре, и, следовательно, более высокой плотности, что позволяет использовать более компактные компрессоры. К холодным компрессорам для сжатия гелия предъявляются следующие требования: отсутствие смазки, высокая чистота сжатого газа и высокая термодинамическая эффективность, так как теплота сжатия в таких компрессорах отводится при более низкой температуре.

К данным требованиям наиболее приспособлены компрессоры динамического принципа действия (радиальные и осерадиальные центробежные компрессоры). Однако из-за ограниченной максимальной степени сжатия ступени турбокомпрессора необходимо использование многоступенчатого сжатия с последовательным включением нескольких ступеней турбокомпрессоров. В таких системах проблемы единичных ступеней усугубляются их последовательной работой, поэтому особенно остро встают проблемы ограниченного рабочего диапазона (за пределами областей помпажа и запираания рабочего потока, см. рис. 1), снижения эффективности при работе на нерасчетных режимах и необходимости адаптации к переменным условиям (расходу и плотности) потока на всасывании.



**Рис. 1. Рабочая область ступени турбокомпрессора**

Кроме того, существует ряд технологических ограничений, связанных с точностью изготовления рабочих колес, типом применяемых привода и подшипников, а также тепловыми характеристиками машин. Несмотря на определенные ограничения по использованию данного типа компрессоров, их применение имеет ряд преимуществ по сравнению с компрессорами

объемного принципа действия, что определило их использование в гелиевых криогенных системах на сверхнизких температурах.

### 3 ЦИКЛЫ НА ХОЛОДНЫХ КОМПРЕССОРАХ

Для производства холода на температурном уровне ниже 2 К наибольшее распространение получили два цикла на холодных компрессорах [4]:

- «холодный цикл», основанный на многоступенчатом сжатии холодными турбокомпрессорами;
- «гибридный цикл», основанный на последовательном сжатии холодными турбокомпрессорами и объемным компрессором, работающим при температуре окружающей среды;

На текущем технологическом уровне развития турбокомпрессоров, необходимо использование, как минимум, четырех турбокомпрессоров для холодного цикла и трех – для гибридного. Данное ограничение связано с максимальной степенью повышения давления современных холодных компрессоров, находящейся в пределах значений (2,5...3,5), в зависимости от номера ступени. Так, для сжатия паров гелия при температуре 1,8 К до атмосферного давления общая степень повышения давления без учета гидравлических сопротивлений равна:

$$P_{atm} / P_{sat. liq. / T = 1,8 K} = 101325 \text{ Pa} / 1638,41 \text{ Pa} = 61,8$$

и достижима только при использовании четырехступенчатого сжатия в холодных компрессорах.

Упрощенная схема низкотемпературной части холодного цикла представлена на рис. 2, гибридного цикла – на рис. 3.

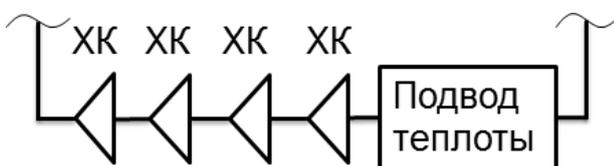


Рис. 2. Схема низкотемпературной части цикла на холодных компрессорах

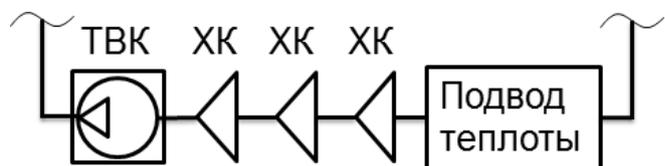


Рис. 3. Схема низкотемпературной части гибридного цикла

В данных циклах откачка паров гелия из испарителя производится:

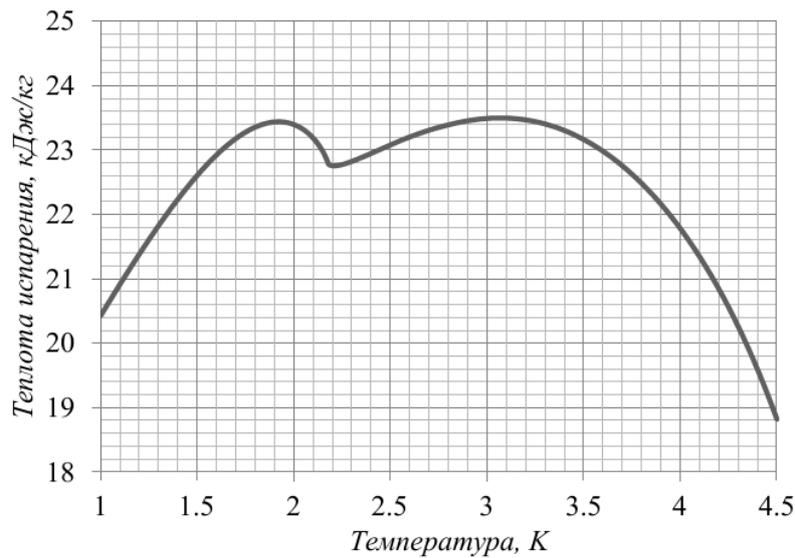
- последовательным сжатием в четырех ступенях холодных турбокомпрессоров до атмосферного давления для холодного цикла;
- последовательным сжатием в трех ступенях холодных турбокомпрессоров до промежуточного давления (давления всасывания теплого вакуумного компрессора) и сжатием в ступени объемного вакуум-компрессора до атмосферного давления для гибридного цикла.

Изменение тепловой нагрузки гелиевого испарителя, приводящее к изменению расхода гелия через систему, приводит к изменению режимов работы холодных компрессоров, что может вывести их из рабочей области параметров. Так, при постоянной степени повышения давления снижение расхода через турбокомпрессор приближает режим работы компрессора к границе помпажа, повышение – к границе запириания (см. рис. 1), что, в свою очередь, снижает эффективность работы компрессора, либо приводит к вынужденной его остановке.

Режимы работы гелиевых испарителей зачастую имеют нестационарный характер по температурному уровню и/или тепловой нагрузке. Зависимость массового расхода откачиваемых паров гелия от тепловой нагрузки и температурного уровня гелиевого испарителя имеет специфический характер, обусловленный зависимостью теплоты парообразования жидкого гелия от температуры (см. рис. 4) и определяется по формуле:

$$Q = r \times M,$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка испарителя, Вт;  $r$  – теплота парообразования жидкого гелия при заданной температуре, Дж/кг;  $M$  – массовый расход гелия через систему холодных компрессоров, кг/с.

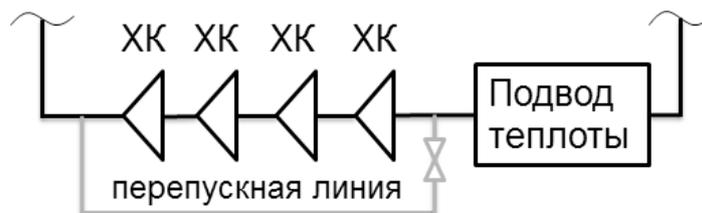


**Рис. 4. Зависимость теплоты испарения жидкого гелия от температуры**

Заведомо нестационарный режим работы криомодулей сверхпроводящих радиочастотных резонаторов ввиду динамического характера тепловой нагрузки от диссипации энергии радиочастотных электромагнитных колебаний приводит к необходимости проектирования криогенной системы, отвечающей требованиям эффективной работы в широком диапазоне тепловых нагрузок и различных температурных уровней. Для выполнения данного требования тепловая нагрузка гелиевого испарителя криогенной системы, а значит, и расход откачиваемых паров гелия из него, должны изменяться в необходимых пределах.

Ввиду специфического диапазона рабочих характеристик холодных компрессоров (см. рис. 1) изменение массового расхода гелия через ступень компрессора приводит к выходу компрессора из оптимального режима работы и понижению его эффективности. Дальнейшее изменение массового расхода зачастую приводит к выходу режима работы компрессора за пределы его рабочей характеристики. Данное явление неустранимо и проявляется в той или иной степени во всех циклах с холодными компрессорами.

Для борьбы с данным явлением часто применяется метод байпасирования – перепуска части потока с напорной линии на всасывание (рис. 5), при этом возможен «увод» рабочего режима компрессора из зоны пониженной эффективности или зоны помпажа за счет увеличения массового расхода через компрессор.



**Рис. 5. Схема регулирования системой компрессоров методом байпасирования**

Данный метод применим только для предотвращения ухода компрессора с расчетного режима работы в сторону линии помпажа (рис. 6), то есть снижения расхода газа через компрессор. В контексте гелиевого рефрижератора это означает снижение тепловой нагрузки гелиевого испарителя, то есть номинальный режим работы холодных компрессоров для систем с данным методом регулирования должен быть рассчитан на максимальную тепловую нагрузку и максимальный расход откачиваемых из испарителя паров гелия. Системы с подобной конфигурацией способны работать без байпасирования ограниченный диапазон тепловых нагрузок, что снижает общую эффективность системы в режимах работы при пониженных тепловых нагрузках ввиду неэффективности метода байпасирования с энергетической точки зрения.

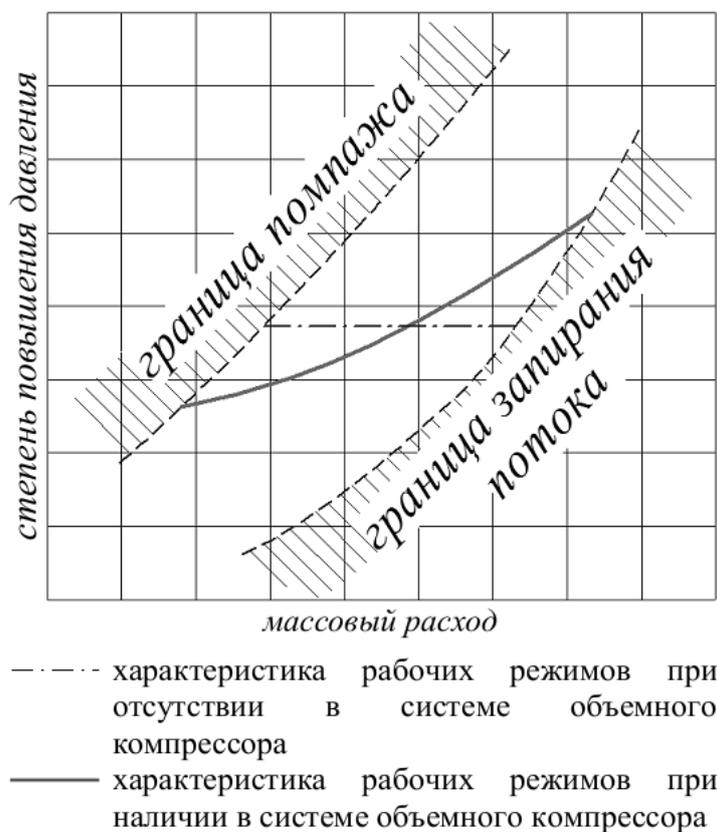


**Рис. 6. Регулирование режимов работы компрессора методом байпасирования**

Также для поддержания устойчивой работы системы холодных компрессоров применим метод резистивного нагрева для введения дополнительной тепловой нагрузки в систему гелиевого рефрижератора. Использование дополнительных нагревателей позволяет свести к минимуму колебания тепловой нагрузки гелиевого испарителя, однако очевидна экономическая нецелесообразность подобного решения ввиду нерационального использования холодопроизводительности системы на компенсацию дополнительной тепловой нагрузки.

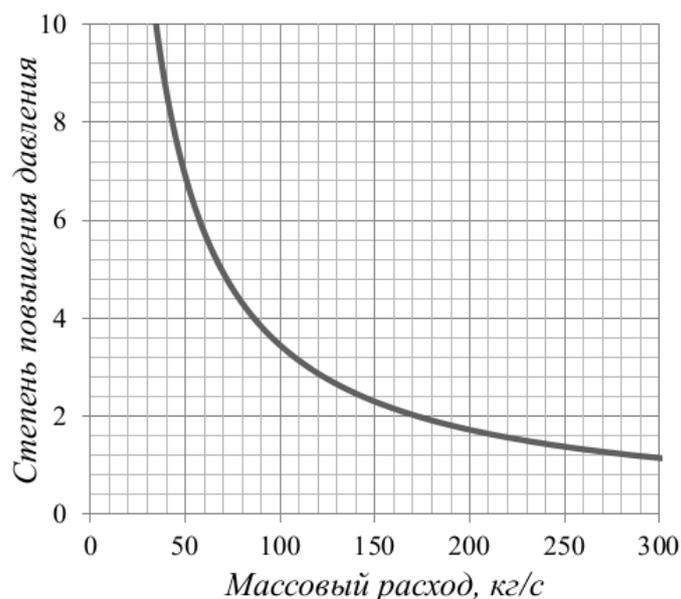
Для разрабатываемого в Лаборатории Ферми гелиевого рефрижератора важнейшим требованием является способность эффективной работы в широком диапазоне тепловых нагрузок, поэтому работа данного рефрижератора по циклу, основанному на холодном сжатии, очевидно, связана с большими эксплуатационными затратами.

Для решения проблемы высокой эксплуатационной стоимости необходимо применение в разрабатываемой криогенной системе цикла, не требующего дорогостоящего с эксплуатационной точки зрения метода регулирования, либо сводящего необходимость его применения к минимуму. Возможность такого регулирования связана с наличием рабочих режимов компрессора в широком диапазоне значений массового расхода. Для получения возможности использования этих режимов необходимо с изменением тепловой нагрузки и массового расхода определенным образом контролировать степень повышения давления холодных компрессоров (см. рис. 7).



**Рис. 7. Влияние объемного компрессора на рабочие характеристики холодных компрессоров**

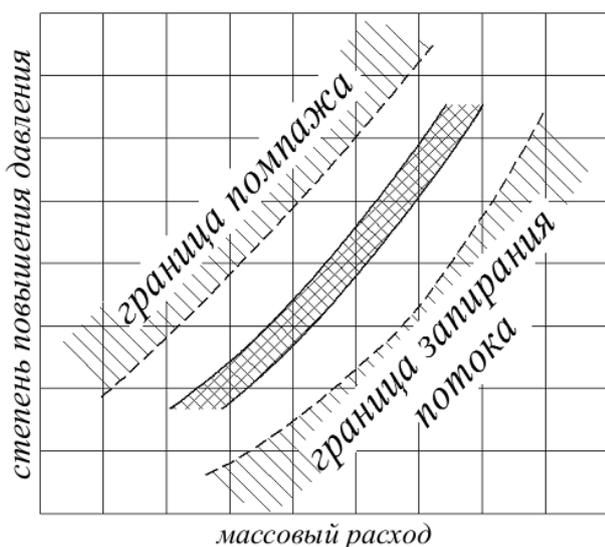
Для этого необходимо наличие в системе элемента, вносящего характеристику напорности, зависящей от массового расхода. Данному условию удовлетворяет компрессор объемного типа, пример напорной характеристики которого представлен на рис. 8.



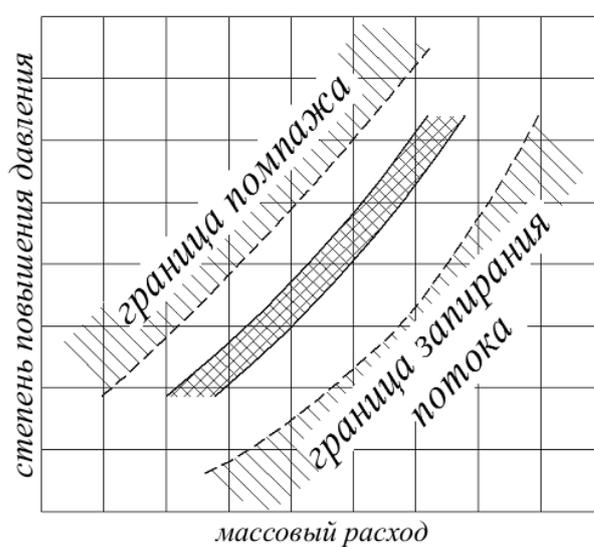
**Рис. 8. Теоретическая напорная характеристика винтового компрессора при фиксированном давлении нагнетания (101325 Па)**

Общая степень сжатия системы холодных компрессоров может обеспечиваться различным сочетанием степеней сжатия отдельных машин при различных рабочих режимах, характеризующихся различным сочетанием параметров КПД и степени повышения давления.

Задачей системы контроля в рассматриваемых циклах является не только ограничение рабочих режимов холодных компрессоров областями максимального удаления от областей нестабильной работы (рис. 9), но и обеспечение максимально возможного КПД при заданных параметрах гелиевого испарителя – температурного уровня и тепловой нагрузки (рис. 10). Результаты расчетов по известным характеристикам холодных компрессоров показывают хорошую согласованность данных задач регулирования. Таким образом, максимизации одного из критериев достаточно для организации системы управления данными компрессорами. Ввиду сложности и неточности описания показателей эффективности выбрана стратегия управления, основанная на максимизации расстояния до областей помпажа и запыриания компрессора.



**Рисунок 9. Область максимально стабильной работы холодного компрессора**



**Рисунок 10. Область максимально эффективной работы холодного компрессора**

## **4 СИМУЛЯЦИЯ ПРОЦЕССА СЖАТИЯ ГЕЛИЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Симуляция процесса сжатия гелия выполнена для цикла с холодными компрессорами и гибридного цикла.

### **4.1 Алгоритм симуляции процесса сжатия для цикла с холодными компрессорами**

1. Определение давления всасывания первой ступени холодного компрессора по заданной температуре сверхтекучего гелия в испарителе – давления паров гелия в состоянии насыщения.
2. Определение общей степени повышения давления системы холодных компрессоров по давлению всасывания первой ступени холодного компрессора и давлению нагнетания последней ступени (около 1 атм.).
3. Определение рабочих областей холодных компрессоров, находящихся за пределами областей помпажа и запираания при значениях степеней повышения давления, обеспечиваемых соответствующей ступенью сжатия (холодным компрессором).
4. Определение в рабочих областях ступеней холодных компрессоров подобластей, удовлетворяющих условию достижения определенной в п. 2 общей степени повышения давления.
5. Выбор наиболее благоприятных режимов работы в рабочих областях, определенных в п. 4 для каждого режима, характеризующегося определенным значением массового расхода гелия через систему и соответствующей тепловой нагрузкой.

Режимы работы гелиевого испарителя задаются температурным уровнем (п. 1) и тепловой нагрузкой (п. 5).

### **4.2 Алгоритм симуляции процесса сжатия гибридного цикла**

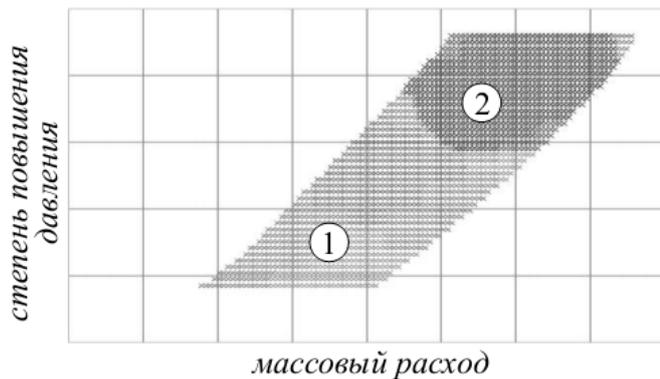
1. Определение давления всасывания первой ступени холодного компрессора по заданной температуре сверхтекучего гелия в испарителе – давления паров гелия в состоянии насыщения.
2. Определение давления всасывания объемного компрессора для заданной тепловой нагрузки гелиевого испарителя и соответствующего массового расхода гелия через систему по напорной характеристике объемного компрессора «массовый расход – давление всасывания» (при фиксированном давлении нагнетания около 1 атм.).
3. Определение общей степени повышения давления системы холодных компрессоров по давлению всасывания первой ступени холодного компрессора и давлению всасывания ступени объемного компрессора.
4. Определение рабочих областей холодных компрессоров, находящихся за пределами областей помпажа и запираания при значениях степеней повышения давления, обеспечиваемых соответствующей ступенью сжатия (холодным компрессором).
5. Определение в рабочих областях ступеней холодных компрессоров подобластей, удовлетворяющих условию достижения определенной в п. 3 общей степени повышения давления.
6. Выбор наиболее благоприятных режимов работы в рабочих областях, определенных в п. 5 для каждого режима, характеризующегося определенным значением массового расхода гелия через систему и соответствующей тепловой нагрузкой.

Режимы работы гелиевого испарителя задаются температурным уровнем (п. 1) и тепловой нагрузкой (пп. 2, 6).

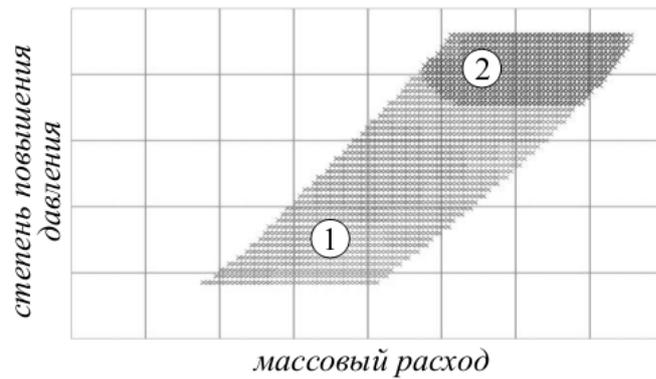
Рассматриваемые системы на базе холодного и гибридного циклов рассчитаны на максимум эффективности на температурном уровне 2,0 К.

## **5 СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ЦИКЛОВ С ХОЛОДНЫМ И ГИБРИДНЫМ СЖАТИЕМ**

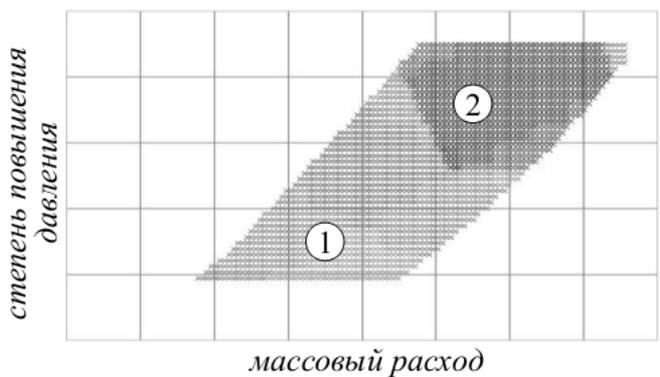
На рисунках 11а-г, 12а-г, 13а-г и 14а-г, 15а-г, 16а-г представлены результаты расчета циклов холодного и гибридного сжатия на различных температурных уровнях. Область «1» соответствует рабочим областям холодных компрессоров, находящимся за пределами областей помпажа и запираания при значениях степеней повышения давления, обеспечиваемых соответствующей ступенью сжатия (холодным компрессором), область «2» – рабочим областям, удовлетворяющим условию достижения общей степени повышения давления системы холодных компрессоров. Для гибридного цикла на рисунках отмечены наиболее оптимальные с точки зрения стабильности режимы работы холодных компрессоров для всех значений массового расхода гелия через систему внутри рабочих областей, а также рабочие области для объемного вакуум-компрессора на характеристике «давление всасывания – массовый расход».



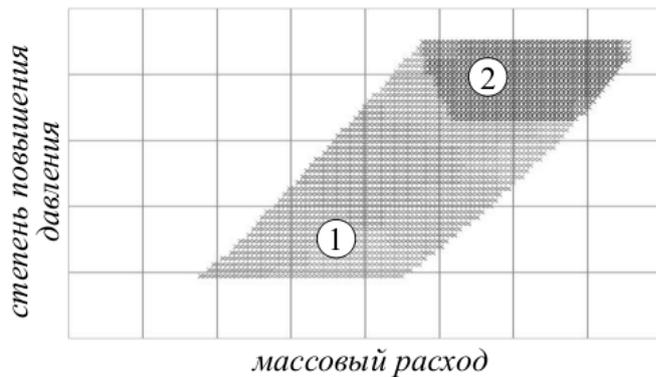
**Рис. 11а. Холодный цикл; 2,0 К;  
I ступень холодного турбокомпрессора**



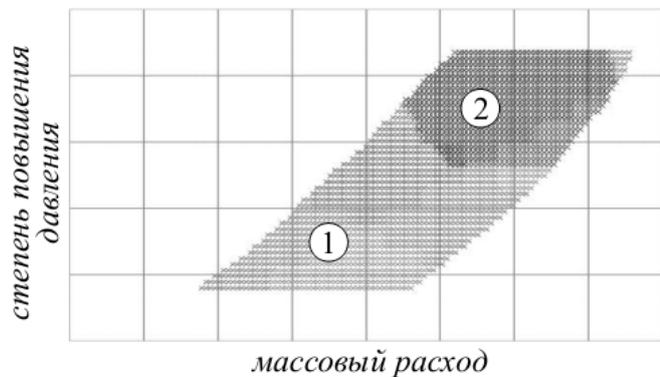
**Рис. 12а. Холодный цикл; 1,96 К;  
I ступень холодного турбокомпрессора**



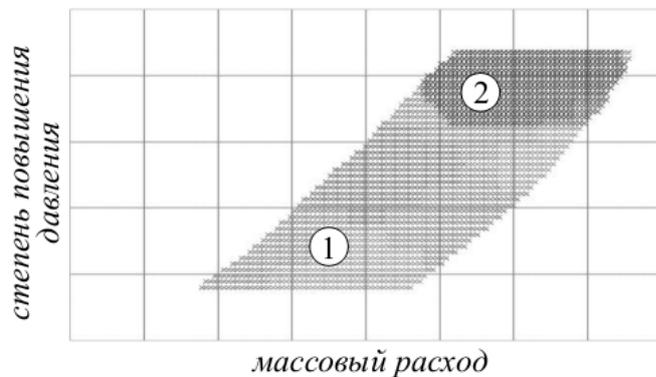
**Рис. 11б. Холодный цикл; 2,0 К;  
II ступень холодного турбокомпрессора**



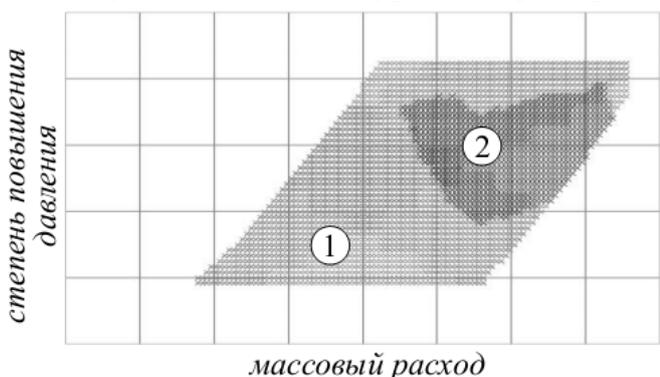
**Рис. 12б. Холодный цикл; 1,96 К;  
II ступень холодного турбокомпрессора**



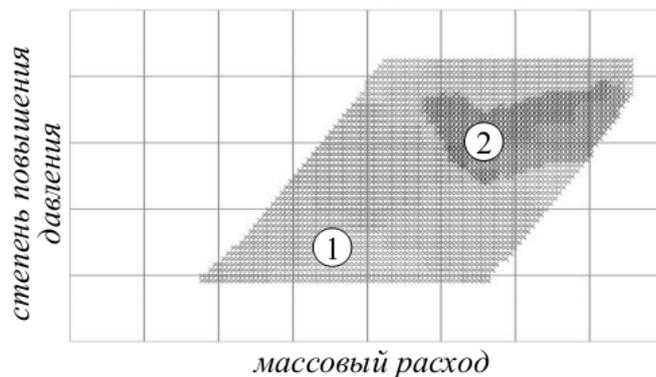
**Рис. 11в. Холодный цикл; 2,0 К;  
III ступень холодного турбокомпрессора**



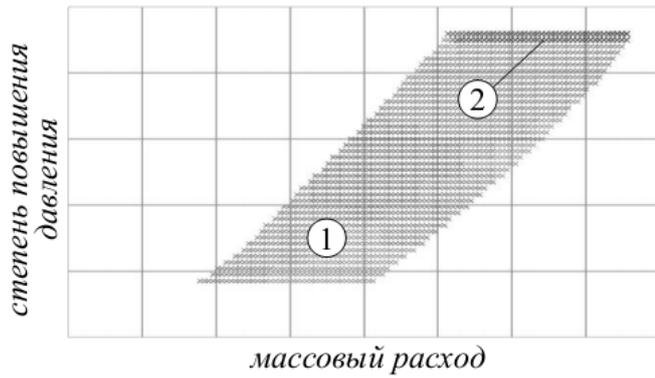
**Рис. 12в. Холодный цикл; 1,96 К;  
III ступень холодного турбокомпрессора**



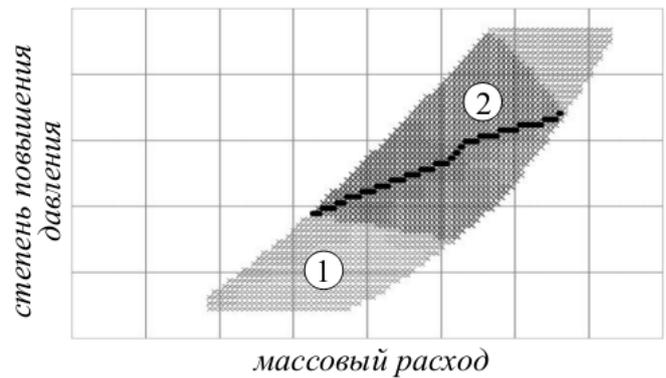
**Рис. 11г. Холодный цикл; 2,0 К;  
IV ступень холодного турбокомпрессора**



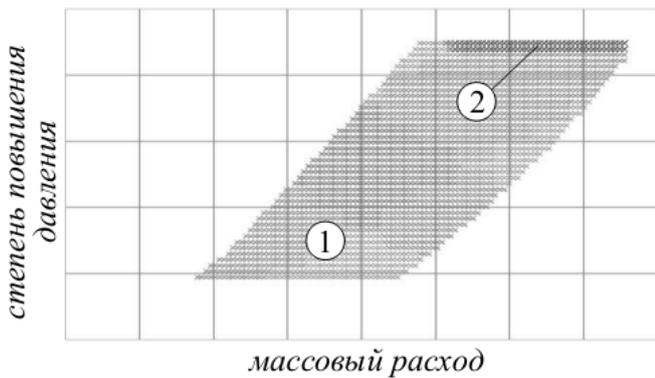
**Рис. 12г. Холодный цикл; 1,96 К;  
IV ступень холодного турбокомпрессора**



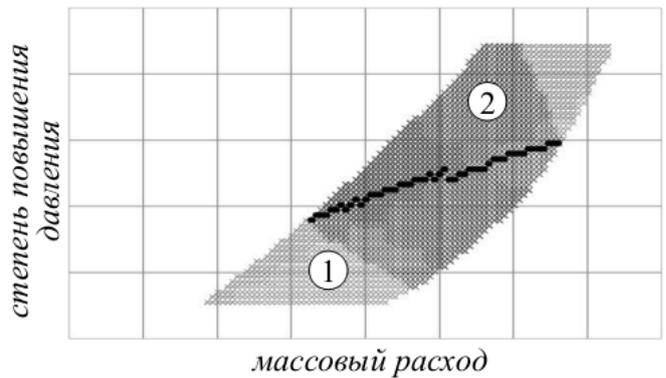
**Рис. 13а.** Холодный цикл; 1,91 К;  
I ступень холодного турбокомпрессора



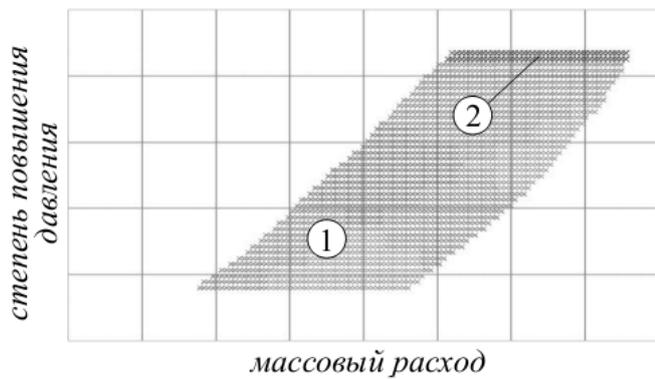
**Рис. 14а.** Гибридный цикл; 2,0 К;  
I ступень холодного турбокомпрессора



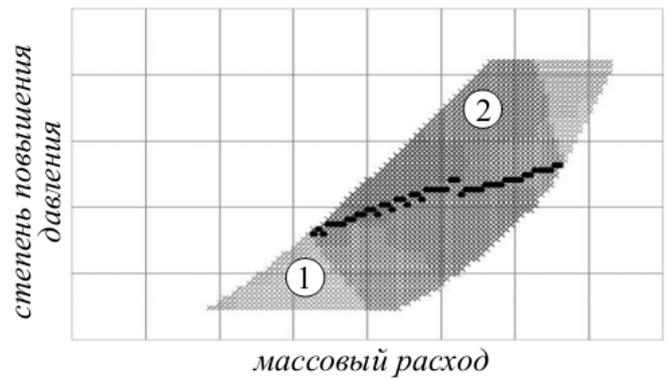
**Рис. 13б.** Холодный цикл; 1,91 К;  
II ступень холодного турбокомпрессора



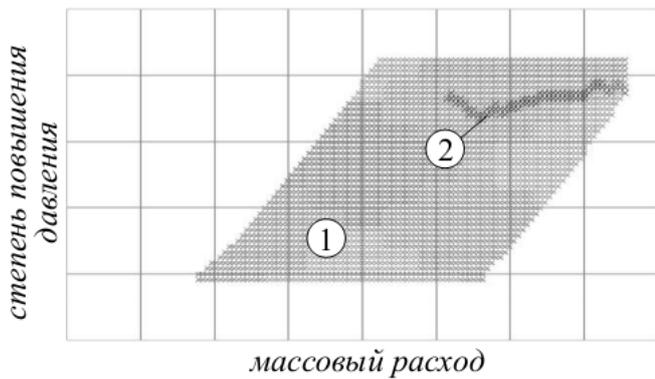
**Рис. 14б.** Гибридный цикл; 2,0 К;  
II ступень холодного турбокомпрессора



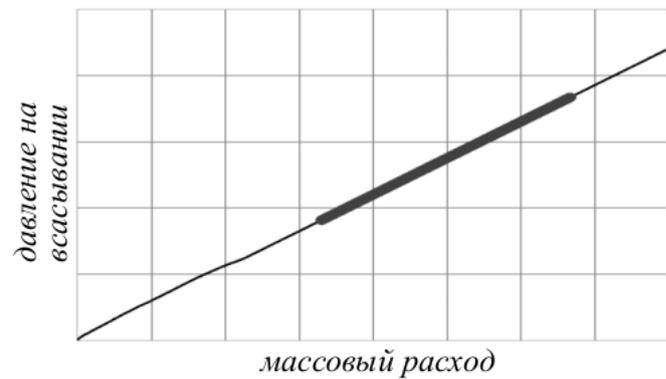
**Рис. 13в.** Холодный цикл; 1,91 К;  
III ступень холодного турбокомпрессора



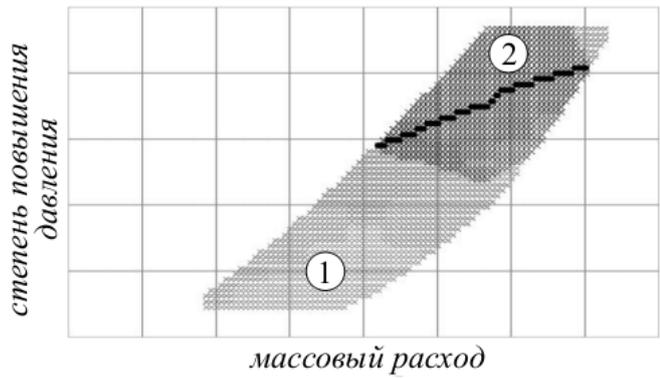
**Рис. 14в.** Гибридный цикл; 2,0 К;  
III ступень холодного турбокомпрессора



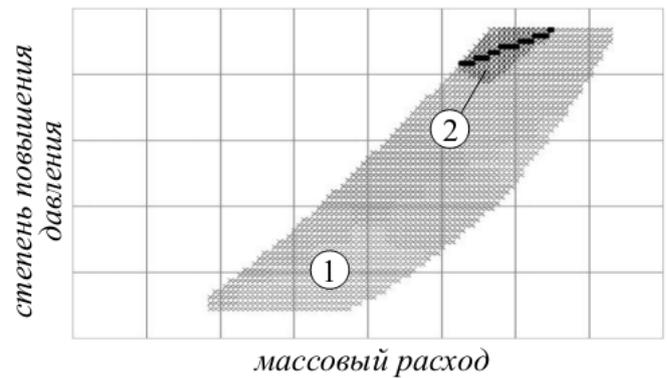
**Рис. 13г.** Холодный цикл; 1,91 К;  
IV ступень холодного турбокомпрессора



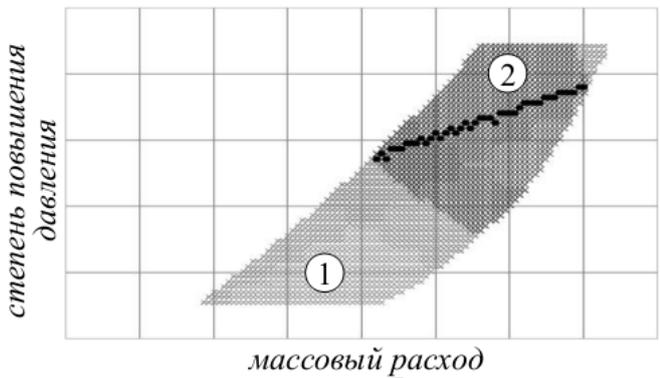
**Рис. 14г.** Гибридный цикл; 2,0 К;  
объемный вакуум-компрессор



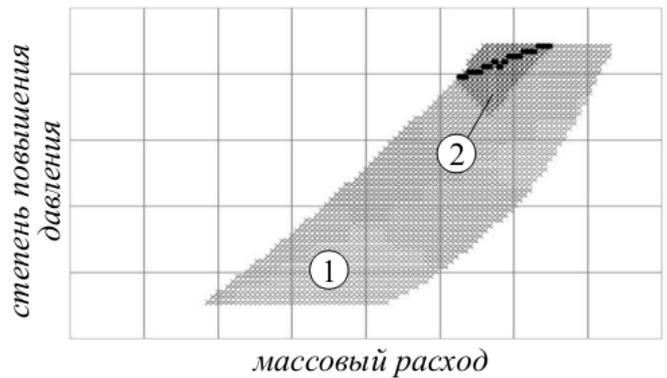
**Рис. 15а. Гибридный цикл; 1,9 К;  
I степень холодного турбокомпрессора**



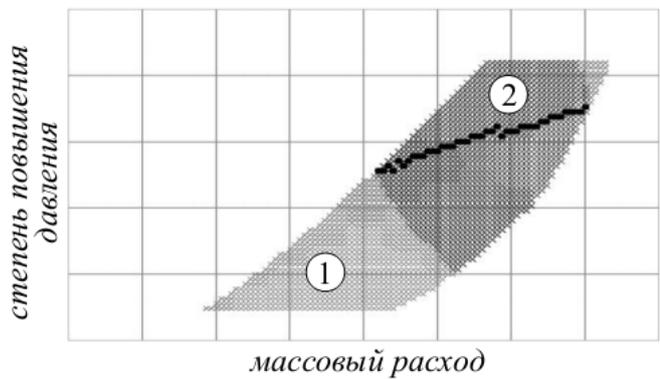
**Рис. 16а. Гибридный цикл; 1,8 К;  
I степень холодного турбокомпрессора**



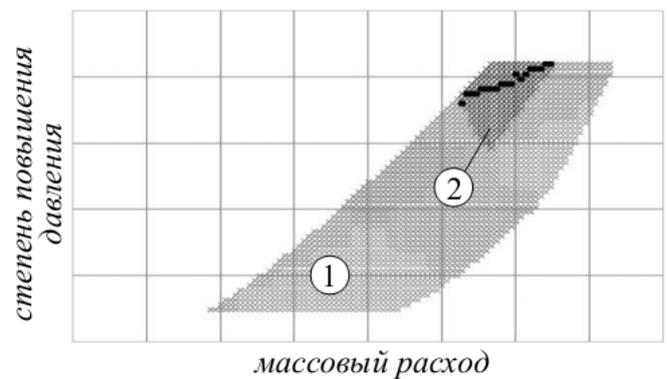
**Рис. 15б. Гибридный цикл; 1,9 К;  
II степень холодного турбокомпрессора**



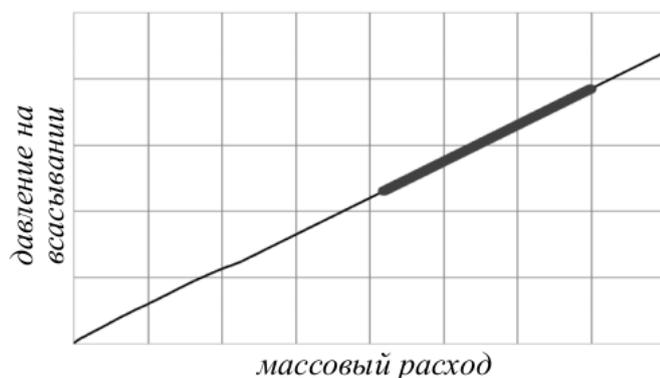
**Рис. 16б. Гибридный цикл; 1,8 К;  
II степень холодного турбокомпрессора**



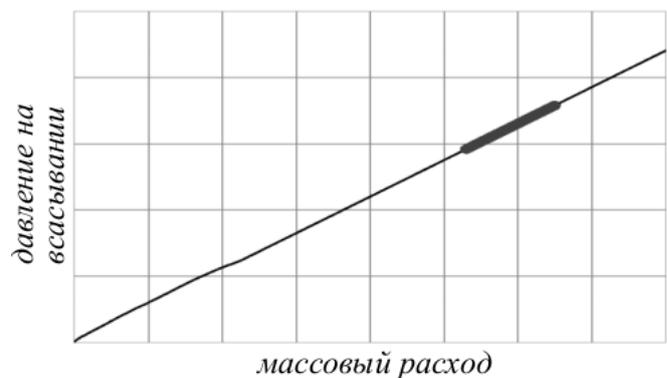
**Рис. 15в. Гибридный цикл; 1,9 К;  
III степень холодного турбокомпрессора**



**Рис. 16в. Гибридный цикл; 1,8 К;  
III степень холодного турбокомпрессора**



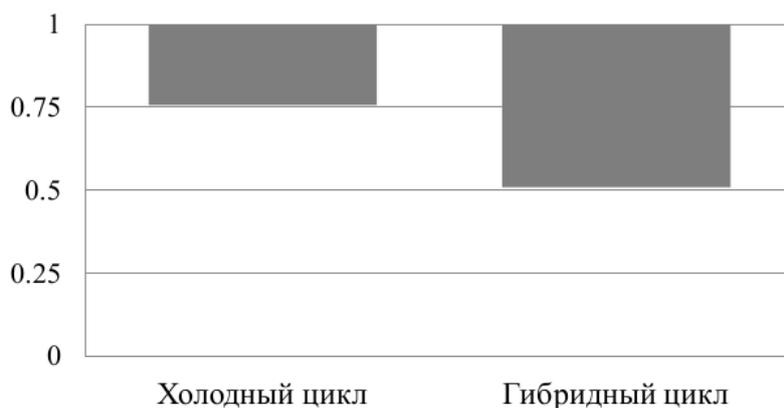
**Рис. 15г. Гибридный цикл; 1,9 К;  
объемный вакуум-компрессор**



**Рис. 16г. Гибридный цикл; 1,8 К;  
объемный вакуум-компрессор**

Данные графики показывают низкую «гибкость» цикла, основанного на холодном сжатии по отношению как к тепловой нагрузке, так и к температурному уровню. Ввиду отсутствия в системе с холодным сжатием элемента, деформирующего рабочее поле системы холодных компрессоров, рабочие характеристики последних находятся в пределах ограниченного диапазона значений степени повышения давления. Это определяет ограничение диапазона рабочих параметров холодных компрессоров по массовому расходу, а, значит, и по тепловой нагрузке.

Возможность понижения тепловой нагрузки гелиевого испарителя определяется, главным образом, способностью холодных компрессоров к поддержанию пониженного массового расхода относительно расчетных характеристик. Повышение тепловой нагрузки относительно расчетных параметров возможно лишь в небольшом диапазоне, определяемом коэффициентами запаса по теплообменным поверхностям теплообменных аппаратов, поэтому способность криогенной системы к повышению тепловой нагрузки не учитывается. На рис. 17 представлена сравнительная диаграмма диапазонов тепловых нагрузок холодного и гибридного циклов без использования дополнительных методов регулирования (байпасирования или резистивного нагрева).



**Рис. 17. Диаграмма диапазонов тепловых нагрузок холодного и гибридного циклов без дополнительного регулирования**

Двукратное превышение рабочего диапазона массового расхода гибридной системы над системой с холодным циклом означает более высокую эффективность гибридного цикла при понижении тепловой нагрузки криогенной системы, так как выход тепловой нагрузки и массового расхода за пределы минимальных значений (51 % от номинального для гибридного цикла и 76 % от номинального для холодного цикла) выводит рабочие параметры холодных компрессоров в область помпажа. Для обратного вывода рабочих параметров холодных компрессоров из области помпажа необходимо применение одного из рассмотренных методов регулирования – байпасирования или введения дополнительной тепловой нагрузки на гелиевый испаритель. Таким образом, применение гибридного цикла позволяет снизить необходимость в неэффективных методах регулирования (байпасировании или дополнительном нагреве), что повышает общую эффективность криогенной системы на режимах пониженной тепловой нагрузки.

С другой стороны, анализ графиков, изображенных на рисунках 11а-г, 12а-г, 13а-г и 14а-г, 15а-г, 16а-г показывает низкую способность цикла с холодным сжатием к понижению рабочей температуры гелиевого испарителя. Уже при температурном уровне 1,91 К рабочие области холодных компрессоров уменьшаются в несколько раз, приближаясь к границе

максимальной степени повышения давления. Дальнейшее понижение температуры в гелиевом испарителе приведет к повышению общей степени повышения давления системы холодных компрессоров до недостижимо высокого значения.

Наличие в системе с гибридным циклом объемного компрессора с характеристикой напорности, зависящей от массового расхода, позволяет деформировать поля рабочих характеристик холодных компрессоров и переместить их в область с более низким значением общей степени повышения давления. Таким образом, наличие в системе сжатия гелия низкого давления элемента с характеристикой степени повышения давления, зависящей от массового расхода, позволяет улучшить условия работы холодных компрессоров, позволяя достичь более низкого давления на всасывании холодного компрессора первой ступени. Это, в свою очередь, означает возможность снижения температурного уровня в гелиевом испарителе путем интенсификации процесса откачки насыщенных паров гелия.

## **6 СТРАТЕГИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОМ СЖАТИЯ ГИБРИДНОГО ЦИКЛА**

Стратегия системы контроля процессом сжатия гибридного цикла включает в себя:

- стратегию процесса запуска системы холодных и теплого компрессоров;
- регулирование с целью изменения температурного уровня в гелиевом испарителе;
- регулирование при изменении тепловой нагрузки на гелиевый испаритель;

Регулирование и управление системой холодных компрессоров осуществимо путем изменения единственного рабочего параметра – скорости вращения ротора каждого из компрессоров. Остальные характеристики рабочего режима всех компрессоров однозначно определяются следующими внешними параметрами:

- тепловой нагрузкой на гелиевый испаритель;
- требуемым температурным уровнем в гелиевом испарителе.

Тепловая нагрузка на гелиевый испаритель однозначно определяет потребный массовый расход откачиваемых паров гелия, по данному параметру определяется давление на всасывании объемного компрессора (давление на нагнетании последней ступени холодного компрессора). Требуемый температурный уровень в гелиевом испарителе определяет давление паров гелия над зеркалом жидкости в испарителе, данное давление обеспечивается на всасывании первой ступени холодного компрессора. По полученному значению общей степени повышения давления в системе холодных компрессоров проводится оптимизация режимов работы каждого из компрессоров (рис. 18).

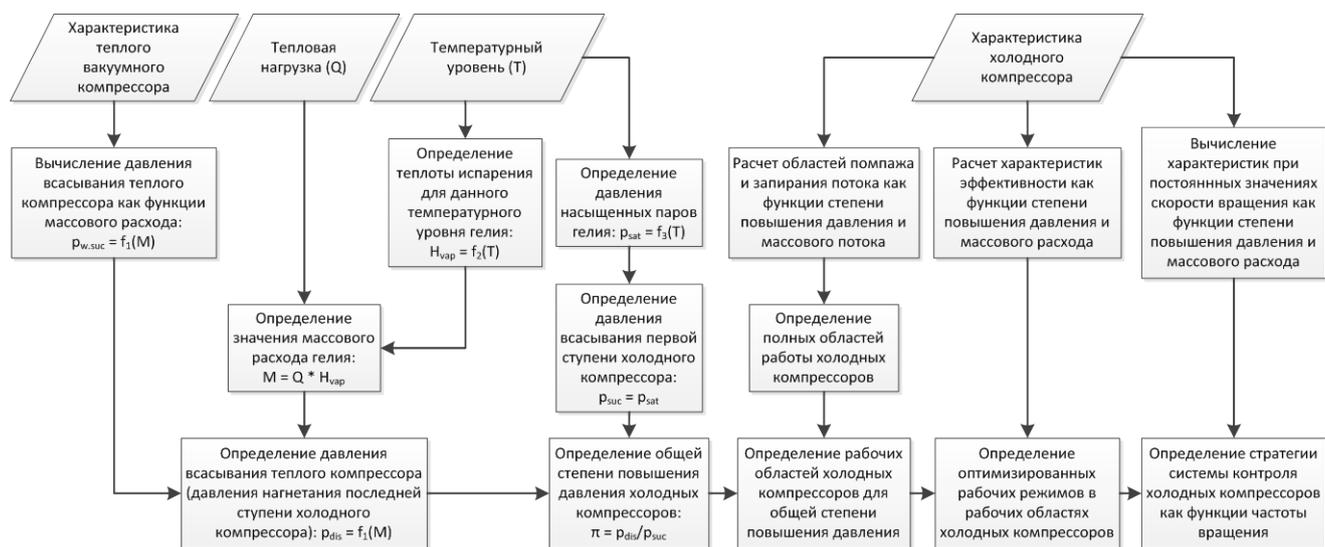


Рис. 18. Схема расчета стратегии системы контроля холодными компрессорами

## 7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены различные криогенные циклы для получения гелия низких температур. В этих циклах необходимо применение холодного сжатия ввиду высоких значений потребного объемного расхода гелия из-за его низкой плотности при высоких температурах. С использованием разработанной стратегии системы сжатия гелия низкого давления выполнена симуляция процессов сжатия при различных значениях параметров данных процессов. Результаты симуляции показали лучшую приспособленность гибридного цикла к требованиям разрабатываемой криогенной системы для испытательного комплекса Национальной Ускорительной Лаборатории имени Энрико Ферми для тестирования криомодулей. Использование гибридного цикла имеет определенные преимущества, связанные с более высокой его эффективностью и более низкими эксплуатационными затратами по сравнению с холодным циклом.

## 8 Список литературы

1. Status and Plans for a SRF Accelerator Test Facility at Fermilab / J. Leibfritz, R. Andrews, K. Carlson, B. Chase, M. Church, E. Harms, A. Klebaner, M. Kucera, S. Lackey, A. Martinez, S. Nagaitsev, L. Nobrega, P. Piot, J. Reid, M. Wendt, S. Wesseln // Proceedings of the 2011 Particle Accelerator Conference. New York, 2011. P. 118-120.
2. Measurements of SCRF Cavity Dynamic Heat Load in Horizontal Test System / B. DeGraff, R. Bossert, L. Pei, W. Soyars; J. Weisend [ed.] // Advances in Cryogenics Engineering. Melville : American Institute of Physics, 2008. Vol. 55. P. 609-614.
3. Lebrun P., Taviani L., Claudet G. Development of large-Capacity Refrigeration at 1.8 K for the Large Hadron Collider at CERN. LHC Division, CERN. Geneva, Switzerland, 1996.
4. J.-L. Laclare, et al. Large Cryogenic Systems at 1.8 K / Taviani L. [ed.] // EPAC 2000: Proceedings. Vienna : Austrian Academy of Sciences Press, 2002. P. 212-216.

---

**Development of a low-pressure helium compression control system strategy**

# 02, February 2013

DOI: **10.7463/0213.0539096**

Nagimov R.R.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation  
[nagimov@inbox.com](mailto:nagimov@inbox.com)

Cryogenics is now widely used in large accelerator projects using applied superconductivity. Economic considerations require an increase in performance of superconducting devices. One way to achieve this is by lowering their operating temperature and cooling with superfluid helium. For this reason, large cryogenic systems operating at 1.8 K and capable of producing refrigeration capacity in the kW range, have to be developed and implemented. These cryogenic systems require large pumping capacity at very low pressure using integral cold compression or mixed cold-warm compression. The author compares and describes different cooling methods using cold and hybrid cycles along with cycle operational capabilities, and reviews a developed low-pressure helium compression control strategy for these cycles.

---

**Publications with keywords:** helium refrigerators, cold compressors, cryogenic cycles, control systems, hybrid cycles, superconductivity  
**Publications with words:** helium refrigerators, cold compressors, cryogenic cycles, control systems, hybrid cycles, superconductivity

---

## References

1. Leibfritz J., Andrews R., Carlson K., Chase B., Church M., Harms E., Klebaner A., Kucera M., Lackey S., Martinez A., Nagaitsev S., Nobrega L., Piot P., Reid J., Wendt M., Wesseln S. Status and Plans for a SRF Accelerator Test Facility at Fermilab. *Proc. of the 2011 Particle Accelerator Conference*. New York, 2011, pp. 118-120.
2. DeGraff B., Bossert R., Pei L., Soyars W., eds; Weisend J. Measurements of SCRF Cavity Dynamic Heat Load in Horizontal Test System. *Advances in Cryogenics Engineering*. Melville : American Institute of Physics, 2008, vol. 55, pp. 609-614.
3. Lebrun P., Tavian L., Claudet G. *Development of large-Capacity Refrigeration at 1.8 K for the Large Hadron Collider at CERN*. LHC Division, CERN. Geneva, Switzerland, 1996.
4. J.-L. Laclare, et al.; Tavian L., ed. Large Cryogenic Systems at 1.8 K. *Proc. of the EPAC 2000*. Vienna, Austrian Academy of Sciences Press, 2002, pp. 212-216.