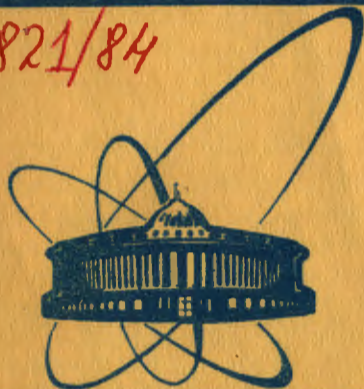


2821/84



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

8-84-165 et

Н.Н.Агапов

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
И ОПТИМИЗАЦИЯ
КРИОГЕННЫХ ГЕЛИЕВЫХ СИСТЕМ
С САТЕЛЛИТНЫМИ РЕФРИЖЕРАТОРАМИ

1984

При криостатировании крупных ускорителей со сверхпроводящими магнитами наиболее предпочтительны криогенные системы /1-3/ из равномерно расположенных по периметру ускорителя рефрижераторов с избыточным обратным потоком /сателлитов/. Они работают за счет жидкого гелия, получаемого от центрального ожижителя, что позволяет в каждом из таких рефрижераторов обойтись только одним детандером или не иметь их вообще. В этом случае рефрижератор, состоящий, по существу, лишь из теплообменника и сборника жидкого гелия, обладает высокой надежностью и не требует обслуживания; менее надежные и требующие обслуживания элементы криогенной системы сосредоточены на центральном ожижителе.

Вопросы применения рефрижераторов с избыточным обратным потоком уже рассматривались /4,5/. Наиболее подробный термодинамический анализ сателлитов опубликован в /6/. В указанных работах приводятся сведения об оптимальных параметрах сателлитных рефрижераторов, удельных расходах энергии и необходимых поверхностях теплообменников, однако эти сведения нельзя считать достаточно полными в силу ряда причин.

Так, в качестве одного из критериев при сопоставлении различных вариантов обычно выбиралась минимальная разность температур между потоками в теплообменнике сателлита. Между тем при одинаковой минимальной разности температур необходимая поверхность теплообмена существенно зависит от соотношения потоков в этом теплообменнике, увеличиваясь по мере уменьшения количества подводимого жидкого гелия. Следовательно, сравниваемые варианты будут действительно приведены в сопоставимый вид только в том случае, если каждому из них будет соответствовать одинаковая поверхность теплообмена.

Недостаточно внимания пока уделено анализу максимально надежных дроссельных /без детандеров/ сателлитов, хотя именно их применение наиболее последовательно проводит общую идею: убрать с периметра ускорителя элементы криогенной системы, которые могут выйти из строя, и переместить их на центральную станцию. Естественно, дроссельные схемы имеют больший расход энергии, однако некоторый перерасход ее может быть скомпенсирован повышением надежности и снижением затрат на установку и ремонт детандеров. Кроме того, при поломке детандера сателлит должен быть переведен в дроссельный режим, т.е. анализ такого режима необходим и в том случае, когда сателлит имеет в своем составе детандер.

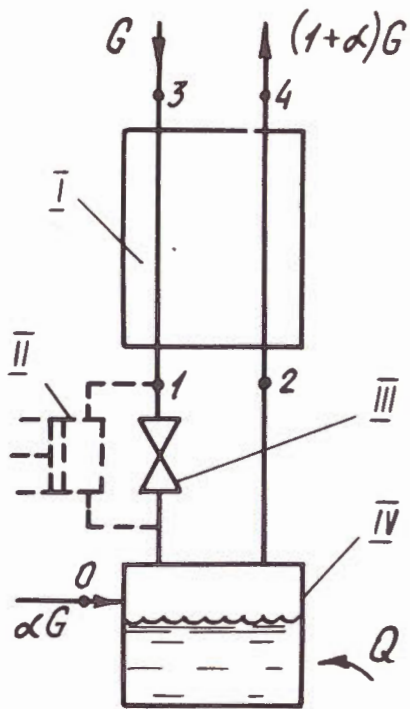


Рис.1. Схема сателлитного рефрижератора. I - теплообменник, II - детандер, III - дроссель, IV - сборник жидкого гелия.

Анализ схем сателлитов, как правило, проводился без учета необходимости циркуляции гелия в криостатируемом объекте. Однако расчеты показывают, что учет взаимосвязи параметров сателлита и циркуляционного контура может существенно сказаться на результатах такого анализа.

Цель данной работы - провести термодинамический анализ рефрижераторов с избыточным обратным потоком с учетом вышеперечисленных недостатков.

Схема сателлитного рефрижератора показана на рис.1. Количество вырабатываемого холода определяется из энергетического баланса:

$$Q = G[i_2 - i_1 + \Delta i_{ag} \eta_g + \alpha(i_2 - i_0)], \quad /1/$$

где G - расход сжатого гелия в прямом потоке теплообменника; i_0, i_1, i_2 - энтальпии в соответствующих точках системы; Δi_{ag} - адиабатная разность энтальпий на входе и выходе из детандера; η_g - адиабатный к.п.д. детандера; α - относительное количество жидкого гелия, подаваемого в сателлит. Из /1/ следует, что удельный расход жидкого газа $g = G/Q$ можно определить как

$$g = \frac{1}{i_2 - i_1 + \Delta i_{ag} \eta_g + \alpha(i_2 - i_0)}. \quad /2/$$

В дроссельном сателлите $\eta_g = 0$ и, следовательно,

$$g = \frac{1}{i_2 - i_1 + \alpha(i_2 - i_0)}. \quad /2a/$$

Величину теплообменной поверхности сателлита удобно характеризовать /6/ комплексом kF/Q , где k - коэффициент теплопередачи,

F - поверхность теплообменника. Произведение kF определяется выражением

$$kF = \int \frac{Q di}{i \Delta T}, \quad /3/$$

где: i - энтальпия прямого потока в промежуточном сечении теплообменника; ΔT - разность температур между прямым и обратным потоками в этом сечении. Из /3/ следует, что

$$\frac{kF}{Q} = g \int \frac{di}{i \Delta T}. \quad /4/$$

Расчет проводится методом последовательных приближений. Из /2/ или /2a/ вычисляется величина g удельного расхода сжатого газа для выбранного значения температуры в точке 1. Далее путем численного интегрирования /4/ с использованием таблиц термодинамических свойств гелия /7/ определяется комплекс kF/Q . Если его величина не соответствует принятой в исходных данных, расчет повторяется при новом значении T_1 .

Пример получаемых таким образом результатов представлен на рис.2, где дана зависимость удельного расхода сжатого газа от относительного количества жидкого гелия, подаваемого в сателлит. Приведенный график имеет два участка: пологий и крутой. В области значений α , больших некоторого граничного значения $\alpha_{гр}$, температура перед дросселем асимптотически приближается к температуре отводимых из сборника паров ($T_1 \rightarrow T_2$). При этом изменение T_1 в зависимости от α становится несущественным. Следовательно, разность энтальпий ($i_2 - i_1$) в знаменателе выражения /2a/ остается практически постоянной, а изменение удельного расхода сжатого газа g обусловлено только изменением α . Если же α уменьшается в области $\alpha < \alpha_{гр}$, температура перед дросселем начинает быстро возрастать* /значения T_1 указаны на рисунке/. В таком случае рост удельного расхода сжатого газа вызван не столько изменением величины α , сколько уменьшением разности энтальпий ($i_2 - i_1$) в уравнении /2a/.

На рис.3 представлены зависимости $g = f(\alpha)$ для дроссельных сателлитов и сателлитов с детандерами при различных давлениях в прямом потоке. К.п.д. детандера в уравнении /2/ $\eta_g = 0,8$.

* Это объясняется тем, что при $\alpha < \alpha_{гр}$ минимальная разность температур достигается уже не на холодном конце теплообменника, а в некотором промежуточном сечении, положение которого определяется равенством теплоемкостей прямого и обратного газовых потоков $G c_p^{пр} = G(1 + \alpha) c_p^{обр}$ т.е. в этом сечении /6/ $c_p^{пр}/c_p^{обр} = 1 + \alpha$.

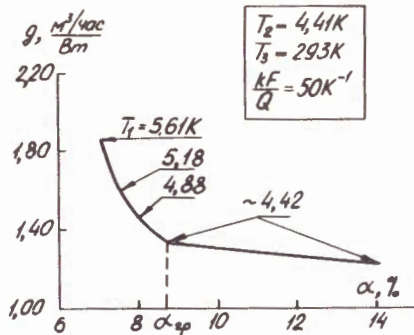
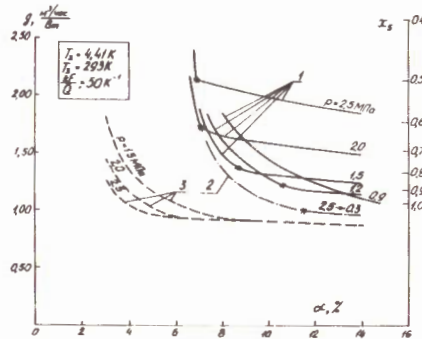


Рис.2. Зависимость удельного расхода сжатого газа от относительного количества потребляемого жидкого гелия для дроссельного сателлита при давлении в прямом потоке 1,5 МПа.

Рис.3. Удельный расход сжатого газа в зависимости от относительного количества подаваемого в сателлит жидкого гелия при различных давлениях в прямом потоке. 1 - сателлит с простым дросселированием; 2 - с промежуточным дросселированием; 3 - детандерный сателлит при $\eta_g = 0,8$. * - точки с минимумом удельного расхода энергии /см.рис.5/.



В дроссельных сателлитах с понижением давления от 2,5 до 1,2 МПа удельный расход сжатого газа существенно уменьшается. Это обусловлено ростом разности энтальпий ($i_2 - i_1$) в выражении /2а/. При дальнейшем понижении давления в области $p < 1,2$ МПа удельный расход сжатого газа, наоборот, увеличивается, что объясняется ростом температуры перед дросселем вследствие неблагоприятного соотношения теплоемкостей в прямом и обратном потоках. Эффективность сателлитного рефрижератора в таком случае можно повысить путем введения промежуточного дросселирования. На рисунке показана зависимость, полученная при повышенном гидравлическом сопротивлении по прямому потоку в холодной части теплообменника. Процесс непрерывного дросселирования происходит от 2,5 до 0,3 МПа.

Наименьший удельный расход сжатого газа достигается с применением детандера, размещенного в соответствии с рис.1. Кроме того, как видно из рис.3, в схеме с детандером уменьшается и количество потребляемого жидкого гелия. Это уменьшение тем существенней, чем выше давление в прямом потоке сателлита.

Удельные затраты энергии в криогенной системе с сателлитными рефрижераторами складываются из затрат на сжатие газа в компрессоре ϵ_k и на получение жидкого гелия в центральном ожижителя

$$\epsilon = \epsilon_k + \epsilon_{жГ}$$

15/

Составляющие затрат определяются соотношениями

$$\epsilon_k = \frac{g R T_{oc}}{\eta_k} \ln \frac{P_{вых}}{P_{вх}}$$

16/

и

$$\epsilon_{жГ} = \frac{a \epsilon e_0}{\eta_{жГ}}$$

17/

где: R - индивидуальная газовая постоянная гелия; T_{oc} - температура окружающей среды; $P_{вх}$, $P_{вых}$ - давления на входе и выходе компрессора; η_k - изотермический к.п.д. компрессора; e_0 - эксергия жидкого гелия; $\eta_{жГ}$ - к.п.д. ожижителя.

На рис.4 представлены удельные энергозатраты в дроссельном сателлите и их структура в зависимости от α . Отметим, что минимум удельных энергозатрат располагается вблизи точки $\alpha = \alpha_{гр}$.

На рис.5 показаны зависимости $\epsilon = f(\alpha)$ для установок с простым дросселированием, промежуточным дросселированием, а также для детандерных сателлитов.

Рис.4. Структура удельных энергозатрат в дроссельном сателлите при давлении в прямом потоке 1,5 МПа.

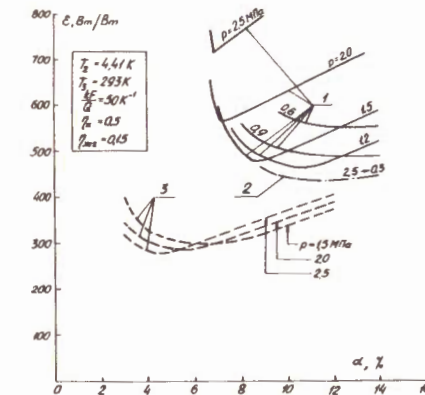
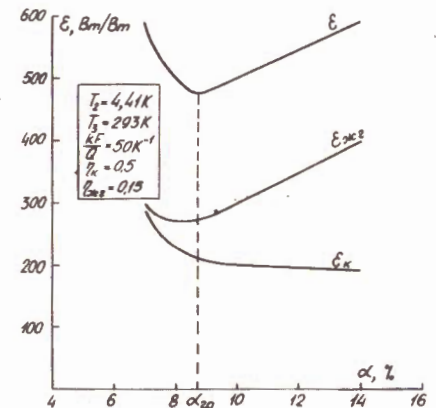


Рис.5. Удельный расход энергии в зависимости от относительного количества подаваемого в сателлит жидкого гелия при различных давлениях в прямом потоке. 1 - сателлит с простым дросселированием; 2 - с промежуточным дросселированием; 3 - детандерный сателлит при $\eta_g = 0,8$.

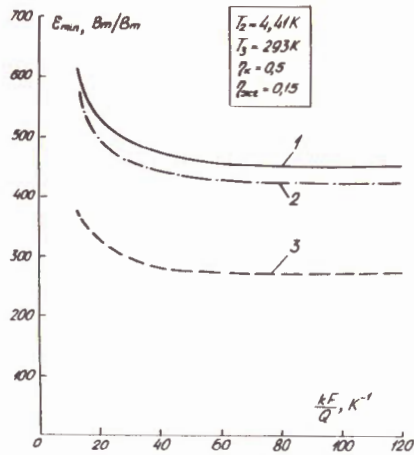


Рис.6. Минимальный удельный расход энергии в зависимости от площади поверхности теплообменника сателлита. 1 - сателлит с простым дросселированием; 2 - с промежуточным дросселированием; 3 - детандерный сателлит при $\eta_g = 0,8$.

Для принятых значений к.п.д. компрессора и ожижителя гелия ($\eta_k = 0,5$ и $\eta_{жг} = 0,15$) сателлит с простым дросселированием имеет наименьшие удельные энергозатраты при давлении в прямом потоке 1,2 МПа и относительном количестве потребляемого гелия 10,6%.

При этом $\epsilon_{\min}^{\text{дрос}} = 460$ Вт/Вт. Промежуточное дросселирование уменьшает удельные энергозатраты до 435 Вт/Вт. В установке с детандером оптимум достигается при $p = 2,5$ МПа и $\alpha = 4,7\%$, а удельные энергозатраты снижаются до величины $\epsilon_{\min}^{\text{дет}} = 275$ Вт/Вт. Отношение $\epsilon_{\min}^{\text{дрос}} / \epsilon_{\min}^{\text{дет}} = 1,67$.

Все приведенные выше результаты соответствуют величине $kF/Q = 50$ К⁻¹. После проведения аналогичных оптимизационных расчетов при различных значениях комплекса kF/Q получены зависимости $\epsilon_{\min} = f(kF/Q)$, показанные на рис.6. Из них следует, что величина комплекса $kF/Q = 50$ К⁻¹ близка к оптимальной. Действительно, уменьшение этого комплекса в области $kF/Q < 50$ К⁻¹ существенно увеличивает удельные энергозатраты, а увеличение при $kF/Q > 50$ К⁻¹ не приводит к заметному их изменению.

Обсудим теперь, каким образом скажется на результатах проведенного термодинамического анализа необходимость циркуляции гелия в криостатируемом объекте. При этом ограничимся только циркуляцией двухфазного гелия как наиболее перспективной с точки зрения криостатирования сверхпроводящих магнитов ускорителей. Возможность применения двухфазного гелия экспериментально доказана [8,9].

На рис.7 а,б,в показаны схемы с однократной циркуляцией, в которых на криостатируемый объект направляется то же количество гелия, что и в прямом потоке сателлитного рефрижератора. Энергетический баланс можно записать в виде

$$Q = G(i_5 - i_6), \quad /8/$$

откуда

$$g = \frac{1}{i_5 - i_6} \approx \frac{1}{ix_5}, \quad /9/$$

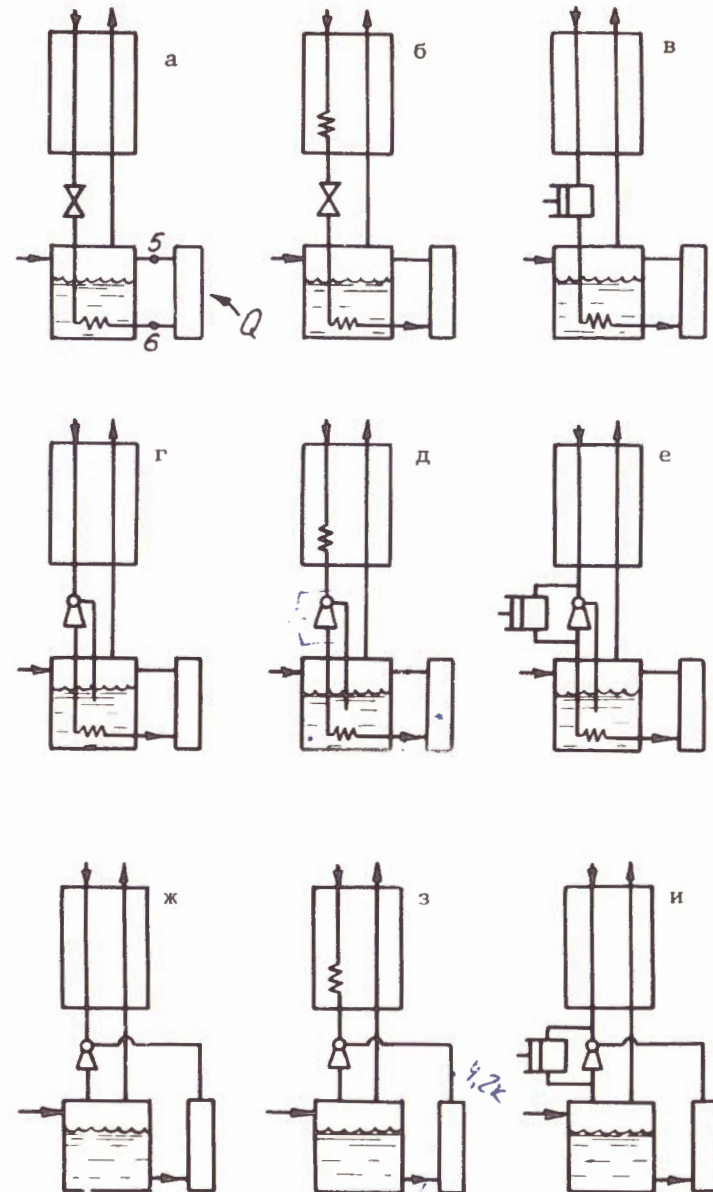


Рис.7. Схемы циркуляции гелия в криостатируемом объекте. Циркуляция: а,б,в - однократная; г,д,е - эжектором с жидким гелием в инжектируемом потоке; ж,з,и - эжектором с инжектированием парожидкостного потока. Сателлит: а,г,ж - без детандера и промежуточного дросселирования; б,д,з - с промежуточным дросселированием; в,е,и - с расширением в детандере.

где: i_5 и i_6 - энтальпии потока гелия на выходе из объекта и входе; r - теплота парообразования; x_5 - массовое паросодержание потока на выходе из объекта. Таким образом, паросодержание потока на выходе из объекта и удельный расход сжатого газа в схемах с однократной циркуляцией взаимосвязаны. На рис.3 справа на вертикальной оси нанесены значения паросодержания x_5 на выходе из объекта, соответствующие величинам удельного расхода сжатого газа, указанным на левой вертикальной оси. Гидравлическое сопротивление объекта принималось равным 0,02 МПа.

При оптимальных параметрах дроссельного сателлита $p = 1,2$ МПа, $g = 1,2 \frac{\text{м}^3/\text{час}}{\text{Вт}}$, $a = 0,106$ / паросодержание на выходе из объекта составляет 0,88. При промежуточном дросселировании и применении детандера в точках с минимумом удельных энергозатрат параметры потока на выходе из криостатируемого объекта находятся в области перегретого пара. Если повышение температуры циркулирующего гелия недопустимо или, более того, по условиям работы объекта требуется обеспечить паросодержание на выходе < 1 , приходится увеличивать удельный расход газа g , удаляясь от оптимальной точки. Естественно, это сопровождается ростом удельных затрат энергии. Так, при паросодержании на выходе из объекта, равном 0,9, в соответствии с данными рис.8, в детандерной схеме энергозатраты возрастут с 275 до 305 Вт/Вт, а при промежуточном дросселировании - с 435 до 450 Вт/Вт.

Если окажется необходимым дальнейшее уменьшение паросодержания потока на выходе из объекта*, то отклонение от оптимума будет настолько существенным, что повлечет за собой значительный перерасход энергии. Например, при $x_5 = 0,7$ в детандерной схеме энергозатраты увеличатся на 27%, в дроссельной - на 15% /рис.8/. Конечно, в таких случаях следует уменьшить количество циркулирующего в объекте гелия по сравнению с прямым потоком сателлита. Наиболее надежно и просто это сделать при помощи эжектора /10,11/. Соответствующие схемы показаны на рис.7 г-и.

Для оценки достижимых параметров эжектора применялась методика /12/, основанная на применении понятия об адиабатном к.п.д. этого аппарата:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{u \Delta i_{\text{н}}}{\Delta i_{\text{р}}} \quad /10/$$

где: u - коэффициент инжекции /отношение расходов инжектируемой и рабочей сред/; $\Delta i_{\text{н}}$ - разность энтальпий в процессе изоэнтроп-

* В /9/ описан крупный сверхпроводящий магнит с циркуляцией двухфазного гелия. Эксперименты показали, что устойчивая его работа возможна только при паросодержании потока на выходе меньше, чем 0,75.

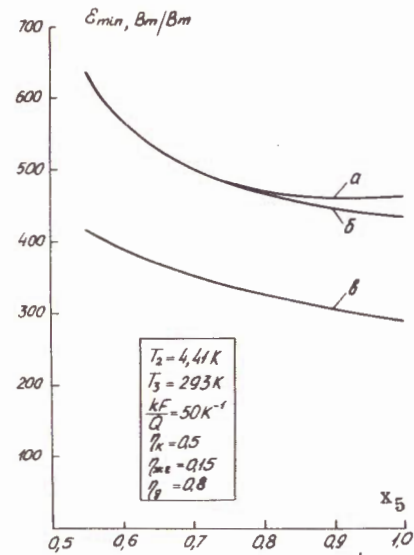


Рис.8. Удельный расход энергии в схемах с однократной циркуляцией /рис.7 а,б,в/ в зависимости от паросодержания потока на выходе из криостатируемого объекта с гидравлическим сопротивлением 0,02 МПа.

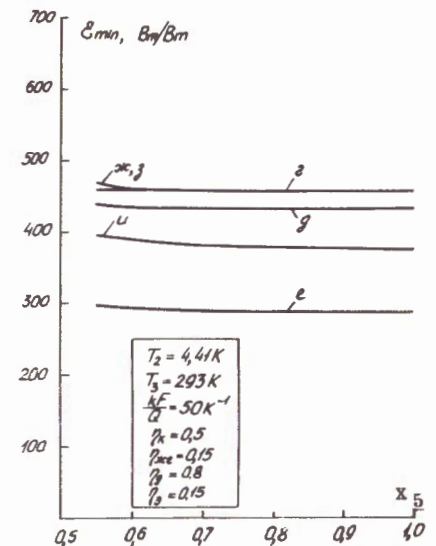


Рис.9. Удельный расход энергии в схемах с циркуляцией эжектором /рис.7 е-и/ в зависимости от паросодержания двухфазного гелия на выходе из криостатируемого объекта с гидравлическим сопротивлением 0,02 МПа.

ного сжатия инжектируемого потока до давления смешанного потока; $\Delta i_{\text{р}}$ - разность энтальпий в процессе изоэнтропного расширения рабочего потока до давления смешанного потока. В соответствии с результатами /13/ величина к.п.д. эжектора принималась $\eta_{\text{э}} = 0,15$.

Результаты расчета схем с использованием эжектора представлены на рис.9, из которого видно, что для схем с подачей жидкого гелия в инжектируемый поток /рис.7 г,д,е/ оптимальные параметры сателлита могут быть обеспечены при значительном уменьшении x_5 : в интервале $x_5 = 0,5 \div 1,0$ удельные энергозатраты практически постоянны.

В схемах /рис.7 ж,з,и/ эжектор обеспечивает не только циркуляцию необходимого количества гелия, но и снижение температуры циркулирующего потока. Температура двухфазного гелия, проходящего в криостатируемом объекте, не превышает температуры жидкости в сборнике. При гидравлическом сопротивлении объекта 0,02 МПа максимальная температура потока ниже, чем в других схемах, на величину около 0,2 К. Однако при этом эжектор должен перерабатывать весь поток, выходящий из объекта, тогда как в схе-

мах рис.7 г,д,е - только часть. Кроме того, инжектирование потока жидкости требует меньших затрат, вследствие меньшей плотности парожидкостной среды. Поэтому схемы рис.7 ж,з,и имеют большие удельные энергозатраты по сравнению со схемами рис.7 г,д,е.

Даже при использовании детандера удельные затраты энергии /рис.9/ возрастают до величины $375 \div 400$ Вт/Вт, т.к. значительная часть прямого потока сателлита не поступает в детандер, а расширяется в эжекторе. Схема с эжектором и промежуточным дросселированием /рис.7з/ имеет те же энергозатраты, что и схема с эжектором и простым дросселированием /рис.7ж/: для обеспечения необходимой циркуляции приходится поднимать давление перед эжектором так, что в результате промежуточное дросселирование перестает приносить заметный эффект.

Проведенный термодинамический анализ гелиевых криогенных систем с сателлитными рефрижераторами служит основой для последующей технико-экономической оптимизации схемных решений, в которой нужно учитывать не только разницу в затратах энергии, соответствующих различным вариантам, но и изменение капитальных затрат и эксплуатационных расходов, а также достижение необходимого уровня надежности. Наиболее существенные для технико-экономического анализа схем результаты, полученные в данной работе, заключаются в следующем.

1. Оптимальная поверхность теплообменника сателлитного рефрижератора определяется величиной комплекса $kF/Q \approx 50 \text{ K}^{-1}$.

2. В схеме с простым дросселированием при минимальных затратах энергии удельный расход сжатого газа в прямом потоке сателлита и жидкого гелия для подливки в сателлит составляет, соответственно, $1,2 \frac{\text{м}^3/\text{ч}}{\text{Вт}}$ и $0,19 \frac{\text{л}/\text{ч}}{\text{Вт}}$.

3. Введение промежуточного дросселирования в прямом потоке теплообменника сателлита уменьшает удельные затраты сжатого газа на 18%, а жидкого гелия - на 11%.

4. Использование в схеме сателлита детандера уменьшает по сравнению с простым дросселированием необходимое количество сжатого газа в 1,25 раза, а жидкого гелия - в 2,8 раза.

5. Применение в схеме сателлита эжектора с подачей жидкости в инжектируемый поток позволяет существенно уменьшить паросодержание двухфазного гелия на выходе из криостатируемого объекта без неизбежного в схемах с однократной циркуляцией увеличения удельных затрат сжатого газа, жидкого гелия и энергии.

6. Снижение с помощью эжектора температуры двухфазного гелия, циркулирующего в криостатируемом объекте, в схеме с детандером связано со значительным увеличением удельных энергозатрат; в схеме без детандера и промежуточного дросселирования подобный переход на более низкую температуру криостатирования дополнительных энергозатрат не требует.

Автор выражает глубокую благодарность профессору А.Г.Зельдовичу за полезные советы при обсуждении результатов расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А.И. В кн.: Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т.1, с.115.
2. A report on the design of the Fermilab Superconducting accelerator. May, 1979, Fermilab, Batavia, Illinois.
3. Baldin A.M. et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1983, vol.N5-30, No.4, p.3247.
4. Беляков В.П. и др. Химическое и нефтяное машиностроение, 1980, № 7, с.5.
5. Иньков А.П., Коваленко В.Д., Морковкин И.М. В кн.: Процессы в криогенных установках и системах. Сб.научн.трудов. Изд. НПО "Криогенмаш". Балашиха, 1981, с.14.
6. Агеев А.И., Шамичев А.Н. Препринт ИФВЭ 82-159, Серпухов, 1982.
7. Mc Carty, R.D. Thermophysical Properties of Helium-4 from 2 to 1500 K with Pressures to 1000 Atmospheres - NBS Technical Note 631, Boulder, 1972.
8. Агапов Н.Н. и др. ПТЭ, 1981, № 2, с.196.
9. Morpurgo M. Cryogenics, 1979, v.19, p.411.
10. Агапов Н.Н. и др. В кн.: Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Изд.ИФВЭ, Серпухов, 1977, т.2, с.241.
11. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике /под ред. А.Г.Зельдовича/. Энергоиздат, М., 1982.
12. Мартынов А.В., Агеев А.И. В кн.: Исследование теплоэнергетических и низкотемпературных процессов. Труды Московского энергетического института. Изд-во МЭИ, М., 1974, вып.186, с.154.
13. Agapov N.N. et al. Cryogenics, 1978, vol.18, p.491; 1980, vol.20, p.200.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 марта 1983 года

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D2,4-83-179	Труды XV Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Дубна, 1982.	4 р. 80 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Агапов Н.Н. 8-84-165
Термодинамический анализ и оптимизация криогенных гелиевых систем с спутниковыми рефрижераторами

Рассчитаны оптимальные по энергозатратам режимы криогенных гелиевых систем с спутниковыми рефрижераторами для криостатирования сверхпроводящих магнитов ускорителей. Приводятся сведения об удельных затратах энергии на получение холода, расходах сжатого газа и жидкого гелия в спутниках. Анализируются схемы спутниковых рефрижераторов с расширением в детандере, однократным и промежуточным дросселированием. Сопоставление различных схем производится при одинаковой поверхности теплообменников спутниковых рефрижераторов. Определена оптимальная величина этой теплообменной поверхности. Рассмотрено влияние циркуляции гелия в криостатируемом объекте на параметры спутниковых рефрижераторов /для двухфазного гелия/. Показано, что применение эжектора в спутниковом рефрижераторе позволяет существенно снизить паросодержание двухфазного гелия на выходе из криостатируемого объекта без неизбежного в схемах с однократной циркуляцией перерасхода энергии.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Агапов Н.Н. 8-84-165
Thermodynamic Analysis and Optimization of Cryogenic Helium Systems with Satellite Refrigerators

Optimal power usage modes cryogenic helium systems with satellite refrigerators have been calculated to refrigerate superconducting magnetic systems of accelerators. Information is presented on specific power compressed gas and liquid helium consumptions for refrigeration in the satellites. The flow-diagrams of satellite refrigerators with an expansion engine, single and intermediate throttling are analysed. A comparison of different flow-diagrams is made for the same surface of heat exchangers of the satellite refrigerators. An optimal value of this heat exchange surface is determined. It is considered how the necessity of helium circulation in a cryogenic device affects parameters of the satellite refrigerators /for two-phase helium/. The use of an ejector in a satellite refrigerator allows the vapour content of two-phase helium to be reduced significantly at the output of the cryogenic device without excessive power consumption unavoidable in single circulation flow-diagrams.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984