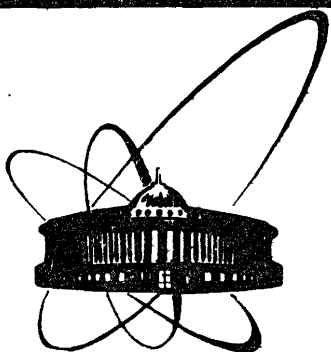


86-175



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P8-86-175

А.М.Донягин, Г.Г.Ходжибагиян

ИССЛЕДОВАНИЕ
САТЕЛЛИТНОГО ГЕЛИЕВОГО РЕФРИЖЕРАТОРА
ДРОССЕЛЬНОГО ТИПА

/Доклад на XI Международной конференции по криогенной технике, Западный Берлин, апрель 1986 года/.

1986

В последние годы получают широкое распространение устройства различного назначения, криостатируемые потоком гелия в охлаждающих каналах. Весьма важным, особенно для относительно небольших устройств, является упрощение их криогенного обеспечения. Это достигается с помощью рефрижератора с избыточным расходом обратного потока, работающего по дроссельной схеме без детандеров^{1, 2/}. Такой рефрижератор обладает высокой надежностью, позволяет легко переходить с одного режима работы на другой, не требует высококвалифицированного обслуживающего персонала. Рефрижератор работает за счет жидкого гелия, получаемого от окислителя, поэтому его называют спутником^{3/}.

Целью данной работы являлось получение зависимостей, позволяющих по заданным значениям холодопроизводительности рефрижератора Q и минимальной недорекуперации температур ΔT_{\min} в теплообменнике определить оптимальные значения поверхности теплообменника F и массовый расход гелия через компрессор \dot{m} . Эти зависимости необходимы для проектирования и анализа работы спутникового рефрижератора.

ПРИНЦИП РАСЧЕТА

Исследование проведено на примере теплообменника простейшей конструкции. Теплообменник состоит из одинакового числа трубок для прямого и обратного потока, спаянных между собой.

Расчеты выполнены без учета теплопритока из окружающей среды, радиальной и осевой теплопроводности теплообменника, термического сопротивления между стенками трубок и гидравлического сопротивления потоку гелия в теплообменнике. Рассматривалась работа спутника в режиме с постоянной подливкой гелия.

Расчеты проводились на ЭВМ при следующих предпосылках:

- температура соответственно прямого и обратного потоков гелия на входе в теплообменник (см. рис. 1) $T_1 = 300$ К, $T_4 = 4,45$ К;
- давление в обратном потоке на входе гелия в теплообменник $P_4 = 0,12$ МПа.

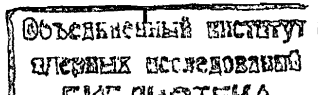
Холодопроизводительность спутникового рефрижератора, отнесенная к расходу гелия через компрессор, определяется из уравнения сохранения энергии

$$\frac{Q}{\dot{m}} = [H_4 - H_3 + \alpha(H_4 - H'_0)], \quad (1)$$

где

H - энтальпия гелия, Дж·кг⁻¹;

H' - энтальпия жидкого гелия на пограничной кривой, Дж·кг⁻¹;



d - относительная доля избытка обратного потока гелия в теплообменнике над прямым потоком.

Индексы 0, 3, 4 соответствуют точкам, обозначенным на рис. 1.

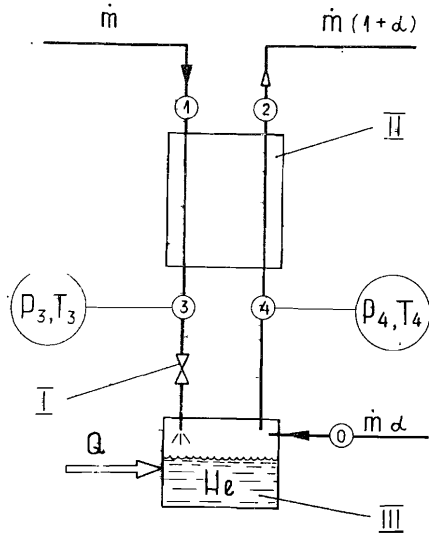


Рис. 1. Схема сателлитного рефрижератора.

I - дроссельный вентиль;

II - теплообменник;

III - сборник.

Поверхность теплообменника определяется из уравнения теплопередачи:

$$F = \int_3^1 \frac{\dot{m} dH}{K \Delta T}, \quad (2)$$

где

H - энтальпия прямого потока в промежуточном сечении теплообменника, Дж·кг⁻¹;

ΔT - разность температур между прямым и обратным потоками в этом сечении, К;

K - коэффициент теплопередачи в промежуточном сечении теплообменника, отнесенный к общей поверхности теплопередачи, Вт·м⁻²·К⁻¹

$$K = \frac{1}{\frac{(d_1 + d_2)}{d_1 h_1} - \frac{(d_1 + d_2)}{d_2 h_2}},$$

здесь

d_1, d_2 - диаметры трубок соответственно для прямого и обратного потоков теплообменника, м;

h_1, h_2 - коэффициенты теплоотдачи соответственно от прямого потока к стенке и от стенки к обратному потоку, Вт·м⁻²·К⁻¹

Из (1) и (2) следует, что

$$\frac{Q}{F} = \frac{[H_4 - H_3 + d(H_4 - H_0)]}{\int \frac{dH}{K \Delta T}} \quad (3)$$

Если для прямого и обратного потока гелия выполняется условие $G \cdot d \geq 0,14$ кг·м⁻¹·с⁻¹, то критерий Рейнольдса $Re > 7 \cdot 10^3$ и h определяется из уравнения Крауссолда.

$$h = 0,023 Re^{0,8} P_2^{0,4} \lambda / d,$$

где

P_2 - критерий Прандтля;

λ - теплопроводность гелия, Вт·м⁻¹·К⁻¹;

G - массовая скорость через единицу площади сечения потока, кг·м⁻²·с⁻¹.

Рекомендуемое в^{4/} значение G для прямого потока в теплообменниках гелиевых установок $40 < G_3 < 70$ кг·м⁻²·с⁻¹, для обратного потока - $6 < G_4 < 10$ кг·м⁻²·с⁻¹.

Из этих рекомендаций следует, что для нашего теплообменника оптимальное значение d_2/d_1 находится в интервале $2 \leq d_2/d_1 \leq 3$.

Входящие в выражения для определения критериев Re и P_2 величины вязкости, теплопроводности и удельной теплоемкости определялись с использованием таблиц термодинамических свойств гелия^{5/} при среднем для рассматриваемого участка теплообменника значении температуры и соответствующем давлении (в прямом или обратном потоке). Величина G_3 задавалась из указанного интервала значений. Значения d_1 и d_2 задавались таким образом, чтобы выполнялись условия $G \cdot d \geq 0,14$ кг·м⁻¹·с⁻¹ и $2 \leq d_2/d_1 \leq 3$.

Температура гелия в точке ③ определялась итерационным методом для каждого выбранного значения минимальной недорекуперации температур ΔT_{min} в теплообменнике и относительной доли избытка обратного потока над прямым d .

Отношение Q/F определялось методом численного интегрирования с граничными температурами для прямого потока T_3 и T_1 .

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведена холодопроизводительность сателлита, отнесенная к расходу гелия через компрессор Q/\dot{m} в зависимости от ком-

плекса $Q/(FA)$ для различных значений ΔT_{min} и d
 $P_3 = 1,2 \text{ МПа}$.

при

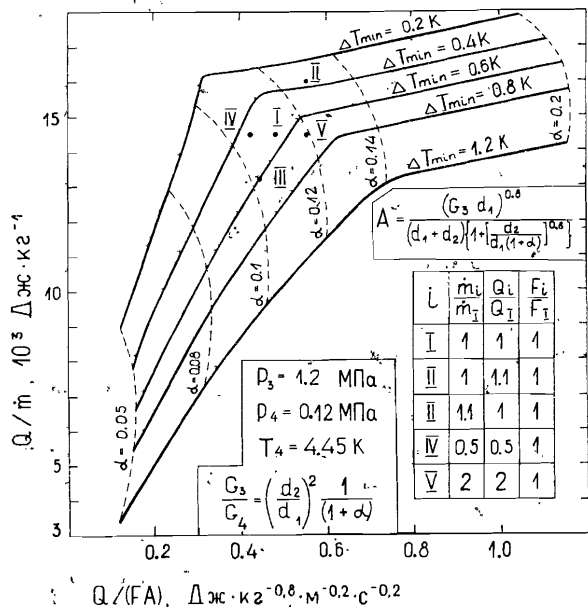


Рис. 2. Холодопроизводительность спутника, отнесенная к расходу гелия через компрессор Q/m в зависимости от отношения $Q/(FA)$ для различных значений относительной доли избыточного потока d и минимальной недорекуперации температур ΔT_{min} в теплообменнике с общей поверхностью теплопередачи F .

$P_3 = 1,2 \text{ МПа}$ является оптимальным с точки зрения затрат электроэнергии значением давления перед дросселем спутничного рефрижератора этого типа [6].

Комплекс $Q/(FA)$ получен из отношения Q/F и позволяет построить диаграмму (см. рис. 2), вид которой не изменяется с изменением G_3 , d_1 и d_2 (при условии $Re > 7000$).

Здесь $A = (G_3 d_1)^{0,8} (d_1 + d_2)^{-1} \left\{ 1 + \left[\frac{d_2}{d_1(1+d)} \right]^{0,8} \right\}^{-1}$

Диаграмма может быть использована при проектировании и анализе нерасчетных режимов работы спутничного рефрижератора дроссельного типа. При проектировании поступают следующим образом. Выбрав ΔT_{min} , величина которой зависит от конструкции конкретного теплообменника, с помощью рис. 2 определяют оптимальное с точки зрения энергос затрат значение d . Минимуму энергос затрат соответствует такое значение d , при котором наблюдается изменение угла наклона кривых $\Delta T_{min} = \text{const}$. Для $0,2 < \Delta T_{min} < 1,2 \text{ К}$ оптимальные значения d лежат в интервале $0,11 < d < 0,14$.

Затем по ΔT_{min} и d определяется Q/m и $Q/(FA)$. Подставив в эти отношения заданное значение Q и выбранное с учетом рекомендаций для G_3 , $G \cdot d$ и d_2/d_1 , значение A , получают F и m .

При выборе ΔT_{min} необходимо помнить, что в существующих конструкциях теплообменников осевая и радиальная теплопроводность теплообменника затрудняет достижение в его промежуточном сечении $\Delta T_{min} < 0,5 \text{ К}$. Нахождению ΔT_{min} в промежуточном сечении теплообменника соответствуют крутые участки кривых на рис. 2, пологие участки соответствуют нахождению ΔT_{min} на холодном конце теплообменника.

При выборе A необходимо стремиться к получению максимального значения коэффициента теплопередачи, не превышая при этом допустимой величины гидравлического сопротивления.

Для примера анализа нерасчетных режимов работы спутника на рис. 2 обозначены рабочие точки (I, II, III, IV, V) произвольного спутничного рефрижератора. В таблице, приведенной на этом же рисунке, указаны отличия в рабочих параметрах для обозначенных точек.

Спутничные рефрижераторы, имеющие небольшую холодопроизводительность, целесообразно оптимизировать не по энергос затратам, а по затратам необходимого для их работы жидкого гелия. С этой точки зрения выгодны более высокие значения давления перед дросселем P_3 (см. рис. 3). Однако при этом оптимум достигается при меньших значениях отношения $Q/(FA)$. Из рис. 4 видно, что при $P_3 = 1,8 \text{ МПа}$ оптимальные значения $Q/(FA)$ лежат в интервале $0,23 < Q/(FA) < 0,33 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-0,8} \cdot \text{м}^{-0,2} \cdot \text{с}^{-0,2}$ для $0,4 < \Delta T_{min} < 0,8 \text{ К}$.

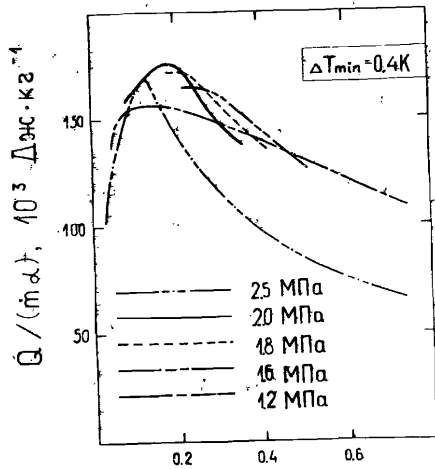


Рис. 3. Холодопроизводительность сателлита, отнесенная к расходу жидкого гелия от ожижителя $Q/(m\Delta)$ в зависимости от отношения $Q/(FA)$ для различных значений давления гелия перед дроссельным вентилем и $\Delta T_{min} = 0,4$ К.

$Q/(FA), \text{Дж}\cdot\text{кг}^{-0,8}\cdot\text{м}^{-0,2}\cdot\text{с}^{-0,2}$

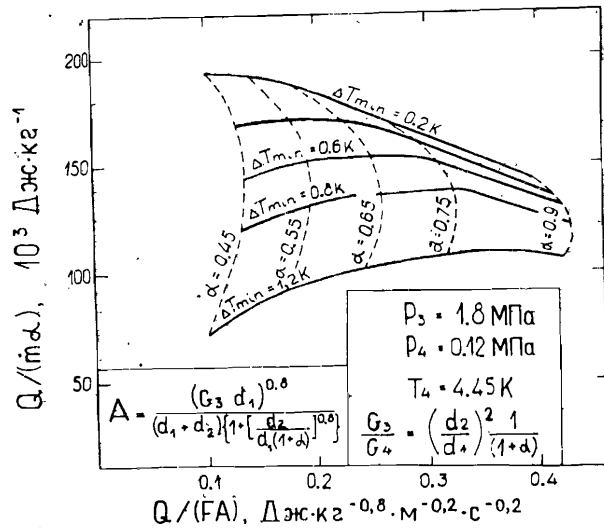


Рис. 4. $Q/(m\Delta)$ в зависимости от $Q/(FA)$ для различных значений ΔT_{min} и α . Давление гелия перед дроссельным вентилем $P_3 = 1,8$ МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bondarenko V.I. et al. A cold box for the forced cooling systems of superconducting magnets. Cryogenics, vol. 21, N 2, 1981, p. 105.
2. D'yachkov E.I., Khodzibagiyan H.G. and Kusichev V.N. A satellite refrigerator for testing superconducting magnets with a forced cooling system. Proc. of the Tenth Int. Cryogenic Eng. Conf., Helsinki, 1984, p. 735.
3. A report on the design of the Fermilab superconducting accelerator. FNAL, Batavia, May, 1979.
4. Микулин Е.И. Криогенная техника. "Машиностроение", М., 1969.
5. Mc Carty R.D. Thermophysical properties of helium - 4 from 2 to 1500 K with pressures to 1000 atmospheres. NBS (USA) Technical Note 631, Boulder, Colorado, 1972.
6. Агашов Н.Н. Термодинамический анализ и оптимизация криогенных гелиевых систем с сателлитными рефрижераторами. Сообщение ОИЯИ 8-84-165, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 марта 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 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.
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.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.

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

Донягин А.М., Ходжибагиан Г.Г.
Исследование сателлитного гелиевого
рефрижератора дроссельного типа

P8-86-175

Обсуждаются достоинства гелиевого рефрижератора с избыточным обратным потоком и приводится принцип его расчета. Расчеты выполнены на примере теплообменника простейшей конструкции. Получены зависимости, позволяющие определять оптимальные значения поверхности теплообменника и расход гелия через компрессор рефрижератора с заданной холодопроизводительностью. Результаты исследования могут быть использованы при расчете сателлитного рефрижератора дроссельного типа и анализе режимов его работы.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод Л.Н. Барабаш

Donyagin A.M., Khodzhbagiyani H.G.
Study of a Helium J-T Satellite Refrigerator

P8-86-175

Advantages of a helium refrigerator with surplus return flow are discussed. The principle of its calculation is presented. The calculations have been performed using a heat exchanger of the simplest construction. The dependences have been obtained which make it possible to determine optimal values of the surface of the heat exchanger and the mass flow rate of helium from the compressor of the refrigerator with given capacity. The results of these studies can be used to design a J-T satellite refrigerator and to analyze its operation modes.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986