

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



12/11 -

8 - 9436

A-233

1350/2-76

Н.Н.Агапов, В.А.Белушкин, А.Г.Зельдович

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАСЧЕТНЫХ РЕЖИМОВ  
ГЕЛИЕВОГО РЕФРИЖЕРАТОРА

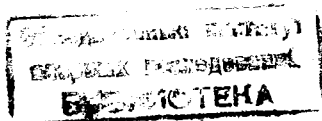
**1976**

8 - 9436

Н.Н.Агапов, В.А.Белушкин, А.Г.Зельдович

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАСЧЕТНЫХ РЕЖИМОВ  
ГЕЛИЕВОГО РЕФРИЖЕРАТОРА**

Направлено в журнал "Химическое  
и нефтяное машиностроение"



Проектирование и расчет гелиевых ожигателей и рефрижераторов обычно ведут, имея в виду какой-либо один определенный режим. Например, для ожигателей задают скорость слива жидкого гелия в сосуд для хранения, для рефрижераторов - тепловую нагрузку, которая должна быть снята с помощью жидкого гелия. Затем выбирают схему установки и определяют, при каких параметрах аппаратов и машин могут быть достигнуты заданные показатели. Если установка многоцелевая, расчет ведут для наиболее напряженного режима.

Между тем режим работы установки может существенно отличаться от расчетного как вследствие отклонения фактических параметров машин и аппаратов от номинальных, так и из-за изменений условий работы потребителя.

Так, при работе установки в комплексе с крупным объектом необходимо пройти по крайней мере три следующие стадии: понижение температуры установки и объекта до температуры жидкого гелия - режим охлаждения; заполнение криостата объекта жидким гелием - режим ожигения; криостатирование объекта при заданной температуре - рефрижераторный режим. В последнем режиме часть жидкого или холодного газообразного гелия может отводиться на охлаждение тоководов или тепловых мостов - такой режим будем называть комбинированным.

В настоящей работе рассмотрен метод исследования нерасчетных режимов, основанный на совместном решении уравнений энергетического баланса и теплопередачи в теплообменниках рефрижератора. Умение оценить, как изменятся показатели установки в нерасчетных режимах, полезно в нескольких случаях.

Во-первых, при разработке вариантов проекта с целью исследования влияния отдельных параметров схемы и степени совершенства ее узлов на эффективность будущей установки\*.

Во-вторых, при модернизации действующих установок. Например, могут быть поставлены такие вопросы: каков эффект от снижения температуры предварительного охлаждения путем откачки азотной ванны; как возрастает производительность установки, если заменить дроссельный вентиль детандером, и т.п.

И, наконец, этот метод позволяет определить показатели установки при работе в комбинированных режимах, когда от рефрижератора требуется одновременно снятие тепловой нагрузки в криостатируемом объекте, производство жидкого гелия для заполнения криостатов объекта, производство холодного газообразного гелия для охлаждения экранов, тоководов и т.п. Можно отметить следующие наиболее характерные режимы работы рефрижератора:

- режим максимальной скорости накопления жидкого гелия в криостате объекта с заданным теплопритоком;
- режим максимальной подачи охлаждающего газа /например, на тоководы/ при постоянном уровне жидкого гелия в криостатах объекта с заданным теплопритоком;
- режим, обеспечивающий компенсацию наибольшей величины теплопритоков и тепловыделений объекта при постоянном уровне жидкого гелия и заданном потоке охлаждающего газа.

Зависимость холодопроизводительности  $Q$  от количества одновременно вырабатываемого жидкого гелия  $m_{ж}$  или холодного газа  $m_{г}$  в дальнейшем будем называть характеристикой рефрижератора. Такие характеристики очень полезны при анализе совместной работы системы рефрижератор - объект. Так, если подобные характери-

\* Эта задача может быть приближенно решена построением линейной математической модели установки с использованием метода малых отклонений<sup>1/1</sup>, однако мы считаем более целесообразным использовать общий метод, позволяющий решить не только эту, но и более широкий круг задач.

стики известны, легко определить, например, скорость накопления жидкости  $m_{ж}$  в сосудах объекта с заданным теплопритоком  $Q_1$  /рис. 1/.

Впервые понятие характеристики рефрижератора использовано в работе<sup>1/2</sup> для оптимизации системы криостатирования магнита с охлаждаемыми тоководами. Однако в этой работе ничего не говорится о том, как рассчитать такую характеристику, и авторы пользуются только экспериментальными данными.

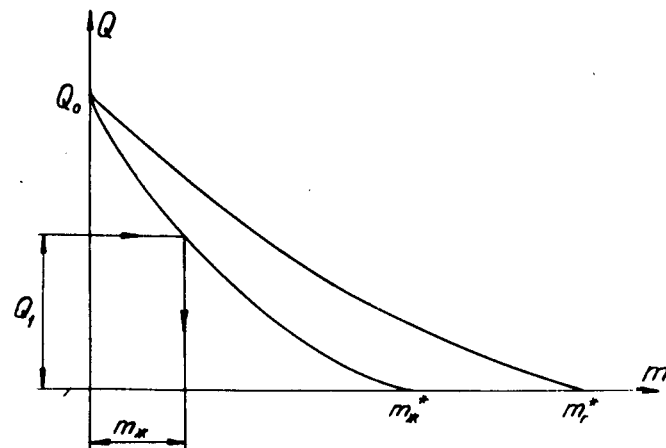


Рис. 1. Характеристика рефрижератора.

Ниже приводится методика, позволяющая определить характеристику рефрижератора расчетным путем.

Рассмотрим основные моменты анализа. Для каждого из теплообменников установки могут быть записаны два уравнения: энергетического баланса и теплопередачи /обозначения см. на рис. 3/.

$$Q_T = c'_p m' \delta T' = c''_p m'' \delta T'' \quad /1/$$

$$Q_T = kF \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T''}}$$

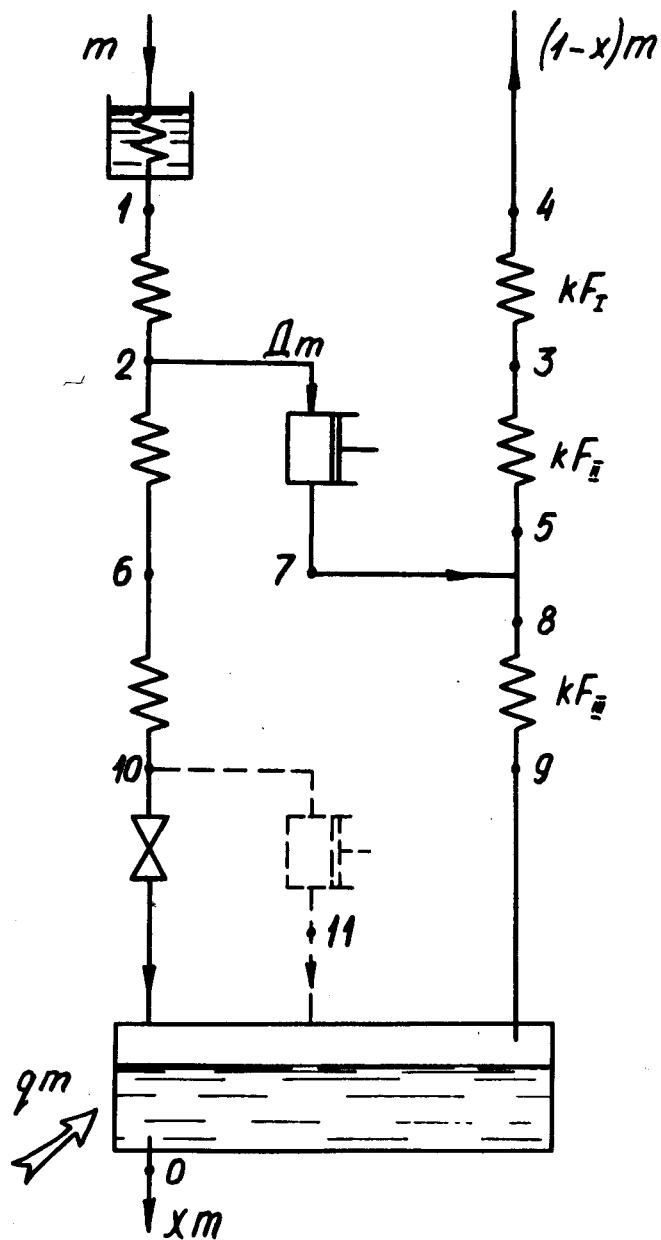


Рис. 2. Схема рефрижератора.

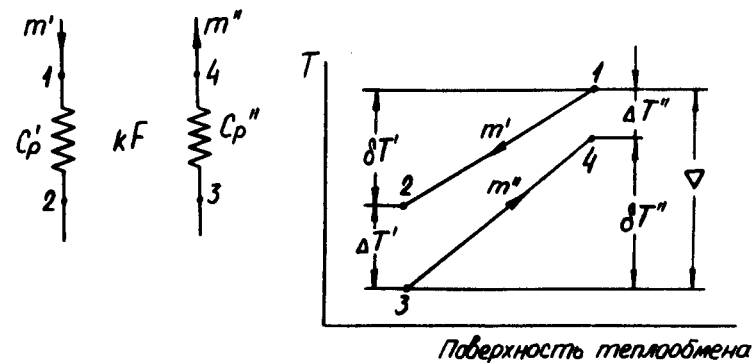


Рис. 3. Изменение температур прямого и обратного потоков в теплообменнике.

Последнее с учетом /1/ легко приводится к более удобному для наших целей виду:

$$Q_T = W \nabla \quad /2/$$

где  $\nabla$  - наибольшая разность температур между греющей и нагреваемой средами.

Для противоточного теплообменника, в котором  $\nabla = \Delta T' + \delta T' = \Delta T'' + \delta T''$ ,

$$W = \frac{\exp\left(\frac{c'_p m'}{kF}\right) - \exp\left(\frac{c''_p m''}{kF}\right)}{\frac{\exp\left(\frac{c'_p m'}{kF}\right)}{c'_p m'} - \frac{\exp\left(\frac{c''_p m''}{kF}\right)}{c''_p m''}} \quad /3/$$

В частном случае при  $c'_p m' = c''_p m''$  после раскрытия неопределенности имеем

$$W = \frac{1}{\frac{1}{kF} + \frac{1}{c_p m}} \quad /3a/$$

Для вычисления  $W$  можно использовать более простую, чем /3/, приближенную формулу, дающую погрешность от 3 до 6% /4/:

$$W \cong \frac{(c_{pm})_M}{0,65 + 0,35 \frac{(c_{pm})_M}{(c_{pm})_6} + \frac{(c_{pm})_M}{kF}} \quad /4/$$

где  $(c_{pm})_M$  — меньшая из величин  $c'_{pm}$  и  $c''_{pm}$ ;  $(c_{pm})_6$  — большая из этих величин.

В данной работе анализируются нерасчетные режимы рефрижератора, построенного по схеме с предварительным охлаждением сжатого гелия жидким азотом, расширением части газа в поршневом детандере и дросселированием /рис. 2/.

Следует отметить, что вид характеристики существенным образом зависит от принятого способа и допустимого диапазона регулирования распределения потоков между детандером и дросселем. При оптимальном регулировании достигается максимальная холодопроизводительность при любых иаперед заданных величинах скорости ожижения или потока охлаждающего газа. Характеристики рефрижератора, полученные при таком регулировании, будем называть оптимальными. В работе исследованы также характеристики, полученные при таком законе регулирования, при котором в качестве неизменного параметра была принята температура перед детандером.

Исходными данными для расчета являются:

- расход сжатого гелия,  $m$ ;
- давления в прямом и обратном потоках,  $p_1$  и  $p_2$ ;
- поверхности и конструкция теплообменников,  $F_I$ ,  $F_{II}$ ,  $F_{III}$ ;
- к.п.д. детандера;  $\eta$ ;
- температура предварительного охлаждения,  $T_1$ ;
- температура перед детандером,  $T_2$ .

Для рассматриваемой схемы /рис. 2/ система уравнений теплопередачи и энергетического баланса имеет вид:

$$T_3 = T_1 - \frac{c_{p12} m}{W_I} (T_1 - T_2),$$

$$T_4 = T_3 + \frac{c_{p12}}{c_{p34} (1-x)} (T_1 - T_2),$$

$$T_5 = \frac{c_{p35} (1-x) m}{c_{p35} (1-x) m - W_{II}} T_3 - \frac{W_{II}}{c_{p35} (1-x) m - W_{II}} T_2,$$

$$T_6 = T_2 - \frac{c_{p35} (1-x)}{c_{p26} (1-D)} (T_3 - T_5),$$

$$i_7 = i_2 - (i_2 - i_{7ад.}) \eta, \quad /5/$$

$$i_8 = \frac{1-x}{1-D-x} i_5 - \frac{D}{1-D-x} i_7,$$

$$T_9 = \frac{c_{p89} (1-D-x) m}{c_{p89} (1-D-x) m - W_{III}} T_8 - \frac{W_{III}}{c_{p89} (1-D-x) m - W_{III}} T_6,$$

$$T_{10} = T_6 - \frac{c_{p89} (1-D-x)}{c_{p6-10} (1-D)} (T_8 - T_9).$$

Здесь  $c_{pij}$  — средняя теплоемкость потока в диапазоне температур  $T_i \div T_j$ .

Последовательность расчета покажем на конкретном примере. Пусть требуется определить скорость накопления жидкого гелия в криостатах объекта, имеющего теплоток  $Q$ .

Чтобы решить систему уравнений /5/, в начале расчета задаются величинами средних теплоемкостей прямого и обратного потоков в каждом теплообменнике, коэффициентами теплопередачи и принимают какую-то разумную величину коэффициента ожигения  $x = m_{ж} / m$ . Эти данные могут быть взяты, например, из расчета установки.

1. По уравнениям /5/ последовательно определяют параметры установки для различных значений доли на детандер  $D$ . Находят такую величину  $D$ , при которой температура в точке 9 равна температуре кипения жидкого гелия при заданном давлении в обратном потоке.

2. Определяют новое значение коэффициента ожигения по уравнению

$$x = (1-D) \frac{i_9 - i_{10}}{i_9 - i_0} - \frac{q}{i_9 - i_0}, \quad /6/$$

где  $q = Q/m$ .

3. По параметрам установки, вычисленным в п.1, находят новые значения величин средних теплоемкостей и коэффициентов теплопередачи.

4. Расчеты по пп. 1-3 повторяют несколько раз до тех пор, пока разность между величинами  $x$ , полученными в двух последующих приближениях, не станет меньше заданной.

В качестве исходного параметра может быть взята величина  $x$ . В этом случае будет решена задача определения величины тепловой нагрузки, которая может быть снята при заданной скорости накопления жидкого гелия. Величину этой нагрузки определяют по уравнению

$$q = (1-D)(i_9 - i_{10}) - x(i_9 - i_0). \quad /6a/$$

В остальном порядок расчета аналогичен вышеописанному.

Ниже приводятся результаты проведенных нами расчетов. Величины  $W$  для каждого теплообменника вычис-

лялись по приближенной формуле /4/. Коэффициенты теплопередачи в п. 3 не пересчитывались, т.е. принимались независимыми от изменения параметров. Гидравлическое сопротивление не учитывалось. Использовались таблицы термодинамических свойств гелия /5/. Были приняты следующие значения исходных данных:  $m = 60 \text{ г/с}$ ;  $p_1 = 25 \text{ атм}$ ;  $p_2 = 1,2 \text{ атм}$ ;  $T_1 = 80 \text{ К}$ ;  $kF_{I} = 4780 \text{ Вт/К}$ ;  $kF_{II} = 910 \text{ Вт/К}$ ;  $kF_{III} = 1390 \text{ Вт/К}^*$ . Расчеты проведены на ЭВМ.

На рис. 4 показаны зависимости коэффициента ожигения от температуры перед детандером при компенсации различных величин тепловой нагрузки. Для принятых условий в ожигительном режиме ( $q=0$ ) оптимальному распределению потоков соответствует температура перед детандером около  $27 \text{ К}$ , а в рефрижераторном режиме ( $x=0$ ) -  $23 \text{ К}$  /кривая "а"/. Однако ввиду того,

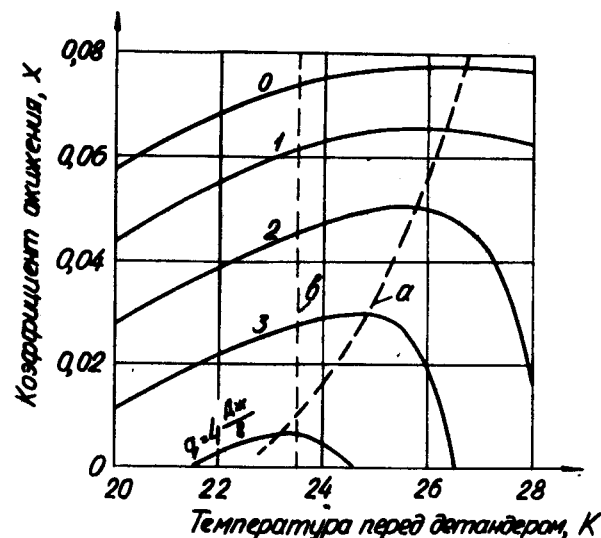


Рис. 4. Зависимость коэффициента ожигения от температуры перед детандером и удельной тепловой нагрузки. "а" - оптимальное регулирование; "б" - регулирование при  $T = \text{const}$ .

\* В качестве исходных взяты величины, соответствующие расчетным значениям для установки МГО /3/.

что слева от максимума кривые  $q = \text{const}$  имеют пологий вид, характеристика рефрижератора будет близка к оптимальной, если принять в качестве закона регулирования при распределении потоков постоянство температуры перед детандером /линия "в"/. Этот способ очень удобен в практической работе. Для получения характеристик, близких к оптимальной, необходимо иметь возможность плавно изменять распределение потоков между детандером и дросселем.

Как уже отмечалось, предложенная методика расчета пригодна для выявления влияния степени совершенства отдельных элементов на эффективность установки в целом. На рис. 5 приведены результаты расчетов оптимальных характеристик при значениях адиабатного к.п.д. детандера от 0,5 до 0,9. Остальные данные такие же,

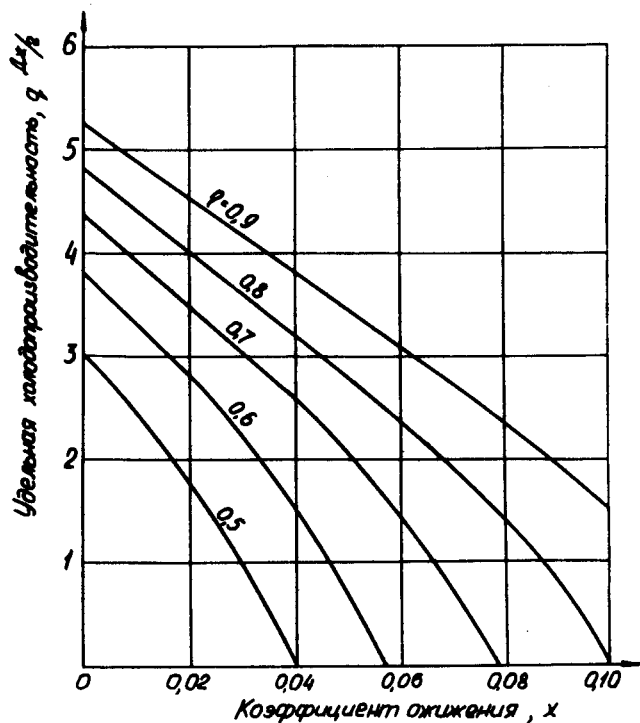


Рис. 5. Оптимальные характеристики рефрижератора при различных значениях к.п.д. детандера.

как в предыдущем расчете. Видно, что для ожигательного режима совершенство детандера значительно более существенно, чем для рефрижераторного. Так, повышенные к.п.д. детандера с 0,7 до 0,8 в ожигательном режиме дает прирост производительности примерно на 23%, а в рефрижераторном - всего лишь на 12%.

Расчеты показали, что снижение температуры кипения жидкого азота за счет откачки ванны с 80 до 70 К повысит производительность в ожигательном режиме на 14%, а в рефрижераторном - на 8%.

При замене дросселя детандером вместо /6/ и /6а/ должны быть использованы следующие уравнения:

$$x = (1-D) \frac{i_9 - i_{10}}{i_9 - i_0} - \frac{q}{i_9 - i_0} + (1-D) \frac{(i_9 - i_{11\text{ад}}) \cdot \eta}{i_9 - i_0} \quad /7/$$

и

$$q = (1-D)(i_9 - i_{10}) - x(i_9 - i_0) + (1-D)(i_9 - i_{11\text{ад}}) \cdot \eta \quad /7a/$$

Зависимость коэффициента ожигания после такой модернизации от температуры перед верхним детандером иллюстрируется рис. 6. Оптимальные значения температуры перед верхним детандером в ожигательном и рефрижераторном режимах отличаются примерно на 10 К. Таким образом, для данной схемы регулирование распределения потоков при постоянной температуре перед верхним детандером приведет к значительному отклонению от оптимальной характеристики. В этом случае нужно использовать приведенную на том же графике зависимость оптимальной температуры перед детандером от режима работы /кривая "а"/.

На рис. 7 показаны оптимальные характеристики рефрижератора с дросселем /кривая 1/ и парожидкостным детандером /кривая 2/. При к.п.д. детандеров, равном 0,7, в ожигательном режиме производительность возрастает в 1,5 раза, а в рефрижераторном - почти в 2,5 раза.

Предложенная методика исследования нерасчетных режимов может быть распространена на анализ переходных процессов в тех случаях, когда эти процессы



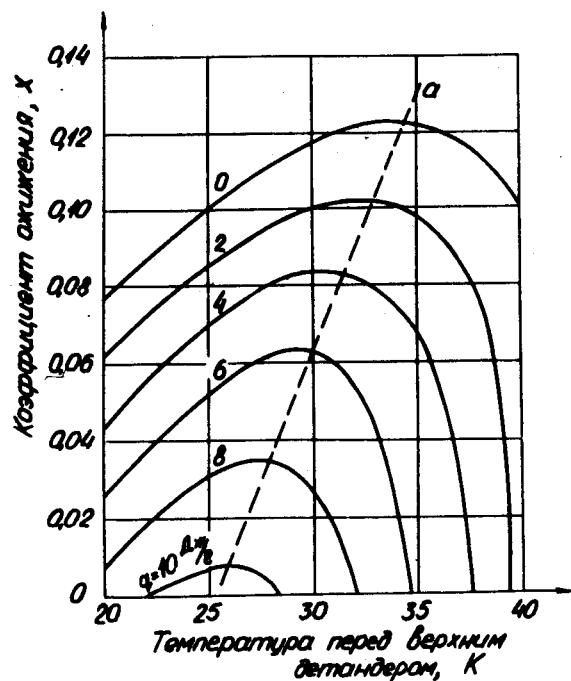


Рис. 6. Зависимость коэффициента охлаждения от температуры перед верхним дедандером и удельной тепловой нагрузки в схеме с парожидкостным дедандером. "а" - оптимальное регулирование.

в каждый данный момент времени можно считать стационарными. К таким относятся, например, процессы охлаждения объектов с большой теплоемкостью. В этих случаях основным переменным параметром при расчете служит температура газа на выходе из объекта, соответствующая точке 9 на рис. 2. Расчет позволит определить изменение холодопроизводительности установки по времени.

Таким образом, предложенная методика дает возможность решить многочисленные задачи, связанные с работой криогенной установки в нерасчетных условиях.

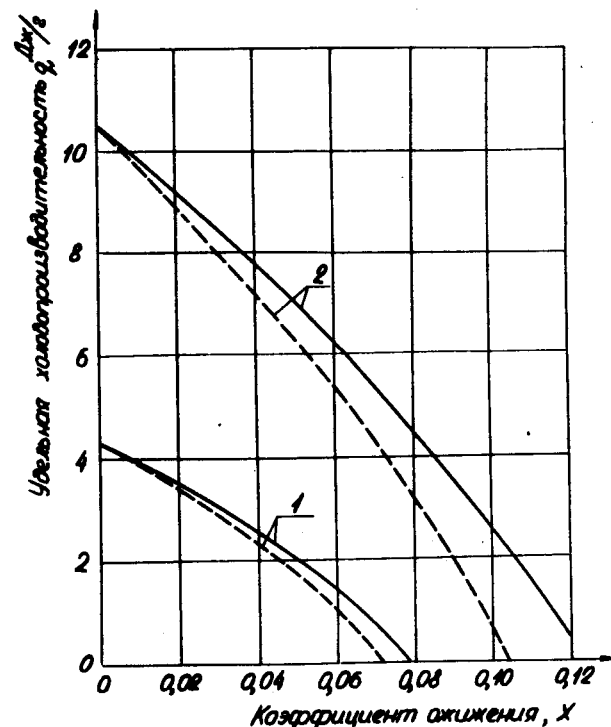


Рис. 7. Характеристики рефрижератора. 1 - схема с дросселем; 2 - схема с парожидкостным дедандером. Сплошные кривые - оптимальное регулирование, пунктирные - регулирование при постоянной температуре перед верхним дедандером.

#### Литература

1. В.Н.Новотельнов. Изв. вузов, машиностроение, №1, 1972.
2. G.Horlitz, S.Wolff, C.P.Parsch. The Fourth International Conference on Magnet Technology, Brookhaven, 1972.
3. Н.Н.Агапов, В.А.Белушкин, А.Г.Зельдович. ОИЯИ, Р8-8850, Дубна, 1975.
4. Е.Я.Соколов, В.М.Бродянский. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. Энергия, М., 1968.
5. NBS Technical Note, 1972, No. 631.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 января 1976 года.