

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



С393а

Б-438

3/11-75  
8 - 9096

В.А.Белушкин

4298/2-75

АНАЛИЗ ГЕЛИЕВЫХ

ОЖИЖИТЕЛЬНО-РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ ЦИКЛОВ

**1975**

8 - 9096

В.А.Белушкин

АНАЛИЗ ГЕЛИЕВЫХ  
ОЖИЖИТЕЛЬНО-РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ ЦИКЛОВ

Направлено в журнал "Химическое и нефтяное  
машиностроение"

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Наиболее экономичные гелиевые ожижительные и рефрижераторные установки могут быть построены на основе циклов, использующих в качестве ступеней предварительного охлаждения каскад из нескольких детандеров. Особенно целесообразно применять такие циклы для установок большой производительности, строительство которых интенсивно ведется в ряде стран в связи со все более расширяющимся использованием сверхпроводящих устройств.

Детандеры в цикл могут быть включены разными способами, мы ограничимся рассмотрением двух схем /рис. 1/, представляющих наибольший практический интерес: с параллельным и последовательным включением детандеров. На рис. 1 показаны ступени только предварительного охлаждения, назначением которых является охлаждение газа от температуры окружающей среды  $T_0$  до температуры  $T_n$ , с которой газ поступает в конечную дроссельную, эжекторную или детандерную ступени. Эту последнюю ступень будем считать одинаковой для обеих схем, поэтому ее можно исключить из рассмотрения.

Представляется интересным определить оптимальные температурные уровни включения детандеров в циклах и сравнить эффективность циклов при различных режимах, в которых могут работать гелиевые установки: ожижительный, рефрижераторный или комбинированный. Поскольку гелий в широком диапазоне температур можно считать идеальным газом, такое сравнение можно провести аналитически, не прибегая к трудоемким вариантным расчетам с использованием диаграмм состояния.

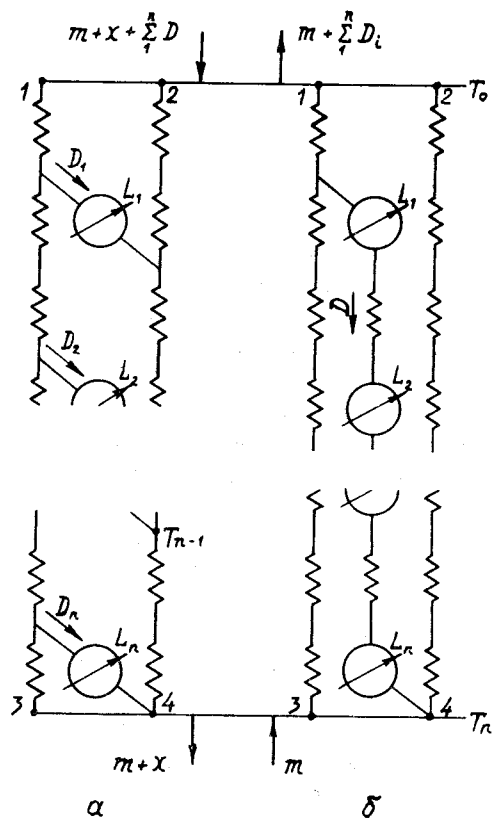


Рис. 1. Схема ступеней предварительного охлаждения гелиевых ожижительно-рефрижераторных циклов. а - с параллельным включением детандеров; б - с последовательным.

Прежде всего необходимо выбрать критерий, с помощью которого можно было бы найти оптимальные температуры  $T_i$  после детандеров и их холодопроизводительность. Примем в качестве такого критерия потерю энергии /потерю от необратимости/, минимум которой соответствует максимальному термодинамическому к.п.д. цикла. Известно, что эта потеря всегда равна

$$\Pi = T_0 \sum \Delta S. \quad /1/$$

Для обоих рассматриваемых циклов /рис. 1/ при отсутствии теплообмена с окружающей средой

$$\Pi = T_0 \left[ \sum_1^n D_i \Delta s_{21} - (m+x) \Delta s_{13} - m \Delta s_{42} \right]. \quad /2/$$

Здесь:  $T_0$  - температура окружающей среды;  $\sum_1^n D_i$  - сумма потоков во все детандеры;  $m$  - рефрижераторный поток;  $x$  - поток, выведенный из цикла;  $\Delta s$  - разности энтропий рабочего тела.

Минимум функции /2/ найдем из условия равенства нулю ее частной производной по  $T_i$ :

$$\frac{\partial \Pi}{\partial T_i} = \frac{\partial}{\partial T_i} \left\{ T_0 \left[ \sum_1^n D_i \Delta s_{21} - (m+x) \Delta s_{13} - m \Delta s_{42} \right] \right\}. \quad /3/$$

При фиксированных параметрах рабочего тела в точках 1-4 и заданных  $m$  и  $x$  функцией от  $T_i$  является лишь член, содержащий величину  $\sum_1^n D_i$ , имеем поэтому

$$\frac{\partial \Pi}{\partial T_i} = T_0 \Delta s_{21} \frac{\partial}{\partial T_i} \sum_1^n D_i. \quad /4/$$

Последнее означает, что для обеих схем минимальные потери от необратимости достигаются при минимальном суммарном потоке газа через все детандеры.

Перейдем теперь к решению поставленной задачи.

### 1. Цикл с параллельным включением детандеров

Для определения потоков в детандеры необходимо задать величину недорекуперации на соответствующем температурном уровне. В работе <sup>3</sup> показано, что поверхность теплообмена будет использована оптимальным образом, если разность температур между потоками - линейная функция от температуры:  $\Delta T = \beta T$ . При конечном числе детандеров выдержать это условие во всем диапазоне температур от  $T_0$  до  $T_n$  практически невозможно, поэтому будем считать, что по такому закону меняются разности температур на теплых концах межступенчатых теплообменников - минимальные разности температур, т.е.  $\Delta T_i = \beta T_i$ .

Рассмотрим  $i$ -тую ступень цикла /рис. 2/. Составим уравнение теплового баланса для участка цикла между уровнями  $i-1$  и  $i$ .

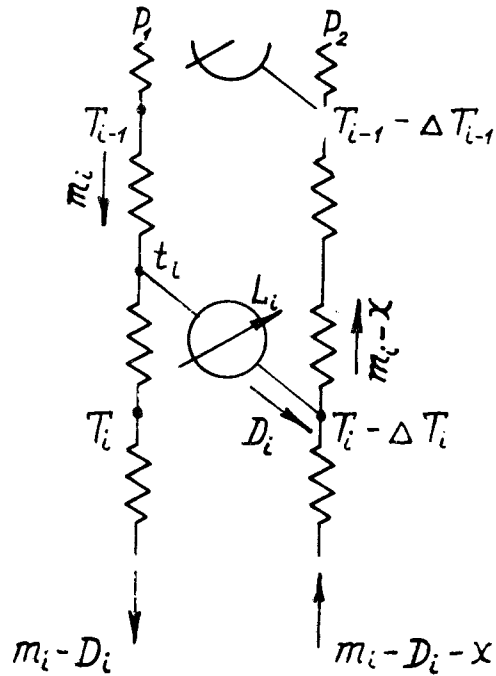


Рис. 2. К расчету цикла с параллельным включением детандеров.

$$L_i = c_p [m_i T_{i-1} - (m_i - D_i) T_i + (m_i - D_i - x) T_i (1 - \beta) - (m - x) T_{i-1} (1 - \beta)]. \quad /5/$$

Работа детандера

$$L_i = D_i c_p [t_i - T_i (1 - \beta)]. \quad /6/$$

Имея в виду, что  $t_i - T_i (1 - \beta) = \eta_i (t_i - T_i^*)$ , где  $\eta_i$  - к.п.д. детандера, а  $T_i^* = t_i / (\frac{P_1}{P_2})^{\frac{k-1}{\gamma}}$ , и обозначив  $(\frac{P_1}{P_2})^{\frac{k-1}{\gamma}} = a_i^y$ , найдем

$$L_i = D_i c_p \frac{\eta_i (a_i^y - 1)}{\eta_i + (1 - \eta_i) a_i^y} T_i (1 - \beta). \quad /7/$$

Введем обозначение

$$a_i = \frac{\eta_i (a_i^y - 1)}{\eta_i + (1 - \eta_i) a_i^y}, \quad /8/$$

тогда

$$L_i = D_i c_p T_i (1 - \beta) a_i. \quad /9/$$

С учетом этого, из уравнения /5/ получаем

$$D_i = \frac{m_i \beta + x}{(1 - \beta) a_i - \beta} \left( \frac{T_{i-1}}{T_i} - 1 \right). \quad /10/$$

Заметим, что

$$m_i = \sum_1^n D_i - m + x = D_i + \sum_{i+1}^n D_i + m + x. \quad /11/$$

Из /10/ и /11/ имеем

$$D_i = \frac{\beta \sum_{i+1}^n D_i + m \beta + x}{(1 - \beta) a_i - \beta \frac{T_{i-1}}{T_i}} \left( \frac{T_{i-1}}{T_i} - 1 \right). \quad /12/$$

В соответствии с требованием /3/, оптимальные показатели схемы будут достигнуты при условии  $\frac{\partial}{\partial T_i} \sum_{i=1}^n D_i = 0$ .

Из всех слагаемых под знаком суммы функцией  $T_i$

являются лишь два члена:  $D_i$  и  $D_{i+1}$ , поэтому

$$\frac{\partial}{\partial T_i} \sum_{i=1}^n D_i = \frac{\partial}{\partial T_i} D_i + \frac{\partial}{\partial T_i} D_{i+1}$$

Находим

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial T_i} \sum_{i=1}^n D_i &= \frac{\beta(D_{i+1} + \sum_{i=2}^n D_i) + m\beta + x}{(1-\beta)a_i - \beta \frac{T_{i-1}}{T_i}} \left( \frac{T_{i-1}}{T_i} - 1 \right) + \\ &+ \frac{\beta \sum_{i=2}^n D_i + m\beta + x}{(1-\beta)a_{i+1} - \beta \frac{T_i}{T_{i+1}}} \left( \frac{T_i}{T_{i+1}} - 1 \right) = \end{aligned} \quad /13/$$

$$\begin{aligned} &= [\beta \sum_{i=2}^n D_i + m\beta + x (\beta + 1)] \times \\ &\times \left[ \frac{T_{i-1} - T_i}{a_i T_i - \beta T_{i-1}} + \frac{T_i - T_{i+1}}{a_{i+1} T_{i+1} - \beta T_i} + \beta \frac{(T_i - T_{i+1})(T_{i-1} - T_i)}{(a_i T_i - \beta T_{i-1})(a_{i+1} T_{i+1} - \beta T_i)} \right]. \end{aligned}$$

Здесь  $a_i = a_i (1 - \beta)$ ;  $a_{i+1} = a_{i+1} (1 - \beta)$ .  
Дифференцируем это выражение по  $T_i$ , приравняем производную нулю и после упрощений получаем

$$T_i = \sqrt{\frac{a_{i+1}}{a_i} T_{i-1} T_{i+1}} \quad /14/$$

Запишем уравнение /14/ в таком виде:

$$\frac{T_{i-1}}{a_i T_i} = \frac{T_i}{a_{i+1} T_{i+1}} = \dots = \text{Const} = C. \quad /15/$$

Перемножим последовательно  $n$  членов и  $i$  членов этого выражения

$$\frac{T_0}{a_1 a_2 \dots a_n T_n} = C^n; \quad \frac{T_0}{a_1 a_2 \dots a_i T_i} = C^i;$$

находим

$$T_i = \sqrt[n]{\frac{(a_1 a_2 \dots a_n)^i}{(a_i a_2 \dots a_1)^n}} T_0^{n-i} T_n^i. \quad /16/$$

Эта формула тождественна формуле, полученной П.Л.Капицей /17/ для частного случая: ожигательный режим при недорекуперации, равной нулю. Из нее следует, что оптимальные температурные уровни ступеней охлаждения зависят от граничных температур цикла, количества и качества детандеров, но не зависят от режима работы установки и относительной недорекуперации.

Определим теперь величины потоков в детандеры. Из /16/ находим

$$\frac{T_{i-1}}{T_i} = \sqrt[n]{\frac{a_i^n}{\prod_{i=1}^n a_i}} \frac{T_0}{T_n}. \quad /17/$$

Здесь  $\prod_{i=1}^n a_i = a_1 a_2 \dots a_n$ .

Подставив это выражение в /12/, находим

$$D_i = \frac{\beta \sum_{i=1}^n D_i + m\beta + x}{a_i (1 - \beta) - \beta \sqrt[n]{\frac{a_i^n T_0}{\prod_{i=1}^n a_i T_n}}} \left( \sqrt[n]{\frac{a_i^n T_0}{\prod_{i=1}^n a_i T_n}} - 1 \right). \quad /18/$$

По этой формуле последовательно, начиная с нижнего детандера, для которого  $i = n$ ,  $\sum_{i=1}^n D_i = 0$ , можно опреде-

лить потоки во все детандеры для любого режима: ожигительного, рефрижераторного или комбинированного.

Цикл сохраняет работоспособность до тех пор, пока величина  $\beta$  не превысит предельного значения  $\beta^*$ , при котором знаменатель формулы /18/ обращается в нуль

$$\alpha_i (1 - \beta^*) - \beta^* \sqrt[n]{\frac{\alpha_i^n}{\prod_{i=1}^n \alpha_i} \frac{T_0}{T_n}} = 0;$$

$$\beta^* = \frac{\alpha_i}{1 + \sqrt[n]{\frac{\alpha_i^n}{\prod_{i=1}^n \alpha_i} \frac{T_0}{T_n}}}. \quad /19/$$

Если степени расширения и к.п.д. всех детандеров равны, то  $\alpha_i = \text{Const}$  и формулы /16/, /18/, /19/ несколько упрощаются.

$$T_i = \sqrt[n]{T_0^{n-i} T_n^i}, \quad /16a/$$

$$D_i = \frac{\beta \sum_{i=1}^n D_i + m\beta + x}{\alpha(1-\beta) - \beta \sqrt[n]{\frac{T_0}{T_n}}} \left( \sqrt[n]{\frac{T_0}{T_n}} - 1 \right). \quad /18a/$$

$$\beta^* = \frac{\alpha}{1 + \sqrt[n]{\frac{T_0}{T_n}}}. \quad /19a/$$

Для этого случая нетрудно получить общую формулу для вычисления потока в любой детандер /приводится без вывода/:

$$D_i = \frac{(m\beta + x) [\alpha(1-\beta) + \beta]^{n-i}}{[\alpha(i-\beta) - \beta \sqrt[n]{\frac{T_0}{T_n}}]^{n-i+1}} \left( \sqrt[n]{\frac{T_0}{T_n}} - 1 \right). \quad /20/$$

Из формул /16/, /16a/ следует, что оптимальные температуры ступеней охлаждения не зависят ни от режима работы /величины  $m$  и  $x$ /, ни от величины недорекуперации ( $\beta$ ). Напротив, потоки газа через детандеры существенно зависят от упомянутых величин, причем во всех реальных случаях ( $\beta \neq 0$ ) в каждый из детандеров должно поступать различное количество газа. Действительно, из равенства /20/ находим

$$\frac{D_i}{D_{i+1}} = \frac{\alpha(1-\beta) + \beta}{\alpha(1-\beta) - \beta \sqrt[n]{\frac{T_0}{T_n}}} > 1.$$

Отсюда следует, что поток газа через детандеры последовательно уменьшается от первого детандера к последующим.

Эти выводы прямо противоположны выводам, сделанным в работе /2/, автор которой пытался рассчитать оптимальное положение и производительность ступеней охлаждения в гелиевом холодильном цикле, но пришел к неверным результатам. Он пишет: "...при каскадной работе в каждый из детандеров должно поступать одинаковое количество газа", /стр. 97/ и "... в холодильном цикле оптимальные температуры газа на выходе из детандеров ... значительно ниже, чем для идеального ожигительного цикла" /стр. 99/. Ошибка автора этой работы в том, что он неправоммерно распространяет принятое допущение о линейном характере изменения недорекуперации на теплых концах межступенчатых теплообменников на разность температур между прямым и обратным потоком в любом месте цикла. Очевидно, что

при равенстве водяных эквивалентов потоков разность температур в межступенчатых теплообменниках следует считать постоянной.

## 2. Цикл с последовательным включением детандеров

Введем следующие обозначения /рис. 3/ :

$$\sigma_i = \frac{P_i}{P_{i+1}}; \quad a_i = \frac{\eta_i(\sigma_i^Y - 1)}{\eta_i + (1 - \eta_i)\sigma_i^Y}$$

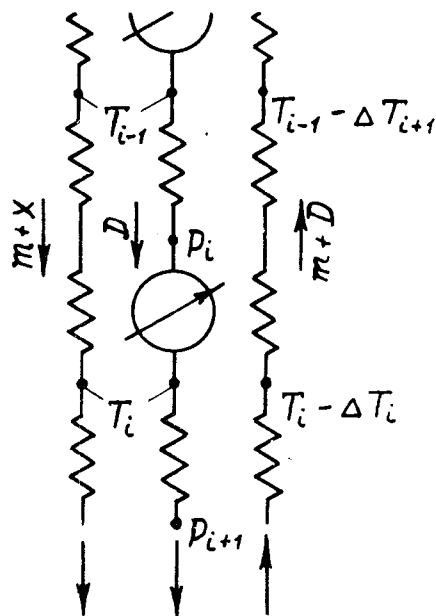


Рис. 3. К расчету цикла с последовательным включением детандеров.

Примем, как и раньше, линейный закон изменения недоокупаемости на "теплых" концах межступенчатых теплообменников  $\Delta T_i = \beta T_i$ .

Из уравнения теплового баланса для участка цикла между уровнями  $i$  и  $i-1$  находим\*

$$D_i = \frac{m\beta + x}{a_i - \beta\left(\frac{T_{i-1}}{T_i} - 1\right)} \left(\frac{T_{i-1}}{T_i} - 1\right). \quad /21/$$

Так как в этом цикле расход газа через все детандеры одинаков, то

$$\frac{\frac{T_{i-1}}{T_i} - 1}{a_i - \beta\left(\frac{T_{i-1}}{T_i}\right)} = \frac{\frac{T_i}{T_{i+1}} - 1}{a_{i-1} - \beta\left(\frac{T_i}{T_{i+1}}\right)} \quad \text{или} \quad \frac{\frac{a_i}{\frac{T_{i-1}}{T_i} - 1}}{\frac{T_{i-1}}{T_i} - 1} = \frac{\frac{a_{i+1}}{\frac{T_i}{T_{i+1}} - 1}}{\frac{T_i}{T_{i+1}} - 1}. \quad /22/$$

Из этого равенства находим

$$T_i = \frac{(1 - \phi_i) T_{i+1} + \sqrt{(1 - \phi_i)^2 T_{i+1}^2 + 4\phi_i T_{i-1} T_{i+1}}}{2}. \quad /23/$$

Здесь  $\phi_i = \frac{a_{i+1}}{a_i}$ .

Из уравнений /22/ и /23/ получить общее решение для  $T_i$  затруднительно. Если принять, что для всех детандеров в цикле  $a_i = \text{Const}$ , то  $\phi = 1$  и из /23/ получим

\* Строго говоря, в схеме с последовательным включением детандеров не все они находятся в одинаковых условиях: за последним детандером отсутствует трехпоточный теплообменник /рис. 1б/, поэтому температура за этим детандером должна совпадать с температурой обратного потока  $T_n(1 - \beta)$ , а не прямого  $T_n$ , как для всех предыдущих детандеров. В данной работе это небольшое различие не учитывается.



$$T_i = \sqrt{T_{i-1} T_{i+1}} = \sqrt[n]{T_0^{n-i} T_n^i} \quad /24/$$

Для этого случая поток газа через детандеры

$$D_i = \frac{m\beta^{i+1} x}{a - \beta \left( \sqrt[n]{\frac{T_0}{T_n}} - 1 \right)} \left( \sqrt[n]{\frac{T_0}{T_n}} - 1 \right) \quad /25/$$

Цикл сохраняет работоспособность до тех пор, пока

$$\beta > \beta^* = \frac{a}{\sqrt[n]{\frac{T_0}{T_n}} - 1} \quad /26/$$

Отметим, что и для этой схемы оптимальные температуры ступеней не зависят от  $\beta$ , а поток через детандеры зависит, как от  $\beta$ , так и от режима работы.

### 3. Сравнение циклов

Сравним теперь относительную эффективность циклов с параллельным /I/ и последовательным /II/ включением детандеров. Как было показано выше, характеристикой относительной эффективности может служить

величина  $\frac{\sum D_I}{D_{II}}$ . Рассмотрим сначала идеальный

случай, когда  $\beta = 0$ , к.п.д. всех детандеров равны, а отношения давлений в цикле с последовательным включением детандеров  $\sigma_i = \frac{P_i}{P_{i+1}} = \sqrt[n]{\frac{P_1}{P_2}}$ . Для этих условий

$$\frac{\sum D_I}{D_{II}} = \frac{n a_{II}}{a_I} \frac{n \left( \sqrt[n]{\sigma^Y} - 1 \right) \left| \sigma^Y - \eta \left( \sigma^Y - 1 \right) \right|}{\left( \sigma^Y - 1 \right) \left[ \sqrt[n]{\sigma^Y} - \eta \left( \sqrt[n]{\sigma^Y} - 1 \right) \right]} \quad /27/$$

Обозначим  $\sqrt[n]{\sigma^Y} = y$ , тогда  $\sigma^Y = y^n$ , и заметим, что  $y > 1$ . Так как для всех  $1 < n < \infty$ ,

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{\sum D_I}{D_{II}} = \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{n(y-1) [y^n - \eta(y^n - 1)]}{(y-1) [y - \eta(y-1)]} = \frac{n(y-1)y^n}{(y^n - 1)y} =$$

$$= \frac{ny^{n-1}}{y^{n-1} + y^{n-2} + \dots + y + 1} = \frac{n}{1 + \frac{1}{y} + \dots + \frac{1}{y^{n-1}}} > 1,$$

а

$$\lim_{\eta \rightarrow 1} \frac{\sum D_I}{D_{II}} = \frac{n(y-1)}{y^n - 1} = \frac{n}{y^{n-1} + y^{n-2} + \dots + y + 1} < 1,$$

то существует такой к.п.д. детандеров  $\eta^*$ , при котором

$\frac{\sum D_I}{D_{II}} = 1$ , т.е. эффективность обеих схем одинакова. Значение этого к.п.д. найдем, приравняв единице выражение /27/.

$$\eta^* = \frac{n\sigma^Y \left( \sqrt[n]{\sigma^Y} - 1 \right) - \left( \sigma^Y - 1 \right) \sqrt[n]{\sigma^Y}}{\left( n - 1 \right) \left( \sigma^Y - 1 \right) \left( \sqrt[n]{\sigma^Y} - 1 \right)} =$$

$$= \frac{\left( n - 1 \right) \sigma^Y - \sqrt[n]{\sigma^{Y(n-1)}} - \sqrt[n]{\sigma^{Y(n-2)}} - \dots - \sqrt[n]{\sigma^Y}}{\left( n - 1 \right) \left( \sigma^Y - 1 \right)} \quad /28/$$

Так для

$$n = 2 \quad \eta^* = \frac{\sigma^Y - \sqrt{\sigma^Y}}{\sigma^Y - 1}; \quad /29/$$

$$n = 3 \quad \eta^* = \frac{2\sigma^\gamma - \sqrt[3]{\sigma^{2\gamma}} - \sqrt[3]{\sigma^\gamma}}{2(\sigma^\gamma - 1)};$$

$$n = 4 \quad \eta^* = \frac{3\sigma^\gamma - \sqrt[4]{\sigma^{3\gamma}} - \sqrt[4]{\sigma^{2\gamma}} - \sqrt[4]{\sigma^\gamma}}{3(\sigma^\gamma - 1)}.$$

При бесконечно большом числе детандеров значение  $\eta^*$  стремится к следующему пределу.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \eta^* = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n\sigma^\gamma}{n(n-1)(\sigma^\gamma - 1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{n}{\sqrt[n]{\sigma^\gamma}}}{(n-1)(\frac{n}{\sqrt[n]{\sigma^\gamma}} - 1)}$$

Последовательно применяя правило Лопиталья, находим

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \eta^* &= \frac{\sigma^\gamma}{\sigma^\gamma - 1} - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(n-1)^2} = \\ &= \frac{\sigma^\gamma}{\sigma^\gamma - 1} - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} \frac{n}{\sqrt[n]{\sigma^\gamma} \ln \sigma^\gamma} = \\ &= \frac{\sigma^\gamma}{\sigma^\gamma - 1} - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n}{2(n-1) \ln \sigma^\gamma} \end{aligned}$$

и, наконец,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \eta^* = \frac{\sigma^\gamma}{\sigma^\gamma - 1} - \frac{1}{\ln \sigma^\gamma} \quad /30/$$

Зависимость  $\eta^*$  от  $\sigma$  для циклов с различным числом детандеров показана на рис. 4. Если к.п.д. детандеров  $\eta > \eta^*$ , более эффективным является цикл с параллельным включением детандеров, если  $\eta < \eta^*$  - с последовательным. На рис. 5 приведены результаты сравнения эффективности циклов с каскадом из двух детандеров для ожигительного режима. Хорошо видна инверсия эффективности. Так, для  $\sigma = 20$  и  $\eta = 0,9$  цикл с параллельным включением детандеров выгоднее на 23%, при  $\eta = 0,8$  - на 12%, при  $\eta = 0,64$  эффективность циклов сравнивается, а при более низких к.п.д. становится более выгодным цикл с последовательным включением /при  $\eta = 0,5$  на 8%/. Значения  $\eta = 0,6 \div 0,65$  характерны для гелиевых

микротурбодетандеров, поэтому при их использовании следует отдавать предпочтение циклу с каскадом последовательно включенных машин. В этом цикле благоприятным для турбодетандеров является также то, что в каждой ступени срабатывает только часть общего перепада давлений.

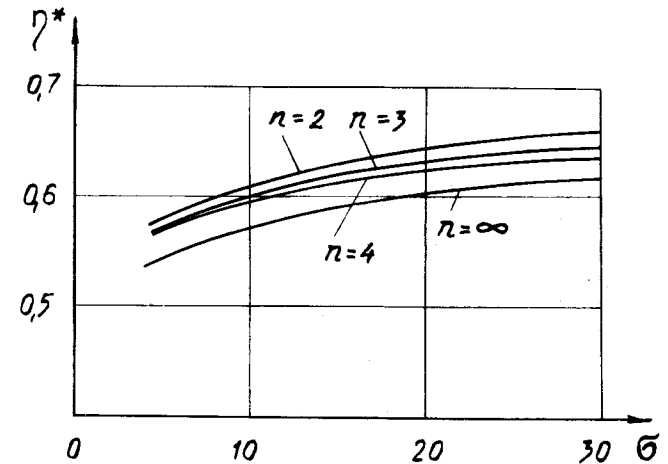


Рис. 4. Зависимость граничного к.п.д. от степени расширения. Если к.п.д. детандеров  $\eta > \eta^*$ , более эффективен цикл с параллельным включением детандеров; если  $\eta < \eta^*$  - с последовательным.

Влияние недорекуперации на эффективность циклов при работе в ожигительном режиме показано на рис. 6, в рефрижераторном - на рис. 7. Видно, что цикл с последовательным включением турбодетандеров более "чувствителен" к величине недорекуперации, следовательно, при его использовании необходимы теплообменники с большей поверхностью.

#### Основные результаты работы и выводы

1. Решена в общем виде задача о наиболее рациональном включении детандеров в каскадный гелиевый ожигительный или рефрижераторный цикл при линейном законе изменения недорекуперации от температуры  $\Delta T = \beta T$ .

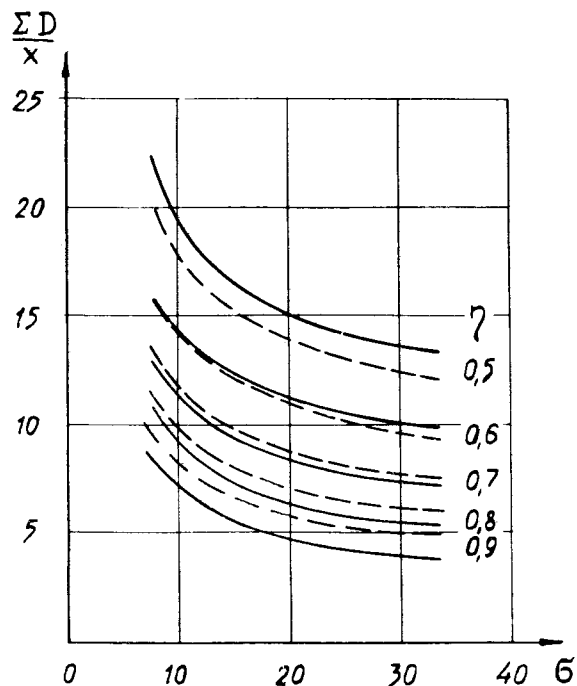


Рис. 5. Сравнение эффективности каскадных циклов с двумя детандерами для охладительного режима. Сплошные кривые - параллельное включение детандеров, пунктирные - последовательное.  $T_0 = 300 \text{ K}$ ,  $T_n = 12 \text{ K}$ ,  $\beta = 0$ .

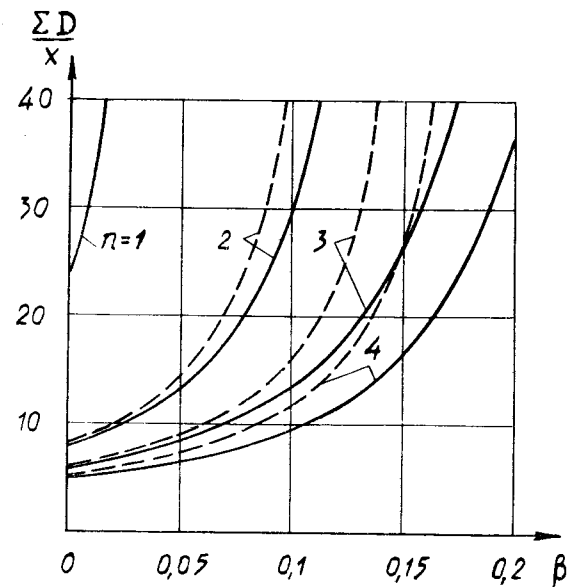


Рис. 6. Зависимость расхода гелия через детандеры от недорекуперации для охладительного режима. Сплошные кривые - параллельное включение детандеров, пунктирные - последовательное  $P_1, P_2 = 23,4$ ,  $\eta = 0,7$ ,  $T_0 = 300 \text{ K}$ ,  $T_n = 12 \text{ K}$ .

2. Показано, что, как при параллельном, так и при последовательном включении детандеров оптимальные температуры ступеней охлаждения не зависят ни от величины относительной недорекуперации, ни от режима работы установки. Напротив, поток газа через детандеры зависит от этих параметров, а при параллельном включении детандеров в каждый из них должно поступать различное количество газа.

3. Для заданного перепада давлений существует предельный к.п.д. детандеров, при котором эффективность схем с параллельным и последовательным включением детандеров одинакова. Если к.п.д. детандеров выше этого предельного - более эффективна первая схема, если ниже - вторая. Цикл с последовательным включением целесообразно применять при использовании турбодетандеров.

4. При прочих равных условиях одинаковая эффективность циклов достигается только в том случае, если в цикле с последовательным включением детандеров принята меньшая величина относительной недорекуперации, т.е. при большей поверхности теплообменников.

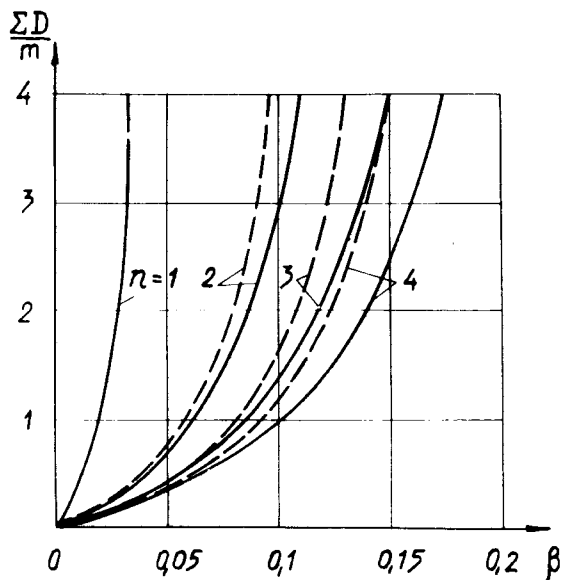


Рис. 7. Зависимость расхода гелия через детандеры от недорекуперации для рефрижераторного режима. Сплошные кривые - параллельное включение детандеров, пунктирные - последовательное.  $P_1/P_2 \approx 23,4$ ,  $\eta = 0,7$ ,  $T_0 = 300 \text{ K}$ ,  $T_n = 12 \text{ K}$ .

Автор пользуется возможностью выразить благодарность профессору А.Г.Зельдовичу и инженеру Н.Н.Агапову за полезные дискуссии, инженеру В.И.Липченко за помощь в расчетах.

#### Литература

1. П.Л.Капица. ЖТФ, XXIX, вып. 4, 1959, стр. 427-432.
2. И.Ф.Кузьменко. Известия вузов. Энергетика, №2, 1964, стр. 95-99.
3. P.Grassman, J.Kopp. Kaltechnik 9, No. 10, 1957, S. 306-308.

Рукопись поступила в издательский отдел  
28 июля 1975 года.