

3. Kurosaka M. Acoustic streaming in swirling flow and the Ranque-Hilsch (vortex-tube) effect. *J. Fluid. Mech* 1982, v. 124, pp. 139-172.

4. Roshko A. Structure of turbulent shear flows: a new look. *AIAA Journal*, 1976, v. 14, №10, pp. 1349-1357.

УДК 633.697.3

Ш.А. Пиралишвили, В.Н. Синев, М.Н. Жорник

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ СХЕМЫ ХОЛОДИЛЬНО-НАГРЕВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА НА ОСНОВЕ ВИХРЕВЫХ ТРУБ

Детальное исследование характеристик вихревой трубы с дополни- тельным потоком (ВТДП), имеющей высокий адиабатный к.п.д. ( $\varphi = 0,39$ ), существенно расширяет возможности регенеративных схем.

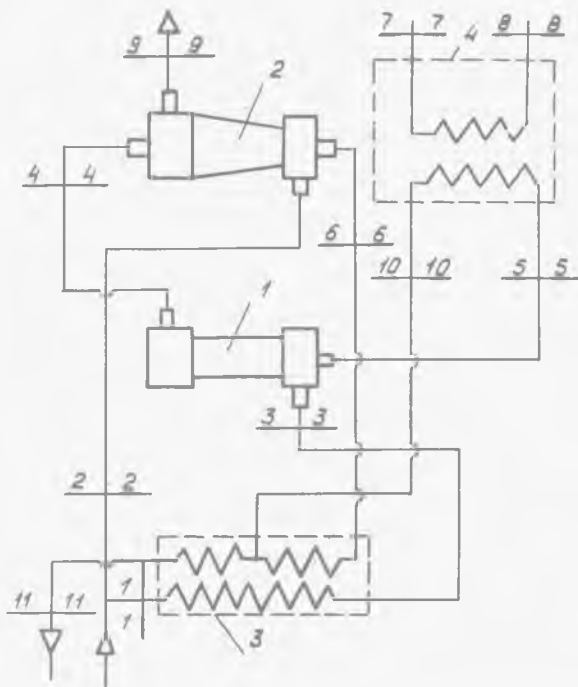
В работе рассматривается схема холодильно-нагревательного агре- гата (ХНА) (рис. 1), состоящего из двух ВТ, первая из которых является низкотемпературной трубой (НВТ) - 1, а другая ВТДП - 2.

Сжатый воздух подается в магистраль, где разделяется на две части. Одна часть проходит через регенеративный теплообменник 3, охлаждается и подается на вход низкотемпературной вихревой трубой. Холодный поток НВТ подается в теплообменник-рефрижератор 4, где отбирает у объекта охлаждения некоторое количество тепла и частично нагревается. Затем он подается в теплообменник-регенератор 3, где охлаждает входной по- ток НВТ и выбрасывается в атмосферу. Вторая часть сжатого воздуха по- ступает в завихритель ВТДП и участвует в процессе энергоразделения.

В качестве дополнительного потока используется "горячий" поток НВТ. Охлажденный воздух ВТДП подается в теплообменник-регенератор 3, а "горячий" поток выбрасывается в атмосферу или может быть использо- ван в эжекторе для компенсации гидрпотерь. Для определения влияния различных факторов на рабочий процесс ХНА и степени термодинамической эффективности вся схема была разбита рядом сечений (I-II), в которых определялись термодинамические параметры. Результатом анализа является выбор наиболее выгодных режимов работы схемы по наибольшей холодопро- изводительности при высоких значениях эксергетического  $\eta_e$  и адиа- батного  $\varphi$  к.п.д.

Термодинамика работы схемы описывается системой уравнений: баланса энергии схемы

$$(G_1 + G_2) c_p T_1 + A c_p T_1 = G_p c_p T + A c_p T + (G_x + G_x^*) (T_1 - \Delta T) c_p; \quad (I)$$



Р и с. 1. Принципиальная схема ХНА с регенерацией

баланса энергии теплообменника-регенератора 3

$$G_1 c_p (T_1 - T_3) = G_x c_p (T_{11} - T_{10}) + G_x' c_p (T_{11} - T_5); \quad (2)$$

баланса энергии теплообменника для охлаждения компонентов 4

$$G_x c_p (T_{10} - T_5) = (G_B c_{pB} + G_K c_{pK}) (T_1 - T_8); \quad (3)$$

НВТ I

$$T_5 = \theta_x' T_3; \quad (4)$$

баланса энергии НВТ

$$G_1 c_p T_3 = G_r c_p T_4 + G_x c_p T_5; \quad (5)$$

ВТДП 2

$$T_6 = \theta_x' T_1; \quad (6)$$

баланса энергии ВТДП

$$G_1 C_p T_1 + G_r C_p T_4 = G_x C_p T_6 + G_r' C_p T_3; \quad (7)$$

уравнением расхода

$$G_x = G_1 \left( \frac{M'+1-M}{M'} \right). \quad (8)$$

Параметр  $A$  в (1) представляет собой теплоемкости охлаждаемой системы. В частности, у термобарокамеры, предназначенной для испытаний воспламенителей факельного типа, эта величина определяется выражением

$$A = G_B \left( 1 + \frac{G_H}{G_B} \frac{C_{pK}}{C_{pB}} \right),$$

где  $G_H, C_{pK}$  - расход и теплоемкость охлажденного керосина;

$G_B, C_{pB}$  - расход и теплоемкость свежего воздуха, питающего воспламенитель.

Адиабатный к.п.д. схемы

$$\varphi = \frac{M_x (T_1 - T_5)}{\Delta t_s},$$

где

$$\Delta t_s = T_1 \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right],$$

$\Delta t_s$  - эффект охлаждения при изэнтропном процессе расширения газа.

Эксергетический к.п.д., учитывающий температурный уровень получаемого холода, составляет

$$\eta_e = \frac{A C_p [T_6 - T_1 (1 - \ln \frac{T_6}{T_1})]}{C_p T R T_1 G_x}$$

Так как ни один из вышеуказанных критериев не обладает универсальностью оценки энергетической эффективности, то предлагаются дополнительные критерии оптимизации

$$N = \eta_e \varphi; \quad N' = \frac{\eta_e \varphi}{B_c},$$

которые с большей полнотой отражают количественную и качественную оценки работы схемы, степень ее совершенства, а также дают возможность оптимизации режима работы для получения необходимой глубины охлаждения.

Алгебраическая обработка и преобразование системы уравнений позволили составить алгоритм ее решения. В качестве вариационных параметров были выбраны

$$\pi = \frac{P_2^*}{P_1^*} \quad - \text{степень расширения в вихре } \pi = 4; 5; 6.$$

Относительный расход холодного потока НВТ

$$M = \frac{G_x}{G_1}; \quad M = 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,85; 0,9.$$

Относительный расход холодного потока в ВТДП

$$M' = \frac{G_x'}{G_1}; \quad M' = 0,5; 0,8; 1,0; 1,2.$$

Соответствующие величинам  $\mu$  и  $\mu'$  значения эффектов охлаждения  $\theta_x$  и  $\theta_x'$  взяты из экспериментальных работ [1] и [2].

Степень регенерации  $\xi$  - часть холодопроизводительности схемы, расходуемая на охлаждение в регенераторе самото воздуха, питающего НВТ. Определяется через соотношение температур

$$\xi = \frac{(T_{II} - T_{III})C_p G_B}{(T_{II} - T_{II'})C_p G}, \quad \xi = 0,2; 0,5; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95.$$

Степень недорегенерации в теплообменнике-регенераторе

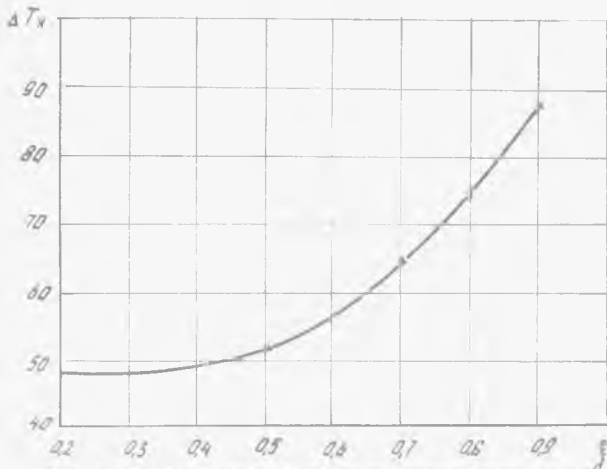
$$\Delta T = T_I - T_{II}, \quad \Delta T = 5K; 10K; 15K$$

Температура, определяющая степень охлаждения компонентов (объекта охлаждения),

$$\Delta T_K = T_8 - T_5, \quad \Delta T_K = 5K; 10K; 15K.$$

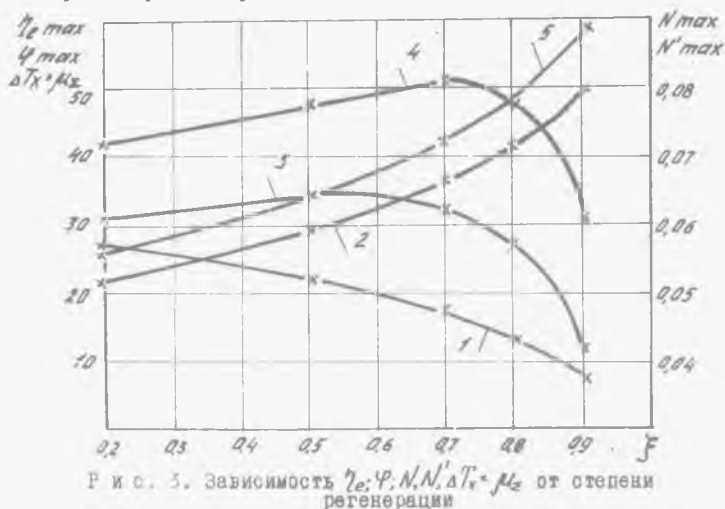
По полученному алгоритму была составлена программа для машины "Минск-22" и проведен расчет. Это позволило провести глубокий и всесторонний анализ возможностей данной схемы и выделить некоторые режимы работы, при которых величина эксергетического, адиабатного к.п.д., а, следовательно, параметр оптимизации  $N$  и  $N'$  и величина холодопроизводительности имеют экстремальные значения. В дальнейшем ограничимся исследованием именно этих режимов.

Из рис. 2 видно, что схема позволяет получить сравнительно большую глубину охлаждения, величина которой растет с увеличением степени регенерации  $\xi$ , т.е. основная работа по организации процесса охлаждения падает на теплообменник-регенератор 3.



Р и с. 2. Зависимость эффекта охлаждения от степени регенерации

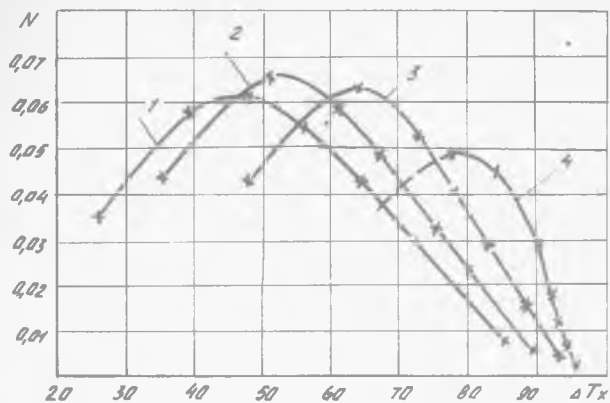
Заданная глубина охлаждения может быть достигнута с различными энергетическими затратами, причем величины адиабатного и эксергетического к.п.д. зависят от режима работы  $\mu_{\Sigma}$  и степени регенерации  $\xi$ . Зависимости эксергетического и адиабатного к.п.д. от величины  $\mu_{\Sigma}$  имеют экстремальные точки. Однако следует отметить, что с ростом степени регенерации адиабатный к.п.д. растет, а эксергетический к.п.д. уменьшается (рис. 3). Для каждой степени охлаждения существует предельное значение эксергетического к.п.д., величина которого определяется конкретно выбранным режимом работы схемы.



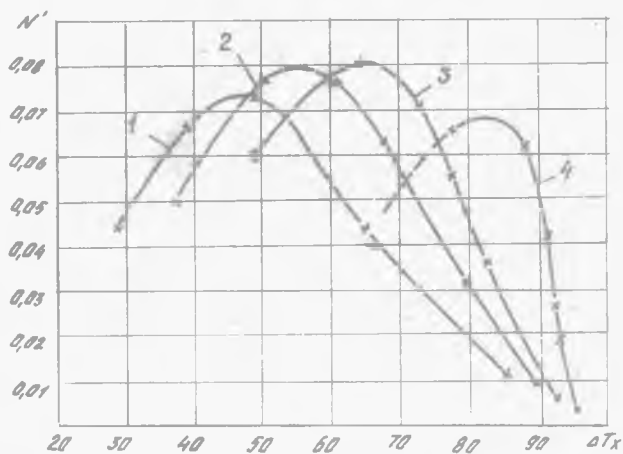
Р и с. 3. Зависимость  $\eta_e, \varphi, N, N', \Delta T_x, \mu_{\Sigma}$  от степени регенерации

Таким образом, можно отметить, что максимумы у таких параметров, как  $\varphi, \eta_e$  и относительная глубина охлаждения  $\theta_c$ , не совпадают между собой. Поэтому с их помощью нельзя сделать однозначного вывода, отдающего предпочтение с точки зрения энергетической эффективности какому-либо режиму.

Как видно из графиков рис. 3, критерии оптимизации  $N$  и  $N'$  как функции степени регенерации имеют сравнительно четко выраженные максимумы, позволяющие сделать однозначные заключения, что при работе по данной схеме включения ВТ оптимальные значения степени регенерации  $0,7 > \xi > 0,5$ . Это указывает на то, что работа по охлаждению должна быть примерно одинаково распределена между НЕТ и теплообменником-регенератором. При этом с увеличением потребной степени охлаждения величина  $\xi_{opt}$  по энергетической эффективности смещается к своему крайнему правому значению (в сторону больших значений).



Р и с. 4. Зависимость параметра  $N$  от  $\Delta T_x$



Р и с. 5. Зависимость параметра  $N'$  от  $\Delta T_x$

На рис. 4 и 5 показана зависимость введенных параметров оптимизации  $N$  и  $N'$  от потребной степени охлаждения для различных степеней регенерации. Из графиков следует, что для каждой степени охлаждения существует однозначная величина степени регенерации  $\xi$ , позволяющая осуществить работу схемы в наиболее выгодном энергетическом режиме.

#### В ы в о д ы

1. Максимумы энергетической эффективности ограничены заданной величиной степени охлаждения.

2. Наиболее полно качественную сторону работы схемы характеризуют введенные параметры оптимизации, учитывающие термодинамическое совершенство процесса охлаждения, качественное использование холодопроизводительности и величину степени охлаждения.

3. Исследованная в работе схема на 20% превосходит по адиабатному к.п.д. известные схемы.

#### Л и т е р а т у р а

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969.

2. Пиралишвили Ш.А. Исследование вихревой трубы с дополнительным потоком. Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук.-Куйбышев: КуАИ, 1971.

УДК 532.527

В.М.Кудрявцев, В.М.Сукчев, Г.П.Токарев, А.Ю.Цыбров

#### РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

В работе [1] для учета отклонения от изэнтропного радиального распределения параметров в сопловом сечении вводится показатель политропы. В работе представлена термодинамическая оценка, возникающая при этом явлении. До машинного счета и, следовательно, до получения расчетных характеристик авторы не дошли. Основной вывод работы в том, что совпадение теории с экспериментом получится в области, где  $n < K$ .

В работе [2] также принимается политропное распределение параметров, но уже для определения численных значений  $n$  используется уравнение сохранения энергии для теплоизолированной вихревой трубы при  $M = 1$ . Найденное значение  $n$  использовалось неизменным при расчете зависимости эффекта охлаждения от массовой доли охлажденного газа и только на критическом режиме, т.е. расчетных характеристик в широком диапазоне  $\mathcal{P}$  автором не получено.