

Расчет и оценка эффективности холодильных центробежных компрессоров методом обобщенной политропы

Д-р техн. наук Н.Н. БУХАРИН, А.А. ПОПОВ
СПбГУНиИТ

The article considers the most general and strict method of calculation of polytropic processes in uncooled refrigerating centrifugal compressors – the common method, when operating both on any real gas (or their mixture), or on ideal gas. The performed analysis gives the reasons to recommend in all the cases the determination of polytropic efficiency of compressors by the method of generalized polytrope, providing strict and stable results under all the initial and final conditions, not depending on the sphere of the constitution diagram, where the calculated processes take place. The method of generalized polytrope is useful as a basis of modern methods of calculations and evaluation of centrifugal compressors efficiency.

В современном компрессорном и, в частности, холодильном машиностроении широкое распространение получили центробежные компрессоры, сжимающие реальные рабочие вещества при средних и высоких давлениях. В этих условиях свойства сжимаемых веществ значительно отличаются от свойств идеального газа, на уравнении состояния которого базируются наиболее распространенные и хорошо апробированные методики расчета. Традиционно расчет параметров рабочего вещества в многоступенчатых центробежных компрессорах, отдельных ступенях и элементах проточной части проводится в предположении, что все процессы, проходящие в них, являются политропными.

Применение уравнения процесса, справедливо-го для идеального газа,

$$p v^n = \text{const}, \quad (1)$$

где p и v – текущие значения давления и удельного объема соответственно,

при расчете процессов в реальных газах дает ощутимые погрешности даже при низких давлениях, что делает невозможным его прямое использование в таких случаях. Тем не менее относительная простота расчетов, основанных на использовании уравнения (1), оказалась настолько привлекательной, что до настоящего времени делаются попытки разработки уточненных методов расчета политропных процессов в реальных газах, основанных на его использовании.

Одной из первых работ в этом направлении, оказывающей еще и сейчас значительное влияние на развитие методов расчета центробежных компрес-

соров, сжимающих реальные газы, была работа Дж. Шульца [4], который пришел к трем уравнениям с тремя разными показателями политропы в реальном газе вместо одного уравнения процесса (1) с одним показателем политропы в идеальном газе:

$$\begin{aligned} p v^n &= \text{const}; \\ \frac{p^m}{T} &= \text{const}; \\ \frac{p^{\frac{n-1}{n}-m}}{z} &= \text{const}, \end{aligned} \quad (2)$$

где T – текущее значение температуры.

Показатели степени в этих уравнениях определяются по зависимостям:

$$\begin{aligned} m &= \frac{\lg(T_k/T_n)}{\lg(p_k/p_n)}; \\ n &= \frac{\lg(p_k/p_n)}{\lg(v_n/v_k)}; \\ m - \frac{n-1}{n} &= \frac{\lg(z_n/z_k)}{\lg(p_k/p_n)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где z – коэффициент сжимаемости;

индексы «н» и «к» соответствуют началу и концу процесса.

В реальном газе показатели (3) могут быть определены точно только в дифференциальной форме и в такой записи представляют собой осредненные значения. Расчет параметров трехступенчатого компрессора по результатам испытаний Дж. Шульца проводит по зависимостям:

$$n = \frac{\lg(p_k/p_n)}{\lg(v_n/v_k)}; \quad (4)$$

$$k = \frac{\lg(p_k/p_n)}{\lg(v_n/v_{ks})}; \quad (5)$$

где k – показатель изоэнтропы;
 s – индекс конца изоэнтропного сжатия;

$$f = \frac{i_{ks} - i_n}{\frac{k}{k-1}(p_k v_{ks} - p_n v_n)}; \quad (6)$$

$$l_{\text{пол}} = \int_n^k v dp = f \frac{n}{n-1} (p_k v_k - p_n v_n), \quad (7)$$

где f – фактор политропного напора;
 $l_{\text{пол}}$ – политропная работа;

$$\eta_i = \eta_{\text{пол}} = \frac{\int_n^k v dp + \frac{c_k^2 - c_n^2}{2}}{i_k^* - i_n^*}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{пол}}$ – политропный КПД процесса;
 i – энтальпия рабочего вещества;
 $*$ – верхний индекс, обозначающий параметры торможения.

Удельные объемы v_n, v_k, v_{ks} и энтальпии i_n^*, i_k^*, i_{ks}^* находят по результатам измерений с помощью диаграмм состояния, таблиц или непосредственно по уравнению состояния реального рабочего вещества и полученным на его основе зависимостям для определения калорических параметров. Введение в расчет «фактора политропного напора» f обусловлено расхождением значений изоэнтропной работы, определенной по формулам

$$l_s = \frac{k}{k-1} (p_k v_{ks} - p_n v_n); \quad l_s = i_{ks} - i_n,$$

и связано с тем, что значение показателя изоэнтропы k находилось по формуле (5). Возникающее при этом расхождение вызвано тем, что в реальном газе значение показателя изоэнтропы – переменная величина, а уравнение (5) дает некоторое среднее значение k и, кроме того, это среднее значение относится к теоретическому изоэнтропному процессу « $n - ks$ », а не к действительному процессу « $n - k$ », для которого, собственно, и определяется политропная работа (7).

В настоящее время в термогазодинамике турбомашин наиболее часто используется уравнение состояния идеального газа, которое лежит в основе почти всех теоретических и прикладных методов расчета. Поэтому желательно сохранить преемственность в использовании таких методов применительно к процессам, происходящим в реальных газах. Этим тре-

бованиям удовлетворяет метод условных температур, идея которого была высказана В. Траупелем, а впервые применена к расчетам холодильных центробежных машин Ф. М. Чистяковым [3]. В более законченном виде метод сформулирован в работах [1, 2].

Метод условных температур базируется на уравнении реального газа в виде $p v = zRT$, где произведение zT , имеющее размерность температуры, рассматривается как некоторая условная температура $T_y = zT$. В этом случае уравнение состояния реального газа примет вид $p v = RT_y$, формально совпадающий с уравнением идеального газа. Главным достоинством метода является возможность выполнения всех расчетов процессов в реальных газах в том же виде, что и для идеального газа, включая поэлементные расчеты центробежных компрессоров, что практически невозможно при использовании метода Шульца. Подробное описание метода дано в вышеупомянутых работах.

Общий недостаток обоих методов состоит в их ориентации на уравнение (1) политропного процесса, справедливого лишь для идеального газа.

Предполагаемый метод обобщенной политропы использует определение политропного процесса в реальном газе как процесса с постоянной теплоемкостью.

Количество теплоты, подведенной к 1 кг вещества в политропном процессе « $n - k$ » (рис. 1),

$$q_{n-k} = c_{\text{пол}} (T_n - T_k), \quad (9)$$

где $c_{\text{пол}}$ – теплоемкость политропного процесса.

Приращение энтропии в политропном процессе

$$s_n - s_k = c_{\text{пол}} \int_n^k \frac{dT}{T} = c_{\text{пол}} \ln \frac{T_n}{T_k}. \quad (10)$$

Отсюда можно определить теплоемкость политропного процесса

$$c_{\text{пол}} = \frac{s_k - s_n}{\ln \frac{T_k}{T_n}} \quad (11)$$

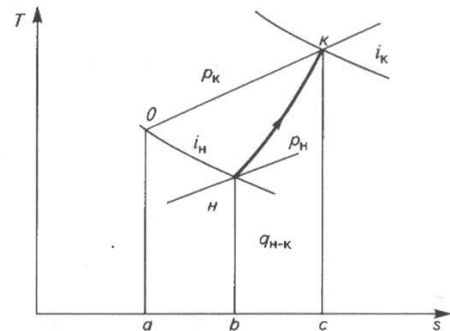


Рис. 1. Политропный процесс сжатия реального газа

и удельное количество теплоты, подведенной в процессе сжатия к рабочему веществу, равное потерянной работе $l_{н-к}$:

$$q_{н-к} = l_{гн-к} = (s_k - s_n) \frac{T_k - T_n}{\ln \frac{T_k}{T_n}}. \quad (12)$$

Используя полученные уравнения, можно считать произвольный политропный процесс в любом реальном газе (рис.1). Полная работа сжатия равна разности энтальпий в конце и начале процесса:

$$l_{н-к} = i_k - i_n > 0. \quad (13)$$

Техническая работа политропного сжатия равна разности полной и потерянной работ:

$$l_{полн-к} = \int_n^k v dp = l_{н-к} - l_{гн-к} > 0, \quad (14)$$

или

$$l_{полн-к} = i_k - i_n - (s_k - s_n) \frac{T_k - T_n}{\ln \frac{T_k}{T_n}}. \quad (15)$$

Политропный КПД процесса сжатия определяется, как обычно:

$$\eta_{пол} = 1 - \frac{l_{гн-к}}{l_{н-к}} = 1 - \frac{s_k - s_n}{i_k - i_n} \frac{T_k - T_n}{\ln \frac{T_k}{T_n}}. \quad (16)$$

Выражения (15) и (16), полученные в предположении постоянства теплоемкости политропного процесса, являются универсальными для любых рабочих веществ, включая идеальный газ как частный случай. Эти формулы получены без каких-либо допущений о свойствах рабочего вещества, сжимаемого в компрессоре; все эти свойства учтены опосредованно через термические и calorические параметры, которые определяются для каждого рабочего вещества индивидуально в соответствии с уравнением состояния, описывающим его свойства. Это дает основание считать зависимости, полученные методом обобщенной политропы, наиболее общими, строгими и принять их за основу для сравнения при расчетах политропных процессов и оценке эффективности центробежных компрессоров.

Различие в определении параметров в характерных сечениях ступени центробежного компрессора при использовании методов обобщенной политропы и условных температур видно из следующего примера.

Сравниваются группы уравнений обработки результатов поэлементного экспериментального ис-

следования и определение параметров рабочего колеса.

Измерены массовый расход G и статическое давление при выходе колеса p_2 . Известны все параметры в предыдущих сечениях и геометрия колеса.

Метод обобщенной политропы:

$$\begin{aligned} i_2 &= i_0 + \Omega_{0-2} l; \\ \rho_2 &= f(p_2, i_2); \\ \Phi_{2r} &= \frac{G}{\rho_2 F_{2k} u_2}; \\ 1 + \beta_{пр} + \beta_{тр} &= f(\Phi_{2r}, \Phi_{2u}, \bar{p}_2); \\ \Phi_{2u} &= \frac{l}{u_2^2 (1 + \beta_{пр} + \beta_{тр})}; \\ \Omega_{0-2} &= 1 - \frac{\Phi_{2r}^2 + \Phi_{2u}^2 - \Phi_0^2}{2(1 + \beta_{пр} + \beta_{тр}) \Phi_{2u}}; \\ s_2 &= f(p_2, i_2); \\ l_{r0-2} &= (s_2 - s_0) \frac{T_2 - T_0}{\ln T_2 / T_0}; \\ \eta_{пол 0-2} &= 1 - \frac{s_2 - s_1}{i_k^* - i_n^*} \frac{T_2 - T_0}{\ln T_2 / T_0}. \end{aligned}$$

Метод условных температур:

$$\begin{aligned} T_{y2} &= T_{y0} + \Omega_{0-2} (T_{yk}^* - T_{yn}^*); \\ \rho_2 &= \frac{p_2}{RT_{y2}}; \\ \Phi_{2r} &= \frac{GRT_{y2}}{p_2 F_{2k} u_2}; \\ 1 + \beta_{пр} + \beta_{тр} &= f(\Phi_{2r}, \Phi_{2u}, \bar{p}_2); \\ \Phi_{2u} &= \frac{\sigma_s R (T_{yk}^* - T_{yn}^*)}{(1 + \beta_{пр} + \beta_{тр}) u_2^2}; \\ \Omega_{0-2} &= 1 - \frac{\Phi_{2r}^2 + \Phi_{2u}^2 - \Phi_0^2}{2(1 + \beta_{пр} + \beta_{тр}) \Phi_{2u}}; \\ \sigma_{0-2} &= \frac{\lg p_2 / p_0}{\lg T_{y2} / T_{y0}}; \\ l_{r0-2} &= (\sigma_s - \sigma_{0-2}) R (T_{y2} - T_{y0}); \\ \eta_{0-2} &= 1 - \Omega_{0-2} \left(1 - \frac{\sigma_{0-2}}{\sigma_s} \right). \end{aligned}$$

Первые шесть уравнений обеих групп представляют собой замкнутые системы, остальные три параметра вычисляются после их решения.

Нами проведена сравнительная оценка результатов определения термодинамических параметров холодильных турбоагрегатов на основе использования приближенных методов Шульца, условных

температур и метода обобщенной политропы.

Термические и калорические параметры рабочего вещества находились с помощью уравнения состояния Боголюбова – Майера с вириальными коэффициентами, в размерном

$$z = \frac{pv}{RT} = 1 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{S_j} b_{ij} \frac{\rho^i}{\tau^j}$$

или безразмерном виде

$$z = \frac{pv}{RT} = 1 + \sum_{i=1}^r \sum_{j=0}^{S_j} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j}$$

Здесь z – коэффициент сжимаемости;

p – давление, Па;

v – удельный объем, м³/кг;

R – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

b_{ij} – коэффициенты уравнения;

$\tau = T/T_{кр}$ – приведенная температура;

$T_{кр}$ – критическая температура, К;

$\omega = \rho/\rho_{кр}$ – приведенная плотность;

ρ – плотность, г/см³;

$\rho_{кр}$ – критическая плотность, г/см³.

Погрешности, возникающие из-за неточности методов, применяемых для расчетов и в том числе для обработки опытных данных, оценивались для трех методов (обобщенной политропы, условных

температур и метода Шульца). Сравнение проводилось относительно метода обобщенной политропы.

Результаты обработки результатов экспериментальных исследований холодильного центробежного компрессора типа К60-82-1 приведены в таблице. Компрессор поддерживает температуры кипения этилена в трех испарительных системах (–90, –70, –56 °С) и подает этилен в конденсатор.

Для I секции отличие в значениях КПД, найденных методами Шульца, $\eta_{пол}^{шultz}$ и условных температур $\eta_{пол}^{усл}$ не превышает 0,5 %. Они меньше полученных методом обобщенной политропы $\eta_{пол}$ примерно на 1 %.

Для II секции компрессора все три метода дают близкие результаты – отличие сравниваемых величин не превышает 0,7 %.

Для III секции влияние метода обработки опытных данных невелико и не превышает 0,5 %.

Однако приведенные результаты имеют ограниченный и частный характер, так как не охватывают процессов сжатия во всех областях диаграмм состояния, где практически возможно сжатие. Это послужило основанием для проведения специального систематического численного эксперимента, при котором описанными выше способами нахо-

Газодинамические характеристики компрессора К60-82-1

I секция								
Режим	1	2	3	4	5	6	7	8
π_k	3,971	4,091	4,168	4,259	4,293	4,048	4,03	4,226
$\eta_{пол}$	0,6005	0,6155	0,6271	0,6148	0,5883	0,6291	0,6055	0,6078
$\eta_{пол}^{усл}$	0,5904	0,6054	0,6171	0,6041	0,5764	0,6194	0,5952	0,5968
$\eta_{пол}^{шultz}$	0,5929	0,608	0,6198	0,6069	0,5792	0,622	0,5978	0,5995
II секция								
π_k	1,62	1,567	1,607	1,594	1,587	1,604	1,573	–
$\eta_{пол}$	0,7321	0,74	0,7325	0,7155	0,6964	0,6559	0,6067	–
$\eta_{пол}^{усл}$	0,7312	0,7392	0,7317	0,7147	0,6955	0,6549	0,6056	–
$\eta_{пол}^{шultz}$	0,7314	0,7393	0,7321	0,7151	0,6956	0,6553	0,6061	–
III секция								
π_k	2,424	2,348	2,585	2,555	2,598	2,580	2,572	–
$\eta_{пол}$	0,7083	0,6863	0,6953	0,7172	0,7129	0,6997	0,7068	–
$\eta_{пол}^{усл}$	0,7056	0,6837	0,6921	0,7142	0,7097	0,6965	0,7036	–
$\eta_{пол}^{шultz}$	0,7069	0,6847	0,6936	0,7155	0,7114	0,6979	0,7052	–

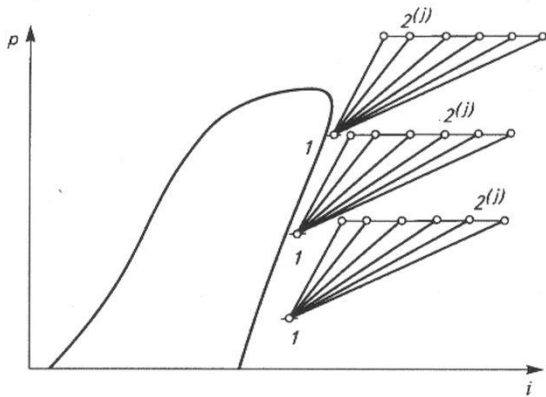


Рис. 2. Процессы сжатия в различных областях диаграммы состояния

дидлись значения политропных КПД процессов сжатия, проходящих в различных областях диаграмм состояния (рис. 2).

Расчеты проводились в областях низких, средних и высоких давлений при одном и том же отношении давлений. Начальные точки процессов сжатия выбирались в непосредственной близости от линии насыщенного пара, где свойства пара в наибольшей мере отличаются от свойств идеального газа. Исследовались процессы сжатия в рабочих веществах холодильной техники и химической и нефтегазовой промышленности: R12; R22; аммиак (R717); пропан (R290); этилен (R1150); метан (R50).

Для каждой точки 1 начала сжатия (см. рис. 2) рассчитывалось несколько процессов сжатия с постепенно возрастающими перепадами температур в точках, обозначенных 2^j , где j – текущий номер процесса. Это позволило, рассмотрев процессы сжатия с различными КПД (в пределах $\eta_{пол} \approx 0,8...0,5$), установить, в какой мере влияет на величину погрешности отклонение рассчитываемого процесса от изотропного.

Погрешности в определении удельных работ и КПД различными способами находятся относительно значений, вычисленных методом обобщенной политропы.

Для R12 на режиме низких давлений ($p_H = 0,4$ бар, $p_K = 4$ бар) (рис. 3) погрешности определения политропного КПД обоими методами достигают наименьших значений при наибольшем КПД и возрастают примерно на 0,8 % при наименьшем КПД. Так, при расчетах методом условных температур погрешности возрастают с 1 до 1,89 %. При расчетах методом Шульца погрешности меньше на ~ 1 % во всем диапазоне и также возрастают от 0,06 до 0,95 % с уменьшением КПД. На режиме средних давлений ($p_H = 1$ бар, $p_K = 10$ бар) погрешности определения политропного КПД изменили свой ха-

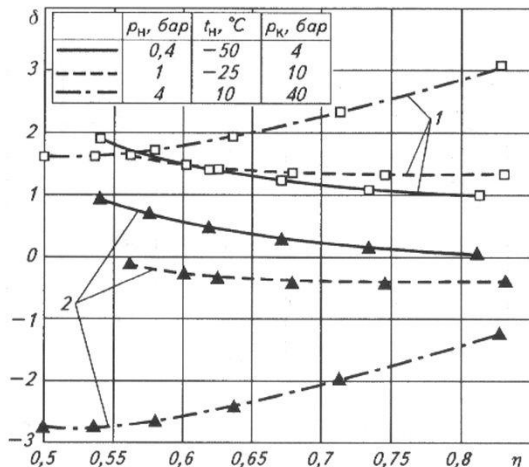


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности от η (R12): 1 – метод относительных температур; 2 – метод Шульца

актер. При расчетах методом условных температур они положительны и возрастают с уменьшением КПД от 1,38 до 1,63 %. При расчете методом Шульца погрешности стали отрицательными, т.е. значения КПД, рассчитанные методом Шульца, стали меньше значений, полученных по базовым зависимостям обобщенной политропы. При этом характер кривой сохранился таким же, как и в случае низких давлений, но из-за изменения знака наибольшая погрешность (-0,36 %) наблюдается при максимальном КПД и постепенно уменьшается до -0,11 % при минимальном. На режиме $p_H = 4$ бар, $p_K = 40$ бар погрешности определения КПД возросли до 1,62...3,07 % для метода условных температур и до -1,24...-2,76 % для метода Шульца.

Для R22 на режиме низких давлений ($p_H = 0,5$ бар, $p_K = 5$ бар) относительные погрешности определения политропного КПД обоими методами не превышают 0,8 % (рис. 4), достигая наименьших значений при низком КПД, и возрастают с его увели-

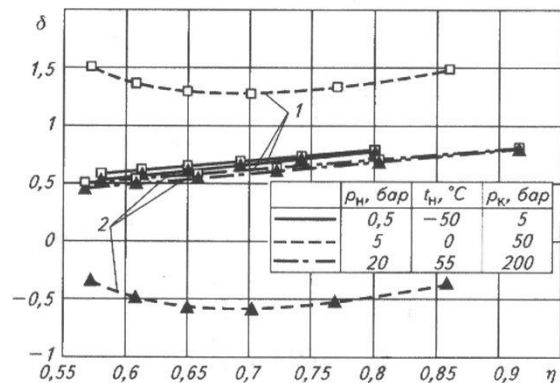


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности от η (R22): 1 – метод условных температур; 2 – метод Шульца

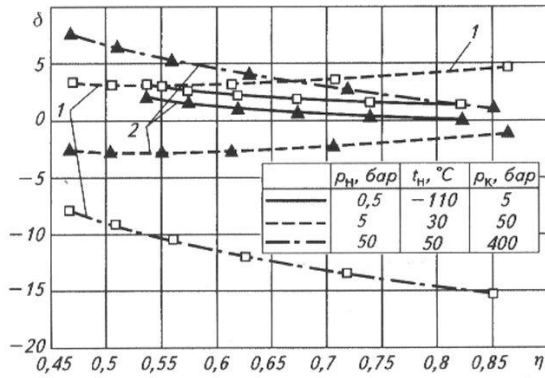


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности от η (R1150): 1 – метод условных температур; 2 – метод Шульца

чением. При расчетах методом условных температур погрешности слабо зависят от характера процессов сжатия и изменяются в пределах 0,6...0,8 %. При расчетах методом Шульца погрешности практически такие же во всем диапазоне. На режиме $p_H = 5$ бар, $p_K = 50$ бар погрешности определения политропного КПД практически такие же, как и на режиме низких давлений. На режиме высоких давлений ($p_H = 20$ бар, $p_K = 200$ бар) погрешности определения политропного КПД выше, чем в первых двух случаях. При расчетах методом условных температур погрешности составляют 1,3...1,5 %. При расчетах методом Шульца погрешности изменяют знак (-0,6...-0,3 %).

Для этилена R1150 на режиме низких давлений ($p_H = 0,5$ бар, $p_K = 5$ бар) погрешности определения политропного КПД при расчетах методом условных температур равномерно возрастают с повышением перепада температур и составляют 1,53...3,47 % (рис. 5). При расчетах методом Шульца погрешности меньше на ~ 1 % во всем диапазоне и также возрастают от 0,62 до 2,6 %. На режиме $p_H = 5$ бар,

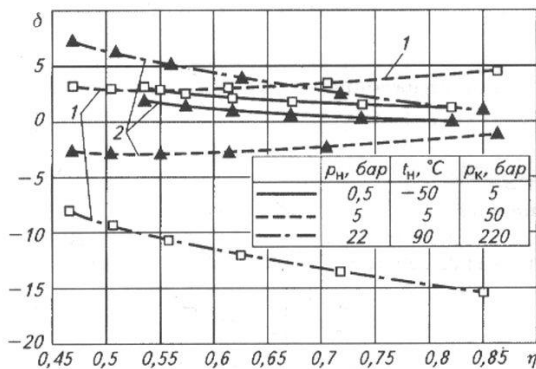


Рис. 6. Зависимость относительной погрешности от η (R290): 1 – метод условных температур; 2 – метод Шульца

$p_K = 50$ бар погрешности определения политропного КПД при расчетах методом условных температур составляют 3,1...4,8 %. При расчете методом Шульца они равны -1,5...-3,2 %. На режиме $p_H = 50$ бар, $p_K = 400$ бар погрешности определения политропного КПД при расчетах методом условных температур составляют -8...-15 %, уменьшаясь по модулю с ростом перепада температур и падением $\eta_{пол}$. При расчетах методом Шульца погрешности меньше и возрастают в пределах 1,9...6 %, увеличиваясь с падением $\eta_{пол}$.

Для пропана (R290) на режиме низких давлений ($p_H = 0,5$ бар, $p_K = 5$ бар) погрешности определения политропного КПД (рис. 6) при расчетах методом условных температур равномерно возрастают с повышением перепада температур и составляют 1,41...3,21 %. При расчетах методом Шульца погрешности меньше на ~ 1 % во всем диапазоне и также возрастают от 0,22 до 2%. На режиме $p_H = 5$ бар, $p_K = 50$ бар погрешности определения политропного КПД при расчетах методом условных температур составляют 4,7...3,27 %. При расчете методом Шульца погрешности отрицательны и равны -1,03...-2,56 %. На режиме $p_H = 22$ бар, $p_K = 220$ бар погрешности определения политропного КПД выше, чем на первых двух режимах. При расчетах методом условных температур они составляют -15,35...-8,06 %, увеличиваясь по модулю с ростом $\eta_{пол}$. При расчетах методом Шульца погрешности меньше, возрастают в пределах 1,22...7,47 %, увеличиваясь с падением $\eta_{пол}$.

Для аммиака R717 на режиме низких давлений ($p_H = 0,5$ бар, $p_K = 5$ бар) погрешности определения политропного КПД (рис. 7) при расчетах методом условных температур составляют 1,06...1,82 %. При

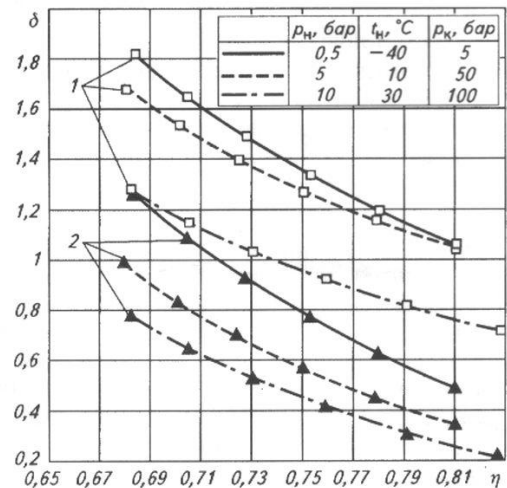


Рис. 7. Зависимость относительной погрешности от η (R717): 1 – метод условных температур; 2 – метод Шульца

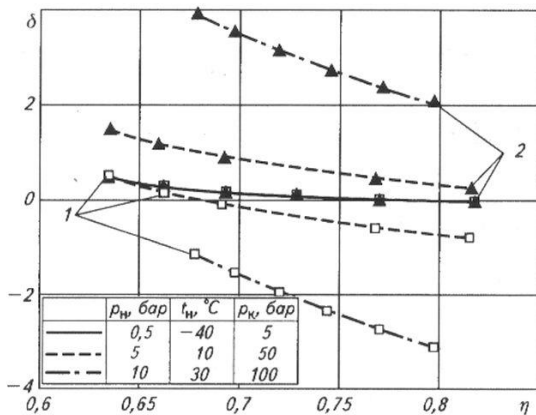


Рис. 8. Зависимость относительной погрешности от η (R50):
1 – метод условных температур; 2 – метод Шульца

расчетах методом Шульца погрешности меньше на $\sim 0,5$ % во всем диапазоне и также возрастают от 0,5 до 1,26 %. На режиме $p_H = 5$ бар, $p_K = 50$ бар погрешности определения политропного КПД при расчетах методом условных температур составляют 1,05...1,67 %. При расчете методом Шульца погрешности меньше (0,35...0,98 %). На режиме $p_H = 10$ бар, $p_K = 100$ бар погрешности определения политропного КПД при расчетах методом условных температур составляют 0,73...1,28 %, увеличиваясь с ростом перепада температур и падением $\eta_{пол}$. При расчетах методом Шульца погрешности меньше, возрастают в пределах 0,22...0,77 % и также увеличиваются с падением $\eta_{пол}$.

Для метана (R50) на режиме низких давлений ($p_H = 0,7$ бар, $p_K = 7$ бар) погрешности определения политропного КПД (рис.8) обоими рассматриваемыми методами практически одинаковы. При расчетах методом условных температур они равномерно возрастают с повышением перепада температур и составляют 0,02...0,43 %. При расчетах методом Шульца погрешности также возрастают от 0 до 0,41 %. На режиме $p_H = 7$ бар, $p_K = 70$ бар погрешности определения политропного КПД возросли, но незначительно. При расчетах методом условных температур они составляют $-0,74...+0,46$ %. Смена знака погрешности означает ее переход через ноль, когда погрешность вовсе отсутствует. При расчете методом Шульца погрешности положительны и составляют 0,31...1,49 %. На режиме $p_H = 70$ бар, $p_K = 700$ бар погрешности определения политропного КПД при расчетах методом условных температур составляют $-3,14...-1,13$ %, уменьшаясь по модулю с ростом перепада температур и падением $\eta_{пол}$. При расчетах методом Шульца погрешности возрастают в пределах 2,05...3,96 %, увеличиваясь с падением $\eta_{пол}$.

Обобщая результаты сопоставления погрешностей в определении КПД процессов сжатия, прохо-

дящих в разных областях диаграмм состояния, можно сделать следующие выводы.

1. Практически для всех изученных процессов политропный КПД, вычисленный приближенными методами Шульца и условных температур, отличается от точного значения, найденного методом обобщенной политропы, в большей или меньшей мере.

2. По мере увеличения давлений погрешности возрастают, но для разных веществ в разной мере. При очень высоких сверхкритических давлениях в конце процесса сжатия (200...400 бар) у пропана R290, этилена R1150 и R22 погрешности для метода Шульца при высоких КПД составляют 1,24...2,05 %, а при низких КПД равны 2,76...7,47 %. При этом метод Шульца в ряде случаев дает более точные результаты, чем метод условных температур.

3. Выполненный анализ дает основание рекомендовать во всех случаях определять политропный КПД компрессоров по методу обобщенной политропы, обеспечивающему получение строгих и стабильных результатов при всех начальных и конечных условиях вне зависимости от области диаграммы состояния, в которой проходят рассчитываемые процессы.

4. Применение приближенных методов следует ограничить: метода условных температур – низкими давлениями, а метода Шульца – низкими и средними давлениями, и в обоих случаях по возможности невысокими отношениями давлений. Правомерность использования любого из этих методов всегда необходимо проверять выполнением контрольных расчетов методом обобщенной политропы.

5. Применяемые в настоящее время стандартные методики расчета и оценки эффективности центробежных компрессоров основаны на методе Шульца. Они, как было показано, не позволяют в общем случае получить сведения об эффективности машин с требуемой точностью и нуждаются в изменении на основе метода обобщенной политропы.

Список литературы

1. Епифанова В.И. Низкотемпературные радиальные турбодетандеры. – М.: Машиностроение, 1974.
2. Холодильные машины / А.В. Бараненко, Н.Н. Бухарин, В.И. Пекарев, Л.С. Тимофеевский; под ред. Л.С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 2006.
3. Чистяков Ф.М. Холодильные турбоагрегаты. – М.: Машиностроение, 1967.
4. Шульц Дж. Политропический анализ центробежного компрессора // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Энергетическое машиностроение, 1962, № 1.