

УДК 621.5.012.2

В.П. СОТНИКОВ

Енакиево, Украина

## МУЛЬТИПРОЦЕССНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ГАЗА

Представлена термодинамическая модель мультипроцесса сжатия газа с отводом теплоты, включающей теплоту трения. Разработана на основе теоретического анализа дифференциальной винтовой машины с обособленными тепловыми секциями. Изотерма сжатия аппроксимируется шлейфом расходящихся-сходящихся политроп, сгруппированных в триады ломаных линий. Разные части общего количества газа сжимаются в разных процессах. Приведена типовая конфигурация температурно-энтальпийной диаграммы мультипроцесса с учетом трения. Модель может быть использована для тепловых расчетов изотермических дифференциальных винтовых компрессоров с обособленными тепловыми секциями.

**Ключевые слова:** мультиизотерма, дифференциальная винтовая машина, изотермический компрессор, работа сжатия с трением.

### Введение

Карнотизация термодинамических циклов тепловых двигателей – признанный путь к повышению энергетической эффективности двигателей [1]. Минимизацию средней температуры отвода теплоты и максимизацию средней температуры подвода теплоты в цикле, которые составляют суть карнотизации, можно рассматривать как некоторое приближение к предельным изотермическим процессам сжатия и расширения рабочего тела.

Ступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением, широко используемое в компрессорах и силовых установках сложных схем [2], является аппроксимацией изотермического сжатия. Термодинамическая модель такого сжатия – ломаная линия, составленная из политроп сжатия и изобар отвода теплоты, которая на термодинамических диаграммах заменяет изотерму. При сжатии разные макроскопические части газа номинально совершают один и тот же термодинамический процесс.

В статье предлагается другая форма аппроксимации – многопроцессная. Феномен множественности процессов в тепловых машинах был выявлен нами при анализе собственных изобретений, упомянут в работе [3], а достаточно четкое его определение дано при сопоставлении с идентифицированным нами же свойством унитарности процессов в [4].

Рассмотренная в [3] и [4] новая элементная база тепловых машин – дифференциальная винтовая машина с обособленными тепловыми секциями – имеет триадную структуру. На рис. 1 показана принципиальная схема разновидности этой машины –

дифференциального винтового компрессора с обособленными тепловыми секциями (далее – ДВК с ОТС).

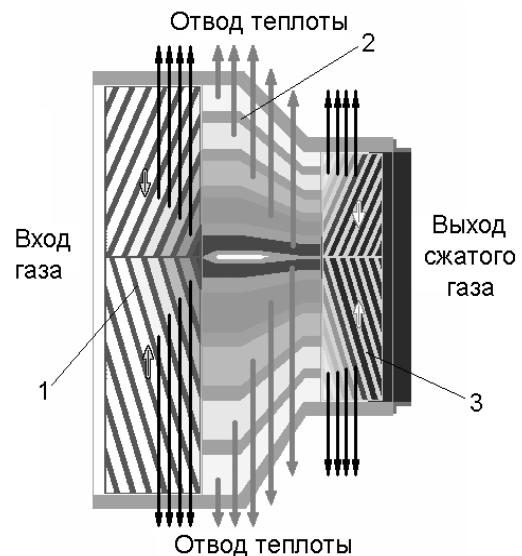


Рис. 1. Схема дифференциального винтового компрессора с обособленными тепловыми секциями

На схеме в виде разверток цилиндрических сечений машины на плоскость изображены три основных структурных элемента машины: первая элвизм (элементарная винтовая машина насосного типа) 1, блок обособленных тепловых секций 2 и вторая элвизм 3. Сжатие газа происходит благодаря тому, что у первой элвизм больший объемный расход, чем у второй элвизм. Многопроцессность или, что то же самое, мультипроцессность обусловлена наличием блока неподвижных ОТС.

Главная цель данной статьи – формирование термодинамической модели для тепловых расчетов многопроцессных машин. Но не менее важно, что рассмотрение нового класса тепловых машин с точки зрения технической термодинамики будет выразительной иллюстрацией непривычных для восприятия образов множественных процессов в машинах, да и самих этих машин.

### 1. Термодинамическая модель мультипроцессной аппроксимации изотермического сжатия газа

Разработка термодинамической модели процессов, происходящих в многокамерной дифференциальной машине при одновременном механи-

ческом и тепловом воздействии на обособленные части прерывно-непрерывного потока газа, привела к форме температурно-энтروпийной диаграммы (далее T – s-диаграмма), представленной на рис. 2.

Линии процессов на диаграмме – унитарные политропы. Они удовлетворяют известным соотношениям для политропных процессов в идеальном газе в приближении [5], основанном на постоянстве теплоемкостей в процессах при однозначной зависимости теплоемкости от показателя политропы  $n_{\psi-\omega}$ . Указанные нижние индексы обозначают:

- $\psi$  – параметр в начальной точке политропы;
- $\omega$  – параметр в конечной точке политропы.

На диаграмме нанесены нижеперечисленные политропы процессов.

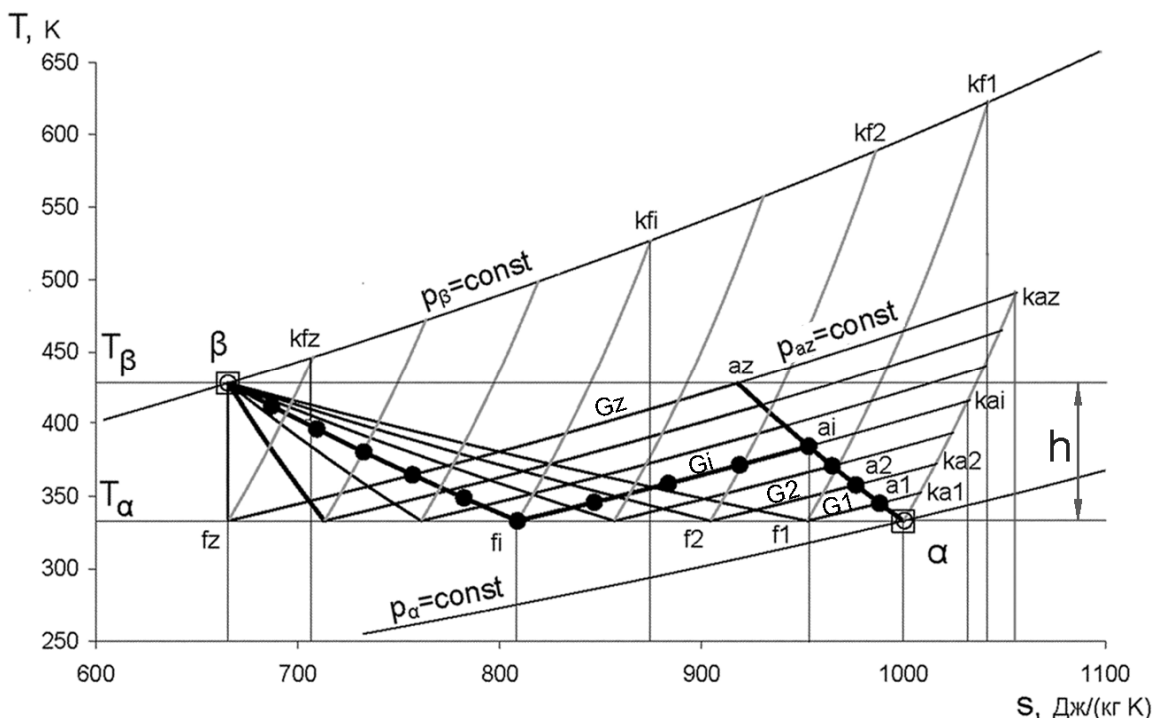


Рис. 2. T – s-диаграмма мультиизотермы сжатия газа с отводом теплоты, включая теплоту трения

Эквидистантные изобары:  $p_\alpha = \text{const}$  – изобара начального давления в мультипроцессе, группа изобар  $a_i - f_i$  средних давлений в ОТС  $p_{a_i} = \text{const}$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots, z$  – порядковый номер ОТС.

Неэквидистантная изобара  $p_\beta = \text{const}$  – изобара конечного давления в мультипроцессе.

Политропы сжатия идеального газа с отводом теплоты: линии  $\alpha - a_i$  отображают основные процессы в первой элвиэм, линии  $f_i - \beta$  – основные процессы во второй элвиэм.

Политропы адиабатических процессов сжатия с трением, дополнительных к процессам  $\alpha - a_i$  в нагнетающих впадинах первой элвиэм, представлены

линиями  $\alpha - ka_i$ . Политропы, дополнительные к процессам  $f_i - \beta$  во второй элвиэм, представлены линиями  $f_i - kf_i$ .

На диаграмме нанесены также основные температурные уровни – горизонталы  $T_\alpha$  и  $T_\beta$ .

Точка  $\alpha$  характеризует термодинамическое состояние газа в начале мультипроцесса сжатия, точка  $\beta$  – в конце мультипроцесса сжатия. Точки  $a_i$  отображают состояние газа на входе в i-ю ОТС, точки  $f_i$  – на выходе из i-й ОТС.

Конкретная по составу и количеству макрочастиц газа i-ая часть  $G_i$  общего количества газа  $G$ , совершающего мультипроцесс, сначала сжимается с

отводом теплоты в нагнетающей впадине первой элвиэм в процессе вдоль политропы сжатия  $\alpha - a_i$ , затем вытесняется из нее в  $i$ -ую ОТС, где, двигаясь вдоль последней, охлаждается в процессе вдоль политропы  $a_i - f_i$  при постоянном давлении  $p_{a_i} = p_{f_i}$  (изобара  $a_i - f_i$ ), после чего втекает во всасывающую впадину второй элвиэм, где сжимается с отводом теплоты в процессе вдоль политропы сжатия  $f_i - \beta$ .

Политропы  $\alpha - a_i$ ,  $a_i - f_i$  и  $f_i - \beta$  образуют *триаду политроп*  $\alpha - a_i - f_i - \beta$  – ломаную линию, отмеченную на диаграмме маркерами. Состояние газа в других частях общего количества газа  $G$  изменяется вдоль других конкретных триад политроп.

Таким образом, триада политроп отображает изменение состояния конкретной части газа  $G_i$  при движении ее по определенному пути в машине, включающему конкретную ОТС с номером  $i$ . Поэтому количество триад политроп равно количеству ОТС, а общее количество газа, проходящего через ДВК с ОТС, равно сумме количеств газа, проходящего через каждую из  $z$  ОТС:

$$G = \sum_{i=1}^z G_i .$$

Унитарные политропы на термодинамической диаграмме отображают изменение термодинамического состояния 1 кг газа. Но главная особенность мультипроцессной аппроксимации состоит в том, что в разных частях  $G_i$  общего количества газа  $G$  состояние газа изменяется в разных триадах процессов, а значит вдоль разных триад политроп. Поэтому на изобарах  $a_i - f_i$  триад политроп обозначено количество газа  $G_i$ , состояние которого изменяется в соответствии с данной конкретной триадой.

С целью приближения мультипроцесса к унитарному изотермическому процессу введем еще ряд особенностей конфигурации диаграммы:

1. Точки  $f_i$  расположены на температурном уровне  $T_\alpha$ , то есть  $T_{f_i} = idem = T_\alpha$ .

2. Точки  $\beta$  и  $az$  расположены на одном и том же температурном уровне, то есть  $T_{az} = T_\beta$ .

3. Замыкающая политропа  $fz - \beta$  является изэнтропой, то есть  $p_{fz-\beta} = k$ , где  $k$  – показатель изэнтропы как частной формы политропы.

Совокупность триад политроп  $\alpha - a_i - f_i - \beta$ , или в обобщенной форме обозначения  $(\alpha - \beta)_i$ , образует составную линию – мультиполитропу – в виде шлейфа расходящихся-сходящихся ломаных

линий в интервале температур  $T_\alpha \leq T \leq T_\beta$ , причем

$$h = T_\beta - T_\alpha ,$$

где  $h$  – ширина шлейфа в единицах измерения температуры.

В данном конкретном случае мультиполитропа  $\alpha - \beta$  есть шлейф множества разных триад ломаных линий, который заменяет (аппроксимирует) гладкую изотерму  $T_\alpha = const$  с точностью до ширины шлейфа  $h$  сверху, что и составляет содержание предлагаемого термина *мультиизотерма сжатия*.

Общее количество газа  $G$  можно трактовать как секундный расход газа через машину, тогда совокупность значений величин  $G_i$  представляет собой некоторое распределение общего расхода газа по совокупности ОТС. В общем случае распределение общего секундного расхода по разным ОТС может изменяться в некоторых пределах. В частности же, мы в качестве базового принимаем распределение общего секундного расхода газа в разных ОТС по закону: секундный расход через каждую ОТС прямо пропорционален плотности газа на выходе из ОТС.

### Работа, теплота, изотермический КПД

Последствия неизбежного выделения теплоты вследствие действия сил трения при сжатии реального газа учитывают, используя дополнительный адиабатический процесс сжатия газа с трением – так называемый «исходный процесс» [6]. На основании [6] без учета скоростей газа можно получить обобщающее выражение для вычисления работы сжатия с отводом теплоты, включающей потери на трение, в унитарном политропном процессе  $\psi - \omega$ :

$$I_{\psi-\omega} = c_p (T_\omega - T_\psi) - c_{\psi-\omega} (T_\omega - T_\psi) + c_{\psi-k} (T_k - T_\psi), \quad (1)$$

где  $I_{\psi-\omega}$  – удельная работа сжатия с отводом теплоты, включая теплоту трения, Дж/кг;

$c_p$  – теплоемкость в изобарическом процессе, Дж/(кг К);

$c_{\psi-\omega}$  – теплоемкость в основном политропном процессе  $\psi - \omega$ ;

$c_{\psi-k}$  – теплоемкость в дополнительном адиабатическом процессе сжатия газа с трением  $\psi - k$  (далее – дополнительный процесс).

Первый член трехчлена (1) представляет собой разность энтальпий идеального газа в крайних точках унитарного политропного процесса  $\psi - \omega$ , второй – отведенную теплоту при совершении унитар-

ного процесса сжатия идеального газа с отводом теплоты, третий – отведенную теплоту потерь трения газа в дополнительном процессе.

Применение (1) в мультипроцессах является корректным, если начальные точки  $\psi$  основной и дополнительной к ней политропы совпадают, а конечная точка  $k$  дополнительной политропы  $\psi-k$  расположена на изобаре  $p_{\omega} = \text{const}$ , проходящей через конечную точку основной политропы  $\psi-\omega$  (условие сопряжения основной и дополнительной политроп).

Полагаем, что в дополнительных процессах

$$c_{\psi-k} = \text{idem} = c_r,$$

где  $c_r$  – теплоемкость дополнительного процесса с показателем политропы  $n_r$ , который, например, для воздуха равен 1,45 ... 1,55 [6].

Для вычисления интегральных величин работы и теплоты в триаде процессов необходимо просуммировать их по каждому процессу триады.

В изобарическом процессе  $ai-fi$  триады  $(\alpha-\beta)i$  работа (1) равна нулю, так как  $c_{\psi-\omega} = c_{ai-fi} = c_p$  и  $T_k = T_{\psi}$ . Равенство температур обусловлено тем, что начальное и конечное давления дополнительного процесса совпадают, поэтому политропа дополнительного процесса на диаграмме вырождается в точку.

Применив выражение (1) к оставшимся политропам сжатия  $\alpha-ai$  и  $fi-\beta$ , получим:

$$l_{(\alpha-\beta)i} = [c_p(T_{ai} - T_{\alpha}) + c_p(T_{\beta} - T_{\alpha})] - [c_{\alpha-ai}(T_{ai} - T_{\alpha}) + c_{fi-\beta}(T_{\beta} - T_{\alpha})] + [c_r(T_{kai} - T_{\alpha}) + c_r(T_{kfi} - T_{\alpha})], \quad (2)$$

где  $l_{(\alpha-\beta)i}$  – удельная работа сжатия в  $i$ -й триаде процессов, Дж/кг;

точки с трехсимвольными обозначениями  $kai$  и  $kfi$  есть точки пересечения изобар, проходящих через конечные точки основных процессов  $\alpha-ai$  и  $fi-\beta$ , с политропами дополнительных процессов  $\alpha-kai$  и  $fi-kfi$  соответственно, причем  $p_{kfi} = \text{idem} = p_{\beta}$ .

Чтобы получить выражение количества теплоты, отведенной в триаде унитарных процессов, необходимо к учтенным при определении работы триады количествам отведенной теплоты прибавить теплоту, отведенную из  $i$ -й ОТС в изобарическом процессе  $ai-fi$ :

$$q_{ai-fi} = c_p(T_{ai} - T_{fi}) = c_p(T_{ai} - T_{\alpha}),$$

где  $q_{ai-fi}$  – количество теплоты, отведенной в изобарическом процессе  $ai-fi$ , Дж/кг.

После сложения получим:

$$q_{(\alpha-\beta)i} = c_p(T_{ai} - T_{\alpha}) - [c_{\alpha-ai}(T_{ai} - T_{\alpha}) + c_{fi-\beta}(T_{\beta} - T_{\alpha})] + [c_r(T_{kai} - T_{\alpha}) + c_r(T_{kfi} - T_{\alpha})], \quad (3)$$

где  $q_{(\alpha-\beta)i}$  – количество теплоты, отведенной в триаде процессов  $(\alpha-\beta)i$ , Дж/кг.

Для получения выражений полных удельной работы и отведенной теплоты в мультиизотермическом процессе необходимо просуммировать произведения работы или теплоты для  $i$ -й триады на секундный расход газа, соответствующий этой триаде, по всем триадам и отнести к общему расходу:

$$l_{\alpha-\beta} = \frac{\sum_{i=1}^z G_i l_{(\alpha-\beta)i}}{G},$$

$$q_{\alpha-\beta} = \frac{\sum_{i=1}^z G_i q_{(\alpha-\beta)i}}{G},$$

где  $l_{\alpha-\beta}$  – работа сжатия в мультипроцессе  $\alpha-\beta$ , Дж/кг;

$q_{\alpha-\beta}$  – теплота, отведенная в мультипроцессе  $\alpha-\beta$ , Дж/кг.

Выражения для температур с индексом суммирования « $i$ » выводятся на основе конфигурации диаграммы на рис. 2 по известным соотношениям [5].

Наконец, изотермический КПД мультиизотермического процесса  $\alpha-\beta$ :

$$\eta_t = \frac{RT_{\alpha} \ln \frac{p_{\beta}}{p_{\alpha}}}{l_{\alpha-\beta}},$$

где  $\eta_t$  – изотермический КПД;

в числителе – удельная работа в изотермическом процессе идеального газа [7];

$R$  – удельная газовая постоянная, Дж/(кг К).

## 2. Пример использования термодинамической модели

Приведем результаты расчетов по представленной термодинамической модели. Исходные данные:

- константы газа равны константам воздуха;
- внешние условия  $p_{\alpha}=0,1$  МПа,  $T_{\alpha}=333$  К;
- степень повышения давления  $\pi = \frac{p_{\beta}}{p_{\alpha}} = 8,0$ ;

- распределение расхода по ОТС – базовое;
- количество ОТС  $z = 7$ .

На рис. 3 представлены  $T-s$ -диаграммы мультипроцессов сжатия с отводом теплоты, включая

теплоту трения, и ряд исходных и расчетных параметров мультипроцесса:

$h$  – ширина шлейфа мультиизотермы;

$n_r$  – показатель дополнительной политропы адиабатического сжатия газа с трением;

$l_{\alpha-\beta}$  – удельная работа сжатия;

$o_{ts}$  – относительная тепловая нагрузка ОТС (доля теплоты, отведенной от блока ОТС, в процентах от общего количества отведенной теплоты);

$\eta_t$  – изотермический КПД.

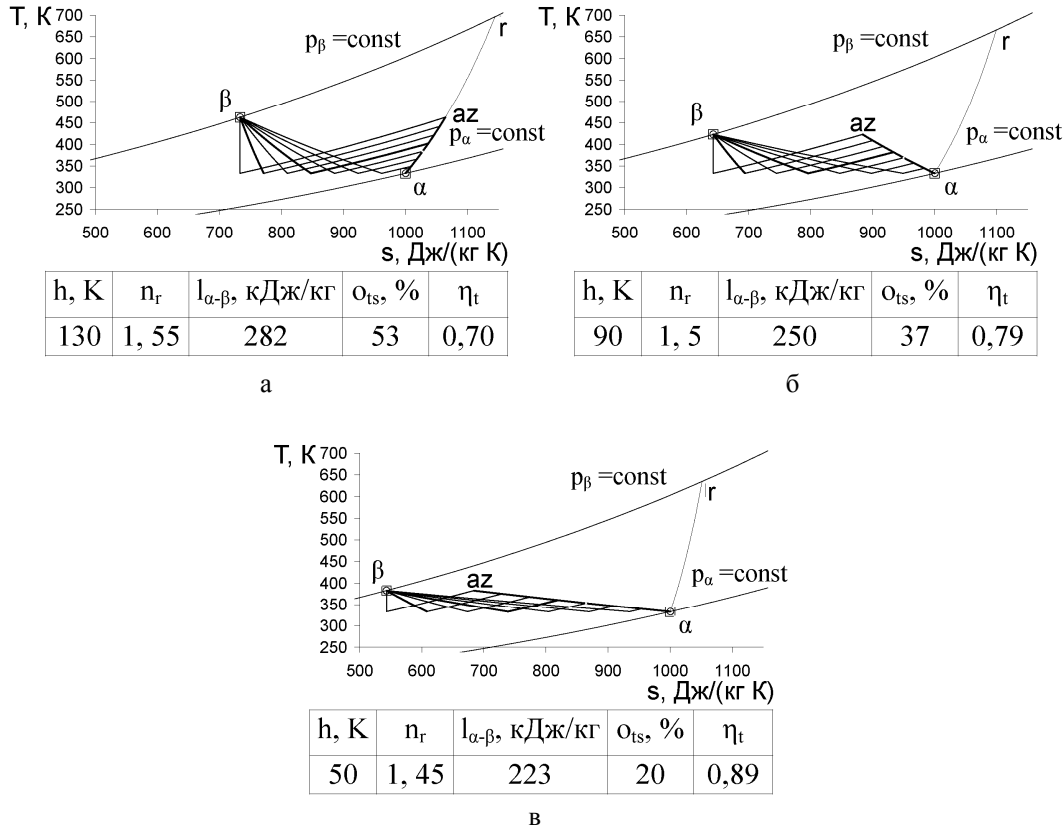


Рис. 3. Изменение  $T-s$ -диаграммы и расчетных параметров мультиизотермического процесса сжатия при уменьшении ширины шлейфа мультиизотермы и показателя адиабаты с трением:  
 а – мультипроцесс без охлаждения первой элвиэм;  
 б – с низкоинтенсивным охлаждением первой элвиэм;  
 в – с высокоинтенсивным охлаждением первой элвиэм

Линия  $\alpha-\gamma$  отображает политропу адиабатического сжатия с трением, показатель политропы равен  $n_r$ . Варьировались два исходных параметра – ширина шлейфа мультиизотермы  $h$  и показатель политропы  $n_r$ .

Диаграмма «а» отображает предельный случай сжатия без отвода теплоты из первой элвиэм, то есть без охлаждения первой элвиэм. В этом случае

$$n_{\alpha-ai} = n_{\alpha-kai} = n_r.$$

Диаграммы «б» и «в» иллюстрируют сжатие с низкоинтенсивным

$$|c_{\alpha-az}| \leq c_p$$

и высокоинтенсивным

$$|c_{\alpha-az}| > c_p$$

охлаждением первой элвиэм соответственно.

### Выводы

1. Учет трения в модели путем использования известных из практики показателей политроп адиабатического сжатия с трением дает основания для оптимистических оценок степени приближения результатов расчетов к параметрам реальных процессов в ДВК с ОТС.

2. Мультипроцессная аппроксимация изотермического сжатия газа в ДВК с ОТС является достаточно эффективной даже при отсутствии охлаждения или при низкоинтенсивном охлаждении газа в первой элвиэм.

3. Наибольшее приближение к изотермическому процессу дает минимизация ширины шлейфа мультиизотермы при высокоинтенсивном охлаждении в обеих элвиэм.

## Литература

1. Андриющенко, А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.И. Андриющенко. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1977. – 280 с.

2. Манушин, Э.А. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок [Текст] / Э.А. Манушин., В.Е. Михальцев, А.П. Чернобровкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 447 с.

3. Сотников, В.П. О движущей силе заветов и о последователях, способных развивать эту силу [Текст] / В.П. Сотников. – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – 160 с.

4. Сотников, В.П. Понятие «Субсовершенный двигатель» как характеристика вероятных реальных тепловых двигателей [Текст] / В.П. Сотников

// Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей: Межвузовский научный сборник № 22: ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа, 2008. – С. 6 – 22.

5. Болгарский, А.В. Термодинамика и теплотехника [Текст]: учеб. для вузов / А.В. Болгарский, Г.А. Мухачев, В.К. Щукин. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с.

6. Холщевников, К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст]: учеб. для студентов вузов по специальности «Авиационные двигатели» / К.В. Холщевников, О.И. Емин, В.Т. Митрохин. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.

7. Михайлов, А.К. Компрессорные машины [Текст]: учеб. для вузов / А.К. Михайлов, В.П. Ворошилов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.

Поступила в редакцию 21.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Автомобильный транспорт» Н.И. Мищенко, Автомобильно-дорожный институт ГВУЗ «ДНТУ», Горловка.

## МУЛЬТИПРОЦЕСНА АПРОКСИМАЦІЯ ІЗОТЕРМІЧНОГО СТИСКАННЯ ГАЗУ

*В.П. Сотников*

Представлена термодинамічна модель мультипроцесу стискання газу з відведенням теплоти, що містить у собі теплоту тертя. Розроблена на основі теоретичного аналізу диференціальної гвинтової машини з відокремленими тепловими секціями. Ізотерма стискання апроксимується шлейфом політроп, що розходяться-сходяться, які об'єднані у тріади ламаних ліній. Різні частини загальної кількості газу стискаються у різних процесах. Наведена типова конфігурація температурно-ентропійної діаграми мультипроцесу з урахуванням тертя. Модель може бути використана у теплових розрахунках ізотермічних диференціальних гвинтових компресорів з відокремленими тепловими секціями.

**Ключові слова:** мультиізотерма, диференціальна гвинтова машина, ізотермічний компресор, робота стискання з тертям.

## MULTIPROCESSOR APPROXIMATION OF GAS ISOTHERMIC COMPRESSION

*V.P. Sotnikov*

The paper presents the thermodynamic model of gas multiprocessor compression with heat removal including friction heat. The model is developed based on the theoretical study of a differential screw-rotor machine with separate thermal sections. Compression isotherm is approximated by the series of divergent and converge polytropic curves grouped into triads of polygonal paths. Different parts of total gas amount are compressed in different processes. Typical configuration is given for the temperature-entropy diagram of the multi-process taking friction into account. The model may be used for thermal calculations of isothermal differential rotary screw compressors with separated thermal sections.

**Key words:** multi-isotherm, differential screw-rotor machine, isothermal compressor, compression work with friction.

**Сотников Виктор Петрович** – инженер, г. Енакиєво, Україна, e-mail: viktor@sotnikov.name.