

УДК 621.521

Е. А. Горячева, К. Е. Демихов,
Н. К. Никулин**РАСЧЕТ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ОТКАЧКЕ ГАЗА ОДНИМ ИЛИ
НЕСКОЛЬКИМИ ВАКУУМНЫМИ НАСОСАМИ**

Рассмотрены методики расчета вакуумных систем, применяемые при откачке газа из одного объема в другой несколькими насосами, а также при параллельной откачке газа двух объектов с различными параметрами при помощи одного насоса с несколькими входами. Рассмотрены расчетные схемы. Представлены алгоритмы расчета и результаты в виде графических зависимостей.

В настоящее время во многих областях промышленности, таких как химическая, фармацевтическая, электронная, атомная, авиационная, пищевая широко применяются установки, обеспечивающие безмасляную откачку газа в широком диапазоне давлений: от атмосферного (10^5 Па) до высокого вакуума. При проведении различных технологических процессов необходимо вакуумировать один объект, используя разные типы вакуумных насосов (ВН), имеющих различные характеристики, а также вакуумировать несколько объектов, объединенных в одну вакуумную систему. Причем условия в этих объектах отличаются друг от друга. В связи с чем для вакуумирования различных объектов одним насосом необходима такая конструкция насоса, которая имеет два и более входных патрубков, причем, каждый из входов должен соответствовать требуемым параметрам.

При рассмотрении процесса откачки газа из одного или нескольких объектов параметрами, определяющими условия проведения технологического процесса, являются величина потока газа $Q \left[\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}} \right]$, который необходимо откачать; состав газа; рабочее давление p [Па] в откачиваемом объеме (входные параметры). В общем случае к этим параметрам можно добавить условия требуемых весовых, энергетических и геометрических характеристик вакуумных систем и дополнительные специфические условия, определяемые конкретным технологическим процессом.

Расчетная схема модели, соответствующая откачке газа из одного объема V_1 с давлением p_1 в другой объем V_2 с давлением p_2 (вместо другого объема может быть система предварительной форвакуумной

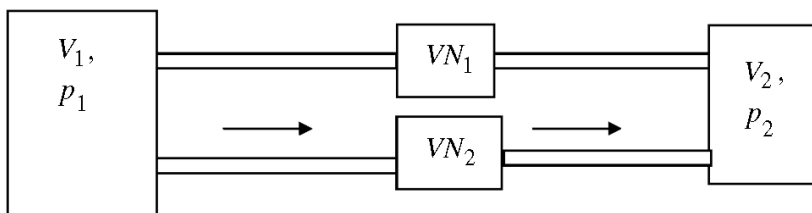


Рис. 1. Схема параллельной откачки вакуумного объема

откачки) несколькими насосами, приведена на рис. 1. Выходными параметрами для расчета являются откачные характеристики насосов $S_1(p_1)$, $S_2(p_2)$ и их суммарная откачная характеристика $S_c(p_1)$, обеспечивающая получение заданных входных параметров Q и p для данного состава откачиваемого газа. Откачные характеристики насосов представляют собой зависимость быстроты действия насоса S [$\text{м}^3/\text{с}$] от давления всасывания p_1 системы.

Данная схема откачки реализуется высоковакуумной откачной установкой на базе турбомолекулярного, комбинированного турбомолекулярного и молекулярно-вязкостного вакуумных насосов.

Для такой расчетной схемы входными параметрами являются откачные характеристики рабочих элементов насоса $S_{\text{max}i}$ и $\tau_{\text{max}i}$, откачиваемые потоки газов Q_i через каждый вход, геометрические параметры насосов и соединительных магистралей, давление p_2 в объеме V_2 . Расчетными (выходными параметрами) являются суммарная быстрота откачки системы $S_{\text{max.c}}$ и максимальное отношение давлений, создаваемое системой насосов $\tau_{\text{max.c}}$, или предельное остаточное давление в камере $p_{\text{min}1}$.

При откачке газа из одного объема в другой параллельно двумя насосами (VN_1 и VN_2) с разными откачными характеристиками ($S_{\text{max}1} \neq S_{\text{max}2}$ и $\tau_{\text{max}1} \neq \tau_{\text{max}2}$) основные откачные параметры $S_{\text{max.c}}$ и $\tau_{\text{max.c}}$ вакуумной системы определяются характеристиками этих насосов.

Суммарный поток Q разбивается на два потока Q_1 и Q_2 , откачиваемые соответствующими насосами: $Q = Q_1 + Q_2$, причем $Q = S_c p_1 = (S_1 + S_2)p_1$, где S_c — быстрота откачки газа камеры двумя насосами при давлении всасывания p_1 ; S_1 , S_2 — быстрота откачки газа камеры насосом VN_1 , VN_2 при давлении всасывания p_1 .

Отношения давлений, обеспечиваемые каждым из насосов, равны между собой, т.е. $\tau_2 = \tau_1 = p_2/p_1$ (при проводимости соединительных трубопроводов $U \gg S_1, S_2$).

Соответственно быстрота действия каждого насоса будет

$$S_1 = S_{\text{max}1} \cdot (\tau_{\text{max}1} - \tau_1) / (\tau_{\text{max}1} - 1); \quad (1)$$

$$S_2 = S_{\text{max}2} \cdot (\tau_{\text{max}2} - \tau_1) / (\tau_{\text{max}2} - 1). \quad (2)$$

Уравнение откачной характеристики вакуумной системы, состоящей из двух параллельно работающих ВН, также представляет собой прямолинейную зависимость S_c от τ_c с основными параметрами:

$$S_{\max.c} = S_{\max 1} + S_{\max 2}, \quad (3)$$

и

$$\tau_{\max.c} = \frac{S_{\max 1} \tau_{\max 1} (\tau_{\max 2} - 1) + S_{\max 2} \tau_{\max 2} (\tau_{\max 1} - 1)}{S_{\max 1} (\tau_{\max 2} - 1) + S_{\max 2} (\tau_{\max 1} - 1)}, \quad (4)$$

где τ_{\max} вычисляется из условия равенства $S_1 = -S_2$, так как ВН с меньшим $\tau_{\max i}$, будет работать как сопротивление, пропуская газ в направлении, обратном направлению откачки.

При параллельной работе n насосов с различными откачными характеристиками, суммарная характеристика такой вакуумной системы будет определяться максимальной быстротой действия

$$S_{\max.c} = \sum_{i=1}^n S_{\max i} \quad (5)$$

и максимальным отношением давлений

$$\tau_{\max.c} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{S_{\max i}}{\tau_{\max i} - 1} \prod_{i=1}^n (\tau_{\max i} - 1)}{\sum_{i=1}^n \frac{S_{\max i}}{\tau_{\max i} - 1} \prod_{i=1}^n (\tau_{\max i} - 1)}, \quad (6)$$

где $\tau_{\max.c}$ вычисляется аналогично $\tau_{\max.c}$ из уравнения (4). Так, для системы из трех параллельно работающих насосов, полагая, что два насоса представляют собой один новый насос с откачными параметрами $S_{\max.c}$ и $\tau_{\max.c}$ (уравнения (3) и (4)), а второй — с откачными параметрами $S_{\max 3}$ и $\tau_{\max 3}$, максимальная быстрота действия трех насосов

$$S_{c3\max} = S_{\max 1} + S_{\max 2} + S_{\max 3} \quad (7)$$

и

$$\begin{aligned} \tau_{\max 3c} &= \\ &= \frac{S_{\max 1} \tau_{\max 1} (\tau_{\max 2} - 1) (\tau_{\max 3} - 1) + S_{\max 2} \tau_{\max 2} (\tau_{\max 1} - 1) (\tau_{\max 3} - 1)}{S_{\max 1} (\tau_{\max 2} - 1) (\tau_{\max 3} - 1) + S_{\max 2} (\tau_{\max 1} - 1) (\tau_{\max 3} - 1)} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{+ S_{\max 3} \tau_{\max 3} (\tau_{\max 1} - 1) (\tau_{\max 2} - 1)}{+ S_{\max 3} (\tau_{\max 1} - 1) (\tau_{\max 2} - 1)} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^3 S_{\max i} \tau_{\max i} / (\tau_{\max i} - 1) \prod_{i=1}^3 (\tau_{\max i} - 1)}{\sum_{i=1}^3 S_{\max i} / (\tau_{\max i} - 1) \prod_{i=1}^3 (\tau_{\max i} - 1)}. \quad (8) \end{aligned}$$

Расчетная схема модели, соответствующая параллельной откачке двух объектов с различными параметрами при помощи одного насоса, приведена на рис. 2.

В данной модели в качестве высоковакуумного насоса рассмотрен ТМН с несколькими входами, в данном случае число входов равно двум.

Расчет проточной части ТМН проводился на основе методик, разработанных на кафедре Э5 МГТУ им. Н.Э. Баумана [1, 2].

Алгоритм расчета следующий.

При расчете откачной характеристики вычисляются зависимости скорости действия насоса в первом и втором патрубках от давления и предельно-остаточное давление насоса при постоянном потоке во втором и первом патрубках соответственно $Q_1 = 0; 10^{-7}; 10^{-6}; 10^{-5}$ и $Q_2 = 0, 10^{-7}, 10^{-6}$.

Максимальное отношение давлений для всего насоса составляет $\tau_{\max n} = \tau_{\max}^n$; для первого пакета колес — $\tau_{\max 1} = \tau_{\max}^{n1}$; для второго пакета колес — $\tau_{\max 2} = \tau_{\max}^{n2}$ [М³Па/с].

Зададим значения потока через патрубок с переменным потоком: $Q_i = 0 \dots 7 \text{ м}^3 \text{ Па/с}$.

1. На первом патрубке насоса поток газа переменный, на втором — постоянный.

Отношение давлений для второго пакета колес насоса имеет вид

$$\tau_{2i} = \frac{\tau_{\max 2}}{1 + (Q_n + Q_{\Sigma i}) \frac{(\tau_{\max 2} - 1)}{p_{\Phi} S_{\max}}},$$

где $Q_{\Sigma i} = Q_i + Q_2$;

для первого пакета колес насоса

$$\tau_{1i} = \frac{\tau_{\max 1}}{1 + (Q_n + Q_i) \frac{(\tau_{\max 1} - 1)}{p_{\Phi 2i} S_{\max}}};$$

для всего насоса

$$\tau_i = \tau_{1i} \cdot \tau_{2i};$$

давление перед первым и вторым пакетами колес [Па]

$$p_{1i} = \frac{p_{\Phi}}{\tau_i} \quad \text{и} \quad p_{2i} = \frac{p_{\Phi}}{\tau_{2i}};$$

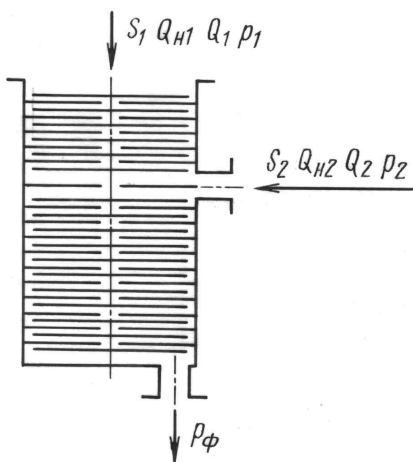


Рис. 2. Расчетная схема вакуумного насоса с двумя всасывающими патрубками

быстрота действия первого и второго пакетов [$\text{м}^3/\text{с}$]:

$$S_{1i} = \frac{Q_i}{p_{1i}} \quad \text{и} \quad S_{2i} = \frac{Q_i}{p_{2i}}.$$

2. На первом патрубке насоса поток газа постоянный, на втором — переменный.

Отношение давлений для второго пакета колес имеет вид

$$\tau_{2i} = \frac{\tau_{\max 2}}{1 + (Q_n + Q_{\Sigma i}) \frac{(\tau_{\max 2} - 1)}{p_{\Phi} S_{\max}}},$$

где $Q_{\Sigma i} = Q_i + Q_1$;

для первого пакета колес насоса

$$\tau_{1i} = \frac{\tau_{\max 1}}{1 + (Q_n + Q_1) \frac{(\tau_{\max 1} - 1)}{p_{\Phi 2i} S_{\max}}};$$

для всего насоса

$$\tau_i = \tau_{1i} \tau_{2i}.$$

Давление перед первым и вторым пакетами колес [Па]

$$p_{1i} = \frac{p_{\Phi}}{\tau_i} \quad \text{и} \quad p_{2i} = \frac{p_{\Phi}}{\tau_{2i}};$$

быстрота действия первого и второго пакетов [$\text{м}^3/\text{с}$]

$$S_{1i} = \frac{Q_i}{p_{1i}} \quad \text{и} \quad S_{2i} = \frac{Q_i}{p_{2i}}.$$

В качестве расчетной модели взят ТМН со следующими параметрами: максимальная быстрота действия рабочего колеса $S_{\max} = 0,7 \text{ м}^3/\text{с}$; форвакуумное давление $p_{\Phi} = 10 \text{ Па}$; максимальное отношение давления колеса $\tau_{\max} = 2,7$; общее число колес $n = 32$; число колес в первом и втором пакетах $n_1 = 11$ и $n_2 = 21$.

При расчете приняты следующие допущения:

— насос работает в молекулярном режиме течения газа при постоянной температуре;

— все рабочие колеса имеют одинаковые геометрические и откачные характеристики.

Откачная характеристика насоса представляет собой линейные зависимости $S = f(\tau)$ (рис. 3).

Расчет откачных характеристик проводили для нескольких значений потоков, при постоянном потоке натеканий (негерметичность и газовыделения) $Q_n = 10^{-7} \text{ м}^3 \text{ Па}/\text{с}$.

Результаты расчета для рассмотренных моделей приведены на рис. 4–7.

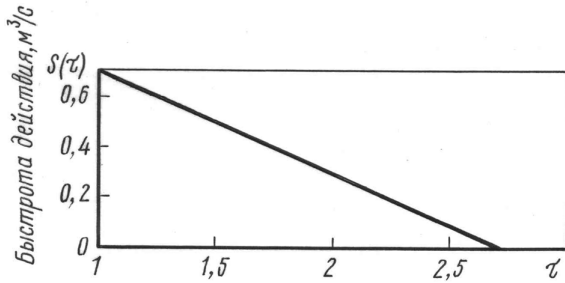


Рис. 3. Откачная характеристика рабочего колеса

Откачные характеристики насоса в первом входном патрубке в зависимости от давления всасывания для различных откачиваемых потоков и постоянных потоков, поступающих на второй патрубок, приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

На рисунках обозначено: S_{10i} и $S_{1a,b,vi}$ — быстрота действия насоса при переменном потоке через первый патрубок насоса и нулевом и постоянном значениях потока через второй патрубок; p_{10i} и $p_{1a,b,vi}$ — давление перед первым колесом при переменном потоке через первый патрубок насоса и нулевом и постоянном значениях потока через второй патрубок; $p_{2a,b,vi}$ — давление перед вторым пакетом колес при переменном потоке через первый патрубок насоса и постоянном значении потока через второй патрубок.

На рис. 6 приведена откачная характеристика насоса во втором входном патрубке в зависимости от давления всасывания для различных постоянных потоков, поступающих от первого патрубка; на рис. 7

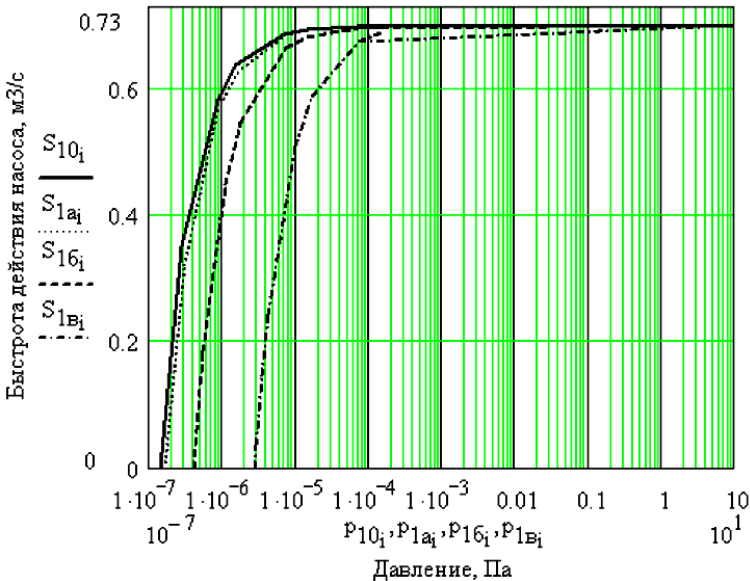


Рис. 4. Откачная характеристика насоса при постоянном значении потока Q_2 и переменном Q_1

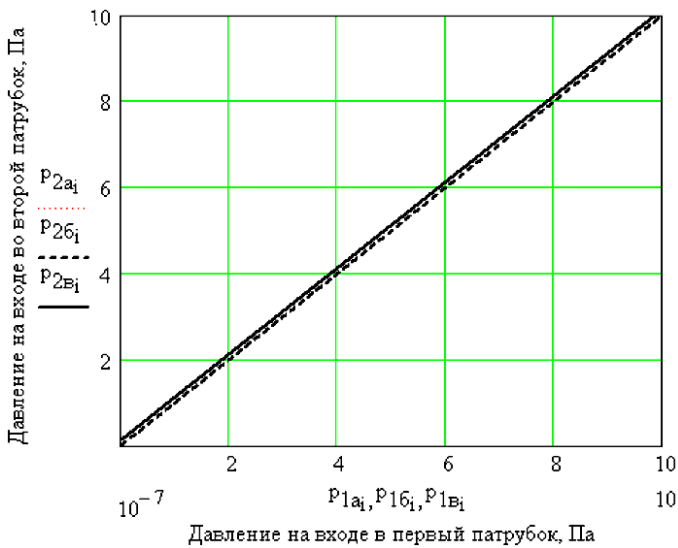


Рис. 5. Зависимость давления на входе во второй патрубок P_2 от давления на входе в первый патрубок насоса P_1

— зависимость давления всасывания во втором входном патрубке от давления всасывания в первом патрубке.

На рисунках обозначено: S_{20_i} и $S_{2_{a,б_i}}$ — быстрота действия второго пакета колес при переменном и постоянном потоках через второй и первый патрубки насоса и нулевом значении потока через первый патрубок и переменном значении потока через второй патрубок соответственно; p_{20_i} и $p_{2_{a,б_i}}$ — давление перед первым и вторым колесами

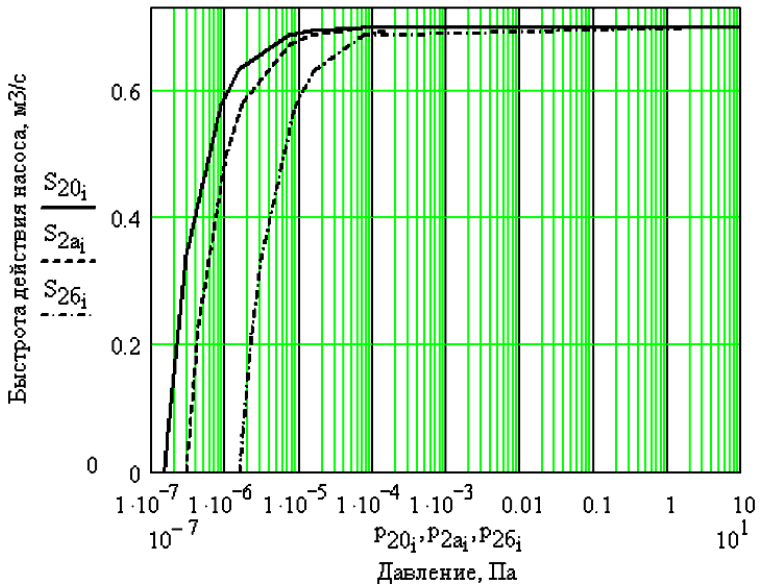


Рис. 6. Откачная характеристика насоса при постоянном значении потока Q_1 и переменном Q_2

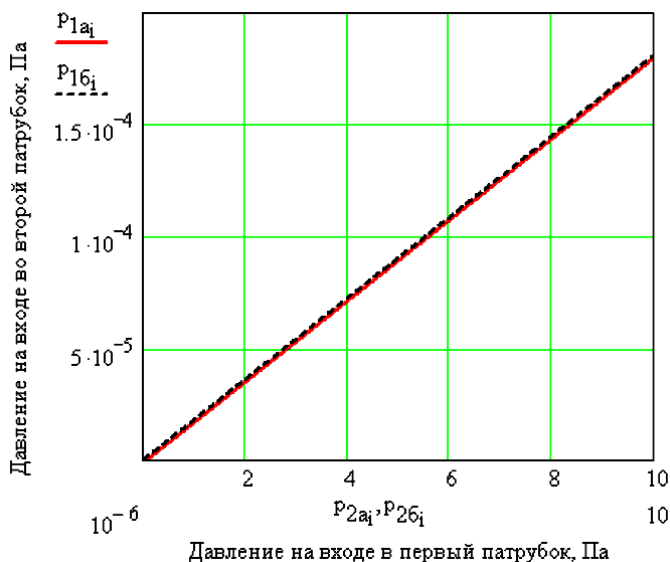


Рис. 7. Зависимость давления на входе в первый патрубок P_1 от давления на входе во второй патрубок насоса P_2

второго пакета при переменном и постоянном потоках через второй и первый патрубки насоса и нулевом значении потока через первый патрубок и переменном значении потока через второй патрубок соответственно; p_{1a,b_i} — давление перед первым колесом при переменном потоке через первый патрубок насоса и постоянном значении потока через второй патрубок.

Полученные зависимости при параллельной работе нескольких насосов с различными характеристиками при откачке газа одного объекта позволяют получить теоретическую откачную характеристику вакуумной системы как по одному газу, так и по смеси газов.

Таким образом, анализ полученных зависимостей показывает, что при согласованной работе обоих пакетов колес комбинированного турбомолекулярного насоса поток газа, создаваемый второй ступенью, значительно влияет на характеристику первой ступени, практически не изменяя параметров насоса перед вторым всасывающим патрубком. В то же время взаимное влияние ступеней приводит к изменению давления всасывания при входе в насос и параметров насоса перед второй ступенью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М е х а н и ч е с к и е вакуумные насосы / Е.С. Фролов и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 288 с.
2. В а к у у м н а я техника: Справочник / Е.С. Фролов и др. / Под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.

Статья поступила в редакцию 28.11.2006



Елена Александровна Горячева родилась в 1982 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Аспирант кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ye.A. Goryacheva (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2006. Post-graduate of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University.

Константин Евгеньевич Демихов — д-р. техн. наук, профессор, первый проректор по научной работе МГТУ им. Н.Э. Баумана, зав. кафедрой “Вакуумная и компрессорная техника” Автор более 150 научных трудов в области вакуумной и компрессорной техники.

K.Ye. Demikhov — D. Sc. (Eng.), professor, first pro-rector for scientific work, head of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of vacuum and compressor technology.

Николай Константинович Никулин — канд. техн. наук, доцент кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных трудов в области вакуумной и компрессорной техники.

N.K. Nikulin — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of vacuum and compressor technology.

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

УДК 621.514.5

И. В. Автономова

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ, СОПРЯЖЕННЫХ С ОКРУЖНЫМИ ПРОФИЛЯМИ ЗУБЬЕВ

Изложен метод расчета профилей зубьев, сопряженных с окружными профилями, для винтовых, прямозубых роторных компрессоров и воздуходувок типа Рут.

В винтовых компрессорах и прямозубых роторных компрессорах с внутренним сжатием передняя сторона зуба ведущего ротора, как правило, описывается окружностью, а в воздуходувках типа Рут окружностью описывается головка ротора. Методики построения профилей, сопряженных с окружными профилями [1, 2], не позволяют построить сопряженные профили. Чтобы выяснить причину этого, рассмотрим