

621.438
С914

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Доцент Сухов Е.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХПОТОЧНОГО НАПОРООБМЕННОГО
УСТРОЙСТВА

Специальность 190 - "Тепловые двигатели"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 1967 г.

4111

621.438+621.431.73-01

Челябинский политехнический институт направляет Вам для ознакомления автореферат диссертации доцента Сухова Е.И.

Ваш отзыв по автореферату прошу прислать в 2-х экземплярах, заверенных печатью, по адресу: г. Челябинск, 44, проспект им. Ленина, 76, Ученый Совет.

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте, экспериментальная часть - в Лондонском университете под руководством профессора Д.Б. Сполдинга.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Портнов Д.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Морозов И.И.
кандидат технических наук, доцент Кузнецов А.П.

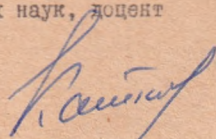
Ведущее предприятие - Челябинский ордена Кутузова Первой степени и ордена Красной Звезды тракторный завод.

Защита диссертации состоится 22 марта 1968 года на заседании Совета по присуждению ученых степеней механико-технологического и автотракторного факультетов Челябинского политехнического института.

Адрес: Челябинск, 44, проспект им. Ленина, 76.

Автореферат разослан 17 февраля 1968 года.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук, доцент



Н.П.КАТКОВ



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

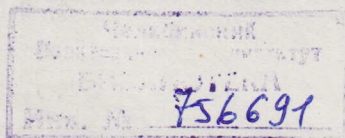
Доцент Сухов Е.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХПОТОЧНОГО НАПОРОБМЕННОГО
УСТРОЙСТВА

Специальность 190 - "Тепловые двигатели"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 1967 г.



Челябинский политехнический институт направляет Вам для ознакомления автореферат диссертации доцента Сухова Е.И.

Ваш отзыв по автореферату прошу прислать в 2-х экземплярах, заверенных печатью, по адресу: г.Челябинск, 44, проспект им. Ленина, 76, Ученый Совет.

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте, экспериментальная часть -- в Лондонском университете под руководством профессора Д.Б.Сполдинга.

Научный руководитель -- доктор технических наук, профессор Портнов Д.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Морозов И.И.
кандидат технических наук, доцент Кузнецов А.П.

Ведущее предприятие -- Челябинский ордена Кутузова Первой степени и ордена Красной Звезды тракторный завод.

Защита диссертации состоится 20 марта 1968 года на заседании Совета по присуждению ученых степеней механико-технологического и автотракторного факультетов Челябинского политехнического института.

Адрес: Челябинск, 44, проспект им. Ленина, 76.

Автореферат разослан 17 февраля 1968 года.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук, доцент

Н. П. КАТКОВ

В В Е Д Е Н И Е

В 1940 году был предложен новый тип газодинамического устройства — напоробменное устройство или обменник давления. Принцип действия этих устройств заключается в прямом обмене энергией между потоками газа за счет закономерного чередования волновых процессов в каналах вращающегося ротора, периодически сообщающихся с распределительными окнами, через которые подводится к устройству или отводятся потоки газа. Аналогичный процесс может происходить в неподвижном канале, который сообщается с потоками газа через распределительный клапанный механизм.

Преимущество напоробменных устройств перед турбокомпрессорными устройствами состоит в относительной простоте, значительно меньшем числе оборотов, возможности повышения рабочей температуры газа за счет естественного охлаждения каналов ротора низкотемпературными потоками.

В настоящее время известен ряд вариантов напоробменных устройств, которые могут найти самое различное применение в области наддува дизелей, в газотурбинных двигателях, в холодильных установках и других областях техники, составляя малоисследованный класс новых газодинамических устройств. Хотя известно о работах ряда фирм в области напоробменных устройств за рубежом (Пауэр Джето, Растон и Хорноби, Броун Бовери, Серкуит Брейкер), однако, опубликованные работы ограничиваются очень скудными данными в области теории и экспериментальных характеристик напоробменных устройств. Оригинальных отечественных работ в области напоробменных устройств пока не публиковалось. В связи с изложенным очевидно, что в настоящее время любое исследование по какому-либо варианту напоробменных устройств должно рассматриваться не только как ограниченное исследование, но и как способствующее изу-

чению и развитию всего класса напоробменных устройств.

Настоящая работа посвящена исследованию одного из вариантов трехпоточного напоробменного устройства, разработанного фирмой Пауэр Джетс. Схематическое изображение этого устройства приведено на рис.1. Трехпоточное напоробменное устройство может выполнять функции делителя, в этом случае активный поток делится на поток с повышенным давлением (постоянный поток) и с пониженным давлением (переменный поток), или функции смесителя, в этом случае активный поток присоединяет переменный поток с меньшим давлением.

Диссертация состоит из четырех глав и приложения.

В первой главе дается обзор существующих работ по напоробменным устройствам и формулируются задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованию теоретического процесса трехпоточного напоробменного устройства.

В третьей главе приводится описание экспериментальной установки и особенностей методики экспериментального исследования трехпоточного напоробменного устройства.

Четвертая глава содержит результаты экспериментального исследования. В приложении даются подробные таблицы вспомогательных функций, вычисленные на ЭЦВМ, которые могут быть полезными при теоретических расчетах и обработке экспериментальных данных.

Экспериментальная часть работы выполнена автором во время научной стажировки в Имперском колледже Лондонского университета под научным руководством профессора Д.Б.Сполдинга.

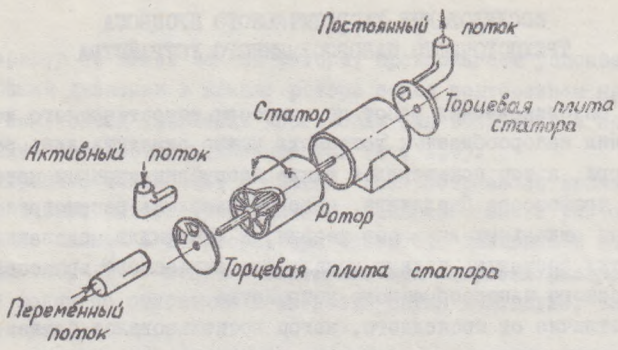


Рис. I
Трехпоточное напорнообменное устройство

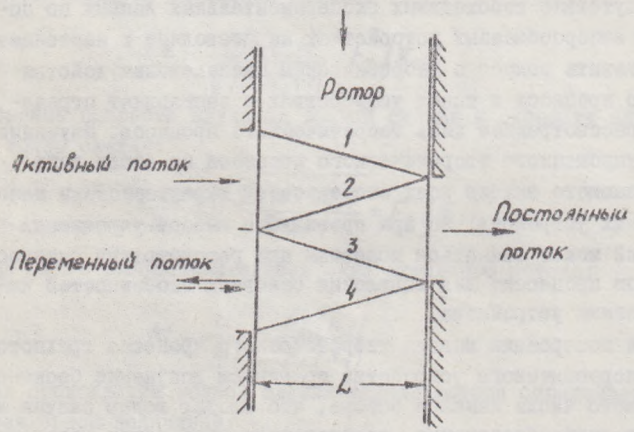


Рис. 2
Схема распространения волновых процессов
на цилиндрической развертке ротора

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТРЕХПОТОЧНОГО НАПОРООБМЕННОГО УСТРОЙСТВА

Из опубликованных работ по вопросам теоретического исследования напоробменных устройств можно отметить лишь работы Барри, автор пользовался также неопубликованными материалами профессора Сполдинга, которые касались рассмотрения некоторых отдельных вопросов теории, и Кентфилда, сделавшего попытку составить полную модель теоретического процесса трехпоточного напоробменного устройства.

В отличие от последнего, автор воспользовался более простым математическим аппаратом, что позволило ему запрограммировать расчет для ЭЦМВ и провести более детальный анализ рабочего процесса трехпоточного напоробменного устройства.

Отсутствие необходимых экспериментальных данных по потерям и напоробменных устройствах не позволяет в настоящее время ставить вопрос о теоретическом исследовании действительного процесса в таких устройствах и заставляет ограничиться рассмотрением лишь теоретического процесса. Изучение такого упрощенного теоретического процесса не может дать исчерпывающего знания всех особенностей характеристики напоробменных устройств, но при правильном выборе упрощающих допущений может оказаться полезным при рассмотрении физических основ процесса; для выявления основных особенностей характеристики устройства.

При построении модели теоретического процесса трехпоточного напоробменного устройства принимаем допущение бесконечно большого числа каналов ротора, что сводит волны сжатия на трение и вихреобразование, перетеканием газа между каналами и по периферии ротора; предполагаем правильные геометрические фазы открытия и закрытия каналов ротора; пренебрегаем влиянием окружной скорости ротора; пренебрегаем разностью

температур по длине канала ротора; предполагаем успокоение колебаний давления в канале ротора перед повторением процесса в нем; вывод уравнений производим для воздуха при предположении постоянства теплоемкостей ($\kappa = 1,4$).

Процесс наполнения и сжатия. Распространение волны сжатия в канале ротора трехпоточного напоробменного устройства показано линией I на рис.2. При отношении давления в волне сжатия $\pi_1 = \frac{p_A}{p_1}$ получим выражение для скорости распространения волны по отношению к скорости звука в воздухе, заполняющем канал:

$$\frac{c_A}{a_1} = \sqrt{\frac{6\pi_1 + 1}{7}} = F_1(\pi_1). \quad (1)$$

Скорость воздуха за волной сжатия:

$$\frac{u_A}{a_1} = \frac{5(\pi_1 - 1)}{\sqrt{7(6\pi_1 + 1)}} = F_2(\pi_1) \quad (2)$$

Отношение скорости звука за волной сжатия к скорости звука до волны сжатия:

$$\frac{a_A}{a_1} = \sqrt{\frac{\pi_1(6 + \pi_1)}{6\pi_1 + 1}} = F_3(\pi_1) \quad (3)$$

Число M в распределительном окне активного потока:

$$M_A = \frac{u_A}{a_A} = \frac{F_2(\pi_1)}{F_3(\pi_1)} \quad (4)$$

Время прохождения волной сжатия канала ротора определяется безразмерной величиной:

$$\bar{S}_1 = \frac{a_A}{c_A} = \frac{F_3(\pi_1)}{F_1(\pi_1)} \quad (5)$$

Процесс дополнительного сжатия. При достижении волной I конца ротора (рис.2) канал открывается в окно постоянного потока, давление в котором равно ρ_c , а скорость газа U_c . Волна I отражается от открытого конца канала в виде волны сжатия 2 (при условии $\rho_c > \rho_A$). Очевидно, что волна 2 распространяется в виде волны сжатия с отношением давлений $\pi_2 = \frac{\rho_c}{\rho_A}$ относительно движущегося потока, выражения для параметров волны будут аналогичными выражениями № (1,2,3). Скорость волны относительно ротора можно выразить следующим образом:

$$\frac{C_c}{a_A} = F_1(\pi_2) - M_A \quad (6)$$

Скорость в окне постоянного потока:

$$\frac{U_c}{a_A} = M_A - F_2(\pi_2) \quad (7)$$

Число M в окне постоянного потока:

$$M_c = \frac{U_c}{a_c} = \frac{M_A - F_2(\pi_2)}{F_3(\pi_2)} \quad (8)$$

Безразмерная характеристика времени:

$$\bar{S}_2 = \frac{a_A}{C_c} = \frac{1}{F_1(\pi_2) - M_A} \quad (9)$$

Процесс расширения. При достижении волной 2 (см.рис.2) конца ротора, канал открывается в окно переменного потока, давление в котором равно ρ_v , а скорость U_v . Задавись отношением давлений $\delta = \frac{\rho_v}{\rho_c}$, получим выражение для скорости распространения волны расширения относительно ротора:

$$\frac{C_v}{a_A} = F_3(\pi_2) + M_A - F_2(\pi_2) \quad (10)$$

Выражение для числа M в распределительном окне переменного потока:

$$M_v = \frac{u_v}{a_v} = \frac{F_4(\delta) - M_c}{F_5(\delta)} \quad (II)$$

Безразмерная характеристика времени:

$$\bar{S}_3 = \frac{a_A}{c_v} = \frac{l}{F_3(x_2) + M_A - F_2(x_2)} \quad (I2)$$

Заключительный процесс. При достижении фронтом волны 3 (рис.2) конца канала ротора он выходит из зоны окна постоянного потока и закрывается. Волна расширения 3 отражается от закрытого конца канала как волна расширения 4. Выход канала в распределительное окно переменного потока остается открытым до достижения фронтом волны 4 конца ротора, в этот момент закрывается и второй конец канала. Принимая допущение, что фронт волны расширения 4 распространяется относительно переменного потока со скоростью звука a_v , получим безразмерную характеристику времени:

$$\bar{S}_4 = \frac{a_A}{c_v} = \frac{l}{F_3(x_2) [F_5(\delta) + F_4(\delta)] - M_A + F_2(x_2)} \quad (I3)$$

Рассмотрение всех дальнейших волновых процессов заменяем рассмотрением материального баланса за время полного цикла процесса устройства. После преобразования к виду удобному для решения методом итераций, получим следующее выражение для определения отношения давлений δ :

$$F_4(\delta) = M_c + \Delta F_4 \quad (I4)$$

где

$$\Delta F_y = \frac{F_5(\delta) \Pi}{\delta \bar{S}_y (\bar{S}_3 + \bar{S}_4)}$$

и

$$\Pi = \frac{F_2(\kappa_1)(\bar{S}_1 + \bar{S}_2)}{\kappa_2 F_3(\kappa_1)} - \frac{M_c(\bar{S}_2 + \bar{S}_3)}{F_3(\kappa_2)}$$

Качество рабочего процесса трехпоточного напоробменного устройства выражается с помощью к.п.д., определяемого следующим образом:

$$\eta = \frac{m_c \Delta i_{oc}}{m_v \Delta i_{opp}} \quad (15)$$

где

$$\frac{m_c}{m_v} = \frac{F_5(\delta) M_c (\bar{S}_2 + \bar{S}_3)}{\delta M_v (\bar{S}_3 + \bar{S}_4)}$$

Несмотря на значительные упрощения, примененные при составлении модели теоретического процесса, необходимые для его исследования вычисления все еще остаются достаточно трудоемкими, что делает целесообразным применение вычислительной техники. Блок-схема и рабочая программа в автокоде "Меркури" составлена автором самостоятельно, вычисления выполнены в вычислительном центре Лондонского университета.

На рис.3 приведена диаграмма предельных режимов характеристики двигателя, полученная при исследовании теоретического процесса. Рабочее поле характеристики ограничено линией $M_v = 0$ (переход к характеристике смесителя), линией $M_c = 0$ (линия максимального давления в постоянном потоке) и линиями $M_A = 1$, $M_c = 1$ и $M_v = 1$ (линии критического режима в соответствующих распределительных окнах). На рис.4 представлена диаграмма к.п.д. делителя. К.п.д. устройства в относительных координатах $\frac{\eta}{\eta_{max}} - \frac{M_c}{M_A}$ имеет максимум на

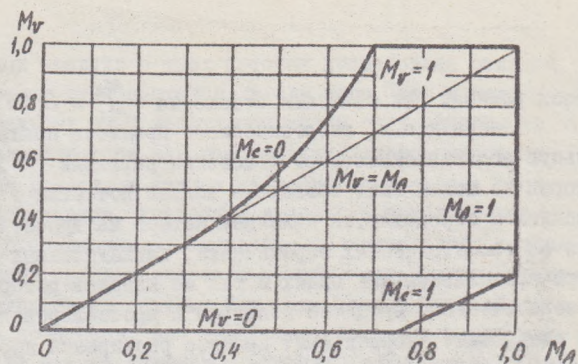


Рис.3
 Диаграмма предельных режимов делителя
 (теоретический процесс)

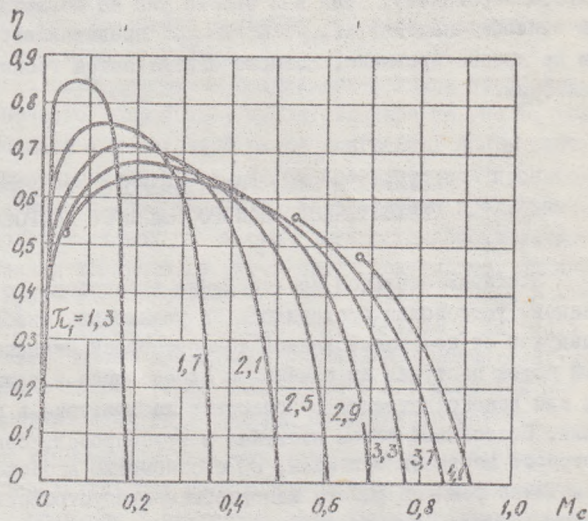


Рис.4
 К.П.Д. делителя (теоретический процесс)
 - II -

всех режимах при значении отношения $\frac{M_c}{M_A} \approx 0,35$.

Анализ к.п.д. теоретического процесса показал значительную его зависимость от отношения давлений \mathcal{T}_1 , которая не может быть объяснена только потерями в ударных волнах и определяется наличием потерь на дросселирование из-за геометрических ограничений, накладываемых на потоки при прохождении ими одних и тех же каналов ротора. Модель теоретического процесса делителя с дросселированием состоит в следующем: "нормальный" процесс расширения переменного потока продолжается до давления p'_v , при этом изменение энтальпии переменного потока Δi_{ov} достаточно для получения в постоянном потоке приращения энтальпии Δi_{oc} , далее процесс расширения продолжается при условии $i_o = const$ (дросселирование), так как работа уже не совершается. Разница теплоперепадов Δi_{ovp} и Δi_{ov} представляет собой потерю на дросселирование, которые определяются геометрическим фактором.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕХПОТОЧНОГО НАПОРОБМЕННОГО УСТРОЙСТВА

Экспериментальное исследование трехпоточного напоробменного устройства проводилось на установке, снабжавшейся воздухом от централизованной компрессорной станции. Переменный поток поступал из помещения лаборатории в режиме смесителя или непосредственно в помещение лаборатории в режиме делителя. Постоянный поток поступал в трубопровод, сопротивление которого менялось вентилем, с его помощью производилось изменение режимов работы напоробменного устройства. На некоторых режимах, где требовалось малое сопротивление трубопровода постоянного потока, он отсоединялся и поток направлялся непосредственно в помещение лаборатории. Необходимость опре-

деления расходов воздуха в трех потоках потребовала отладки методики измерения этих расходов. Ввиду того, что в каждое из распределительных окон воздух поступает одновременно из нескольких каналов ротора или распределительного окна в несколько каналов ротора, в каждом из распределительных окон устанавливается течение, которое с некоторым приближением можно считать стационарным. Указанное обстоятельство позволяет использовать при исследовании обычную аппаратуру, применяемую при исследовании обычных газодинамических устройств с установившимся процессом. Для измерения расхода воздуха применялись обычные мерные диафрагмы и сопла, для измерения давлений и перепадов давлений применялись ртутные и водяные манометры, для измерения температур - ртутные термометры. В каждом из распределительных окон давления измерялись в трех точках. Измерение давления в каналах ротора перед началом процесса показало, что колебания давления в канале к этому времени в значительной мере затухают.

Экспериментальная диаграмма предельных режимов трехпоточного напоробменного устройства, представленная на рис.5, качественно совпадает с показанной ранее диаграммой предельных режимов теоретического процесса. Из-за недостаточной производительности питающего компрессора часть диаграммы предельных режимов при больших числах M в окне активного потока не могла быть получена и показана на рис.5 предположительно. Линия 1 на диаграмме рис.9 соответствует условию $M_c = 0$, линия 2 - $M_v = M_v \text{ крит}$, линия 5 - условию $M_c = M_c \text{ крит}$. На рис.5 представлена также линия предельных режимов для смесителя. Экспериментальные точки, образующие линии 6 и 7 получены при различных сопротивлениях трубопровода постоянного потока.

Отдельные характеристики трехпоточного напоробменного устройства определялись при постоянном режиме питающего компрессора. Выделяются три характерные зоны характеристики трехпоточного напоробменного устройства: зона положительных

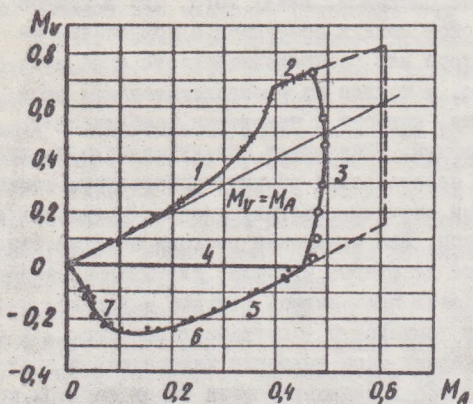


Рис.5

Экспериментальная диаграмма предельных режимов
трехпоточного напоробменного устройства

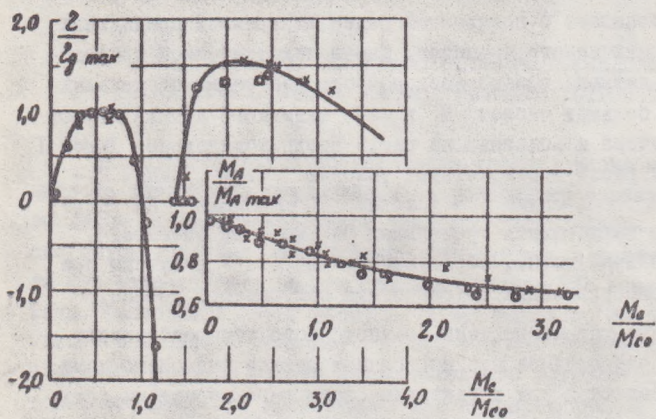


Рис.6

Обобщенная характеристика трехпоточного напор-
обменного устройства

к.п.д. делителя, зона характеристики смесителя. Как показали результаты анализа, характеристики трехпоточного напоробменного устройства при величинах параметра $M_A \max \leq 0,35$ подобны и могут быть обобщены. При дальнейшем увеличении $M_A \max$ характеристики устройства подвергаются значительной деформации, величина к.п.д. сильно снижается. На рис. 6 показана обобщенная характеристика трехпоточного напоробменного устройства даются на рис. 7. При оценке уровня экономичности устройства по приведенным данным следует иметь в виду, что каких-либо работ по его настройке и доводке для получения максимального к.п.д. не производилось. Обращает на себя внимание сильная зависимость максимального к.п.д. от величины числа M в активном потоке, что полностью согласуется с характеристиками теоретического процесса, и, следовательно, подтверждается вывод о значительной роли потерь на дросселирование в рабочем процессе исследованного варианта напоробменного устройства.

Результаты, полученные при исследовании теоретического процесса, имеют качественное совпадение с результатами экспериментального исследования, что свидетельствует о принципиальной правильности модели теоретического процесса. Дальнейшее развитие метода может идти в направлении сближения теоретической модели с реальным путем введения экспериментальных коэффициентов, учитывающих потери. Экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, позволяют определить потери при наполнении канала ротора трехпоточного напоробменного устройства активным потоком. Если представить волну сжатия при наполнении канала активным потоком в виде ударной волны и обозначить давление ρ_A' и число M_A' непосредственно за ударной волной, то величину потерь при наполнении канала можно оценить с помощью коэффициента сохранения полного действия:

$$\sigma = \frac{\rho_{0A}'}{\rho_{0A}} \quad (16)$$

0398939

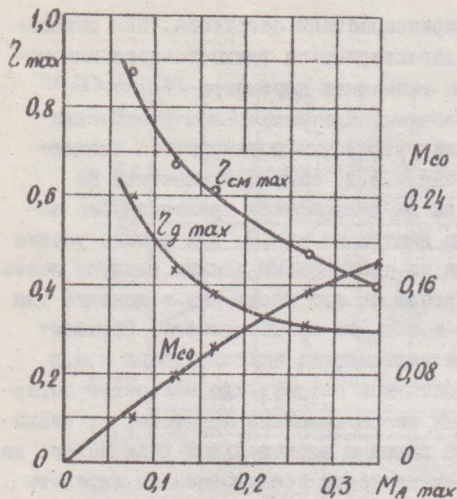
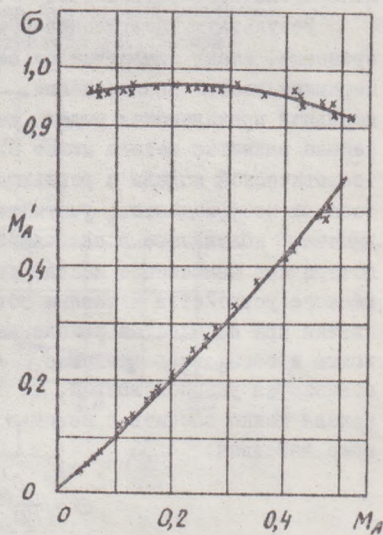


Рис. 7
Базовые параметры обобщенной характеристики трехпоточного напоробменного устройства

Рис. 8
Зависимость коэффициента сохранения полного давления и числа M_A в канале ротора от величины числа M_A в распределительном окне активного потока



Зависимость коэффициента сохранения полного давления σ и числа M за волной сжатия от числа M в распределительном окне активного потока приведена на рис.8. Все экспериментальные точки, полученные на различных режимах работы трехпоточного напорнообменного устройства, хорошо укладываются в единичную зависимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальное и теоретическое исследование позволили выяснить закономерности рабочего процесса трехпоточного напорнообменного устройства.

2. В работе определена область существования и получены экспериментальные характеристики трехпоточного напорнообменного устройства в виде зависимости числа M в распределительном окне активного потока, числа M в распределительном окне переменного потока и к.п.д. устройства от величины числа M в распределительном окне постоянного потока и в виде зависимости числа M в распределительном окне активного потока и к.п.д. устройства от отношения давлений $\pi_2 = \frac{P_c}{P_a}$.

3. Показана возможность обобщения характеристик трехпоточного напорнообменного устройства в виде зависимости отношения чисел M в распределительном окне активного потока $\frac{M_a}{M_a \max}$ и относительного к.п.д. $\frac{\sigma}{\sigma \max}$ от отношения чисел M в распределительном окне постоянного потока $\frac{M_c}{M_c^0}$.

4. Выявлены три характерные зоны характеристики трехпоточного напорнообменного устройства: зона характеристики дельтатора с положительным к.п.д., зона характеристики дельтатора с отрицательным к.п.д., зона характеристики смесителя.

5. Максимальный к.п.д. трехпоточного напоробменного устройства как в функции делителя, так и в функции смесителя существенно зависит от величины числа M в распределительном окне активного потока, что получено анализом теоретического процесса и экспериментально. Величина максимального к.п.д. трехпоточного напоробменного устройства в функции смесителя в 1,5 раза превышает величину максимального к.п.д. его в функции делителя, благодаря чему использование такого устройства в функции смесителя предпочтительней.

6. Установлено существование потерь на дросселирование в рабочем процессе трехпоточного напоробменного устройства, связанных с наличием геометрических ограничений; наличие этих потерь объясняет сильную зависимость максимального к.п.д. устройства от величины числа M в распределительном окне активного потока.

7. Экспериментальное определение потерь в трехпоточном напоробменном устройстве показало, что коэффициент сохранения полного давления при наполнении канала ротора активным потоком определяется величиной числа M в распределительном окне активного потока и для исследуемого устройства имеет максимум, хотя и слабо выраженный, при наличии $M_A \approx 0,24$

8. Теоретический анализ рабочего процесса напоробменных устройств представляет собой значительные трудности и может быть эффективно осуществлен только при использовании счетной техники. Полученные при таком анализе данные помогают при постановке экспериментального исследования. Получено хорошее качественное совпадение результатов исследования теоретического процесса трехпоточного напоробменного устройства и экспериментального исследования действительного процесса.

9. Полученные в данной работе результаты и методика исследования могут быть использованы как при разработке трехпоточных напоробменных устройств рассмотренной схемы, так и при изучении рабочего процесса напоробменных устройств неко-

торых других схем. В последнем случае потребуется дополнительная разработка методики, связанная со спецификой этих схем напоробменных устройств.

Отдельные вопросы диссертации были доложены и обсуждались на Втором Всесоюзном совещании по применению математических машин при конструировании и исследовании автомобилей и двигателей (Минск, 1-3 февраля 1965 г.), на XVIII научно-технической конференции Челябинского политехнического института (16-17 апреля 1965 г.).

Основные вопросы, освещенные в диссертации, опубликованы в работах:

1. Сухов Е.И. Исследование теоретического процесса трехпоточного напоробменного устройства. Сб. "Применение математических машин при конструировании и исследовании автомобилей и двигателей". Материалы Второго Всесоюзного совещания. Минск, 1-3 февраля 1965 г. том 2. БПИ-НАМИ-НТО- МАШИПРОМ, 1966г

2. Сухов Е.И. Экспериментальное определение предельных режимов напоробменного устройства. Энергомашиностроение, № 8 1967 г.