

Определение КПД компрессора турбостартера ТС-21

1. Цель работы

1.1 Углубить знания по разделу «Компрессора ТРД»

1.2. Получить экспериментально основные параметры компрессора

2. Содержание работы:

2.1. Изучить методику поведения работы

2.2. Ознакомиться с установкой и контрольно-измерительной аппаратурой

2.3. Провести работу

2.4. Обработать результаты

2.5. Составить отчет

Процесс сжатия воздуха

Схема ступени показана на рис. 1, где сечение 1—1 соответствует входу в РК, 2—2 — выходу из РК и входу в НА и 3—3 выходу из ступени.

Если расsects ступень цилиндрической поверхностью, соосной с РК, и развернуть сечение на плоскость, получится плоская решетка *профилей* РК и НА (рис. 2) — ряд одинаковых аэродинамических профилей, расположенных на равных расстояниях друг от друга и под одинаковыми углами к прямой линии, соединяющей сходственные точки профилей, называемой *фронт* решетки. Решетка профилей НА неподвижна, решетка РК движется с окружной скоростью u . Совокупность решеток РК и НА образует *элементарную ступень*.

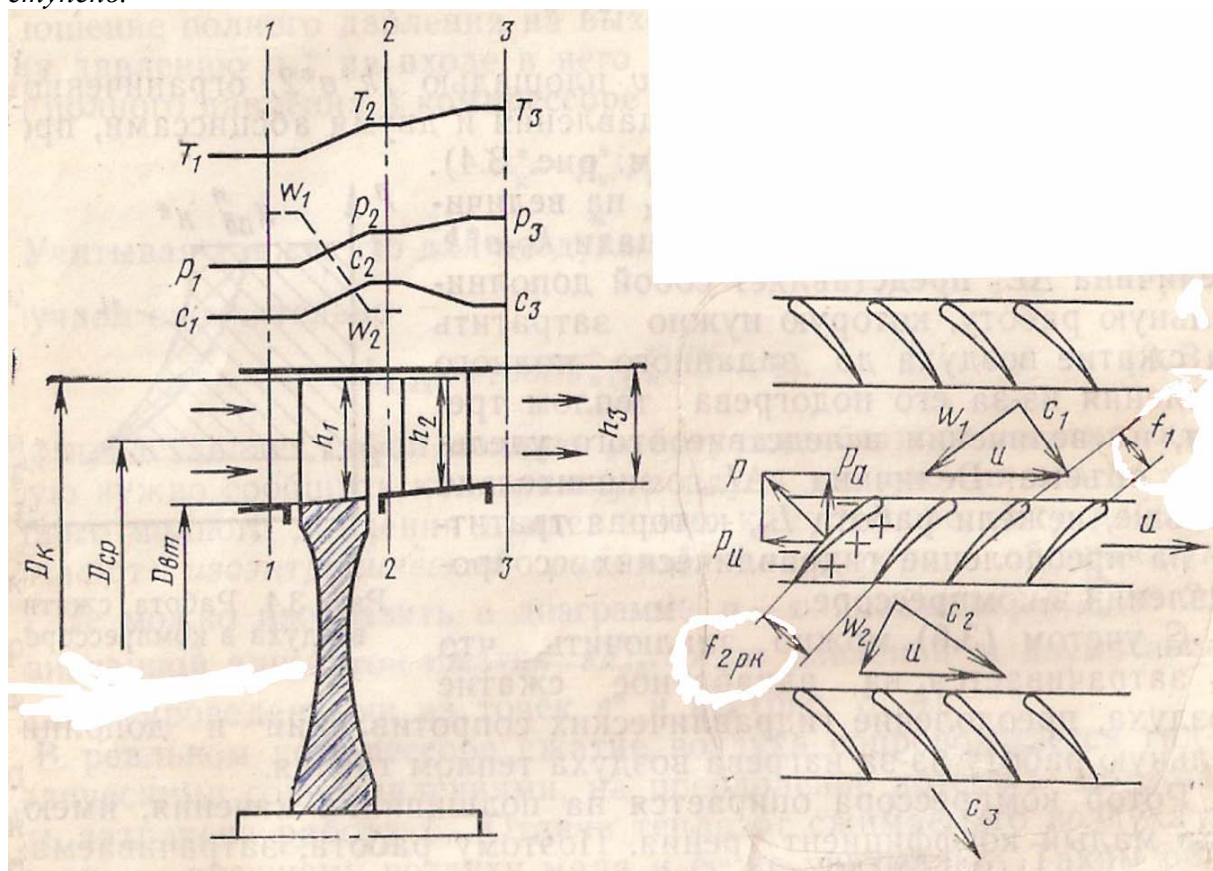


Рис. 1

Схема ступени осевого компрессора в ступени

Воздух поступает в РК со скоростью (абсолютной) C_1 которая в большинстве случаев отклонена от осевого направления в сторону вращения. В относительном движении (относительно стенок каналов РК) воздух поступает с относительной скоростью w_1 , которая находится как сумма $\vec{w}_1 = \vec{c}_1 + (-\vec{n})$. Треугольник, составленный из векторов $\vec{w}_1, \vec{c}_1, \vec{n}$ и в, называется *треугольником скоростей воздуха на входе в РК*

В каналах РК воздух перемещается в двух направлениях: вращается вместе с РК и движется относительно лопаток. Каналы между лопатками РК расширяются, что обеспечивается тем, что угол γ_1 выхода потока из канала больше угла γ_2 входа потока в канал. Площадь на входе в канал, взятая по нормали к вектору w_1 , пропорциональна отрезку $f_1 = t \sin \gamma_1$, а площадь на выходе, нормальная к вектору w_2 , пропорциональна $f_2 = t \sin \gamma_2$, где t — шаг решетки профилей — расстояние между сходственными точками двух соседних профилей. Так как $f_2 > f_1$, то относительная скорость воздуха в РК уменьшается ($w_2 < w_1$), а давление воздуха возрастает ($p_2 > p_1$). В то же время за счет передачи внешней энергии воздуху лопатками РК абсолютная скорость его увеличивается: $c_2 > c_1$.

Таким образом, в каналах РК давление воздуха повышается за счет уменьшения скорости в относительном движении, а поток разгоняется в абсолютном движении от скорости c_1 до скорости c_2 , с которой воздух поступает в каналы НА. Эта скорость является векторной

суммой $\vec{c}_2 = \vec{w}_2 + \vec{n}$ а треугольник, составленный из этих векторов — *треугольником скоростей на выходе из РК*.

При движении воздуха по каналам НА, расширяющимся в направлении движения воздуха, абсолютная скорость его уменьшается от c_2 до c_3 , примерно равной по величине с что приводит к увеличению давления воздуха в НА: $p_3 > p_2$. Входные кромки лопаток НА ориентированы так, чтобы обеспечить плавный, без удара, вход воздуха; выходные кромки расположены таким образом, чтобы вектор c_3 был близок по направлению вектору c .

Повышение давления воздуха в ступени характеризуется *степенью повышения давления*

$$\pi_{cm} = p_3 / p_1$$

равной отношению полного давления p_3^* на выходе из ступени к полному давлению p_1^* на входе в нее; $\pi_{cm} = 1,15 \dots 1,30$.

Изменение параметров воздуха в ступени показано на рис. 1.

Течение воздуха, обтекающего лопатки компрессора, характеризуется числом Маха потока

$$M_1 = w_1 / a_1,$$

где w_1 и a_1 — соответственно относительная скорость воздуха и местная скорость звука в потоке

перед РК ($a_1 = \sqrt{\gamma R T_1}$). При $M_1 = 0,75 \dots 0,85$ ступени называются дозвуковыми.

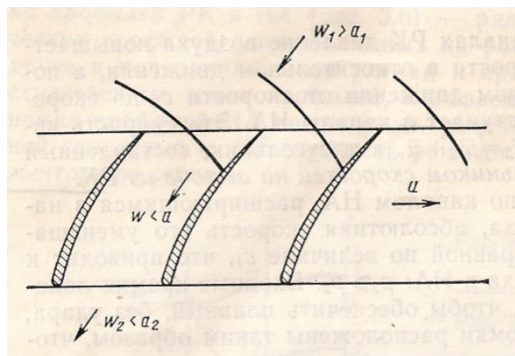
С целью уменьшения габаритных размеров компрессора и его массы желательно увеличение работы ступени L_{cm} , что возможно путем увеличения окружной скорости u на входе в РК и закрутки воздуха в нем (увеличения предварительной закрутки против хода). Желательным является также увеличение осевой скорости c_{1a} на входе в РК, так как позволяет обеспечить потребный расход воздуха G_v при меньшей площади поперечных сечений проточной части.

Вместе с тем, увеличение u , c_{1a} и предварительной закрутки воздуха против хода приводит к

увеличению относительной скорости воздуха да. на входе в РК (см. рис. 2). При w_1 , близких или больших местной скорости звука, у ступеней с дозвуковыми профилями лопаток сильно возрастают потери и уменьшается КПД.

Существенное повышение производительности и напорности ступени возможно только при переходе к околосзвуковым и сверхзвуковым ступеням. Околосзвуковые ступени рассчитаны на работу с околосзвуковыми скоростями, в диапазоне $M_1 = 0,85 \dots 1,1$, а сверхзвуковые — свыше 1,1.

Чтобы такие ступени работали с высоким КПД, их решетки должны иметь сверхзвуковую профилировку — лопатки с острой передней кромкой, плавно уширяющиеся межлопаточные каналы.

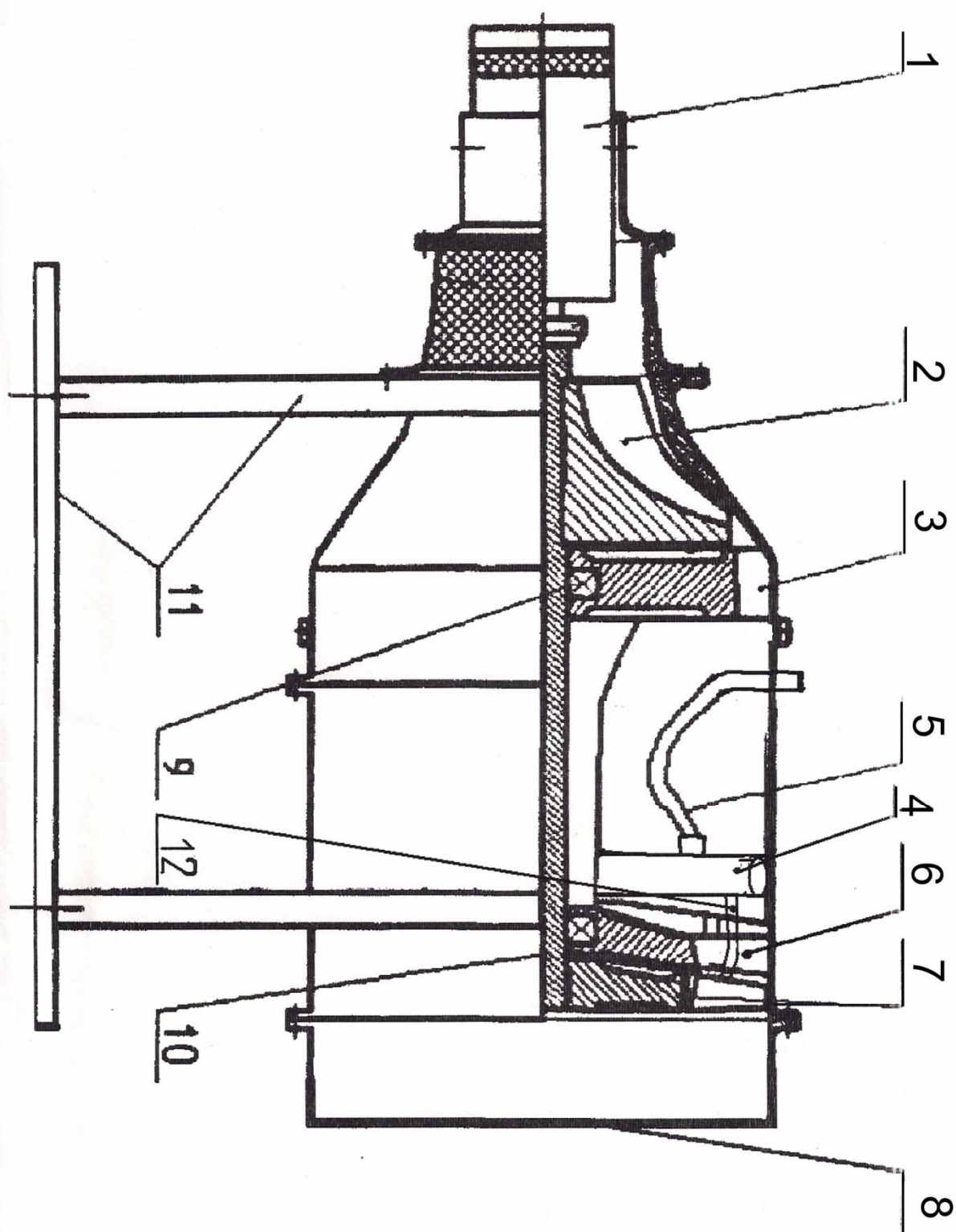


При обтекании таких профилей (рис. 3.7) перед каждым из них образуется косой скачок уплотнения, в котором скорость снижается, оставаясь сверхзвуковой. Двигаясь по каналу между лопатками, поток замедляется и в прямом скачке скорость переходит в дозвуковую. Если прямой скачок располагается вблизи от передней кромки лопатки, то большая часть поверх-

ступени

обтекается дозвуковым потоком, что уменьшает потери. Наличие систем скачков — косоугольного и прямого — также значительно снижает потери. В результате общие потери в сверхзвуковой ступени относительно малы, степень повышения давления в ступени $\pi_{ст} = 1,4 \dots 1,8$ при высоком КПД.

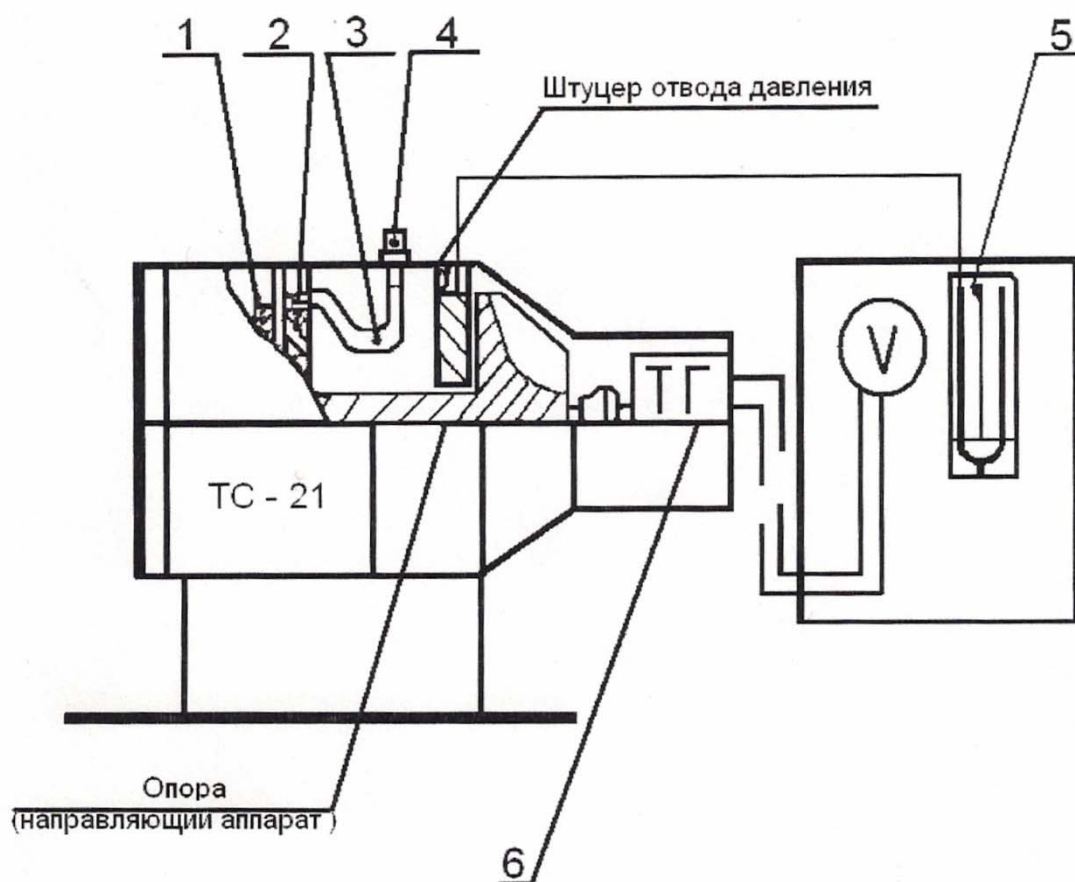
Схема турбостартера ТС-21



Турбостартер ТС-21 состоит из следующих узлов:
1. Тахогенератор

- 2.Центробежный компрессор
- 3.Направляющий аппарат
- 4.Кольцевой распределитель
- 5.Трубки
- 6.Сопловой аппарат
- 7.Диск рабочего колеса
- 8.Защитная сетка турбины
- 9.Опоры(подшипники)
- 10.Ротор турбостартера
- 11.Станина со стойками
- 12.Косые насадки

Схема лабораторной установки и принцип её действия



----- измерительные провода.

- 1 - колесо турбины
- 2- косые насадки
- 3 - система трубок
- 4 - распределитель воздуха
- 5 - жидкостный манометр
- 6 – тахогенератор

Принцип работы:

При запуске стационарного компрессора воздух поступает во внешний распределитель воздуха,

где поток делится на три части, далее по системе трубок на кольцевой распределитель и в итоге выходит через косые насадки, приводя во вращение колесо турбины.

Одновременно с рабочим колесом начинает вращаться компрессор и вал тахогенератора.

Тахогенератор вырабатывает ток, напряжение которого пропорционально частоте вращения ротора турбостартера. Величина электрического напряжения фиксируется тестером. Давление за компрессором измеряется манометром. Температура в проточной части измеряется термопарой. Данные фиксируются, затем производится отключение компрессора.

5.1. Изучить устройство установки и состав контрольно-измерительной аппаратуры.

5.2. Убедиться, что установка и аппаратура готовы для выполнения работы, для этого необходимо:

-осмотреть установку на отсутствие посторонних предметов на входе и выходе.

-проверить наличие масла в системе смазки

-проверить контакты термопар и манометры

5.3. Произвести запуск компрессора

5.4.С помощью крана- задвижки(система отвода сжатого воздуха лаборатории) отрегулировать давление воздуха и вывести его на нужный режим

5.5. Через 1-2 минуты сделать замеры:

n (мин⁻¹)

$P_{2 \text{ атм.зам}}$ (атм)

$t_1 ; t_2$ (°C)

$P_{\text{зам}}$ (мм.рт.ст.)

5.6. Выключить систему

6. Обработка результатов испытаний

6.1. Замеряемые давления в системе СИ

$$P_{\delta} = \frac{P_{\text{зам}} \cdot 1.013 \cdot 10^5}{760} (\text{Па})$$

$$P_{2 \text{ атм}} = P_{2 \text{ атм.зам}} \cdot 1.013 \cdot 10^5 (\text{Па})$$

6.2. Давление на выходе из компрессора:

$$P_{2 \text{ атм}} = P_{2 \text{ атм}} + P_{\delta} (\text{Па})$$

6.3. Степень повышения давления в компрессоре

$$\pi_k = \frac{P_{2 \text{ атм}}}{P_{\delta}}$$

6.4. Адиабатная работа компрессора:

$$L_{\text{адк}} = 1005,5 \cdot T_1 \left(\pi_k^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right)$$

$$\text{где, } T_1 = t_1 + 273,15 (\text{K})$$

6.5. Эффективная работа компрессора

$$L_{\text{к.к.}} = 1005,5 \cdot (T_2 - T_1) \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right)$$

$$\text{где, } T_1 = t_1 + 273,15 (K)$$

$$\text{где, } T_2 = t_2 + 273,15 (K)$$

$$\eta_k = \frac{L_{\text{ад.к.}}}{L_{\text{с.к.}}}$$

7. Заполнить таблицы

Таблица измерений:

n	min ⁻¹			
P _{2 зам}	мм.рт.мт			
P _{2 зам}	мм.вод.ст			
t ₂	°C			
t ₁	°C			

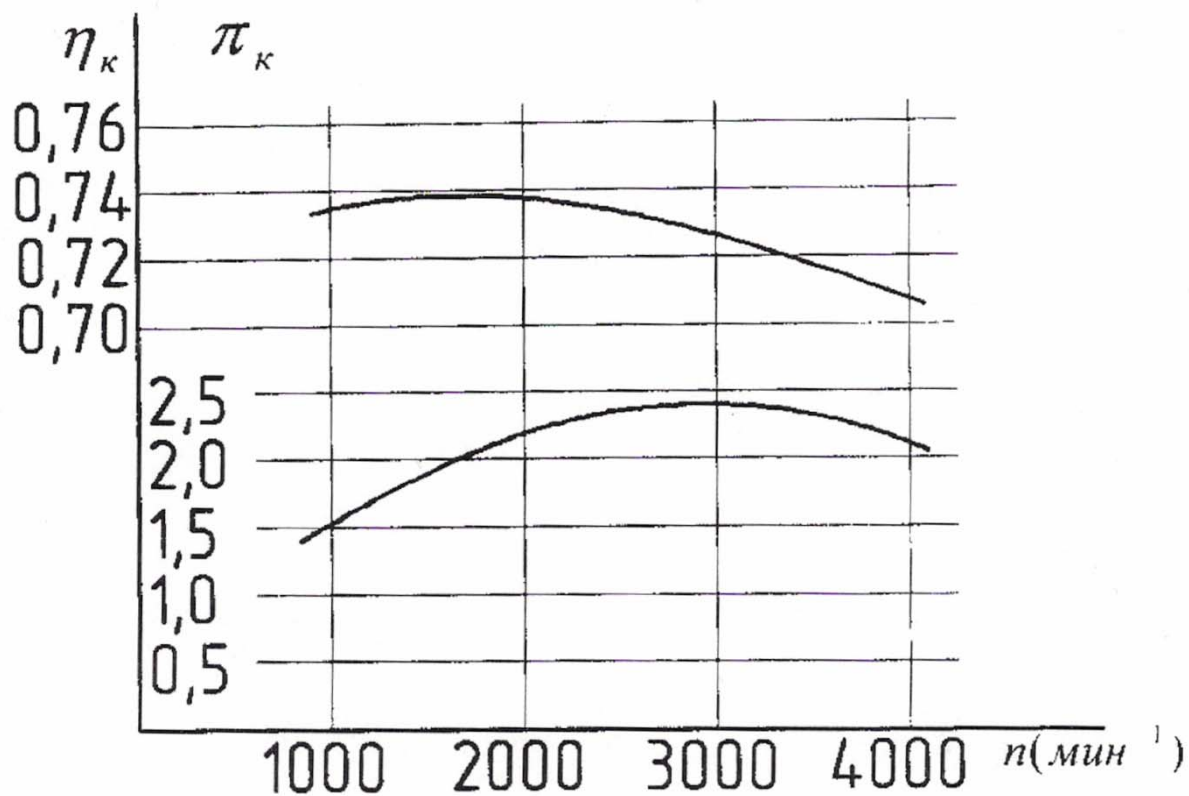
Таблица обработки результатов измерений

n	P _{2 атм}	P _{2 ата}	η _к	L _{ад. к.}	L _{с.к.}	η _{ад.к.}
min ⁻¹	Па	Па		Дж/кг	Дж/кг	

8. Построить график по результатам расчета

Построить график η_k , $\pi_k = f(n)$

Образец:



9. Вывод

Оценить влияние частоты вращения ротора на степень повышения давления и КПД компрессора

Лабораторно-практическая работа №3

Определение КПД турбины турбостартера ТС-21

1. Цель работы:

1.1 Углубить знания по разделу «ГТ ТРД»

1.2 Экспериментально получить КПД турбины

2. Содержание работы:

2.1 Ознакомиться с установкой и измерительной аппаратурой

2.2 Изучить методику проведения работы

2.3. Провести работу

2.4. Обработать результаты

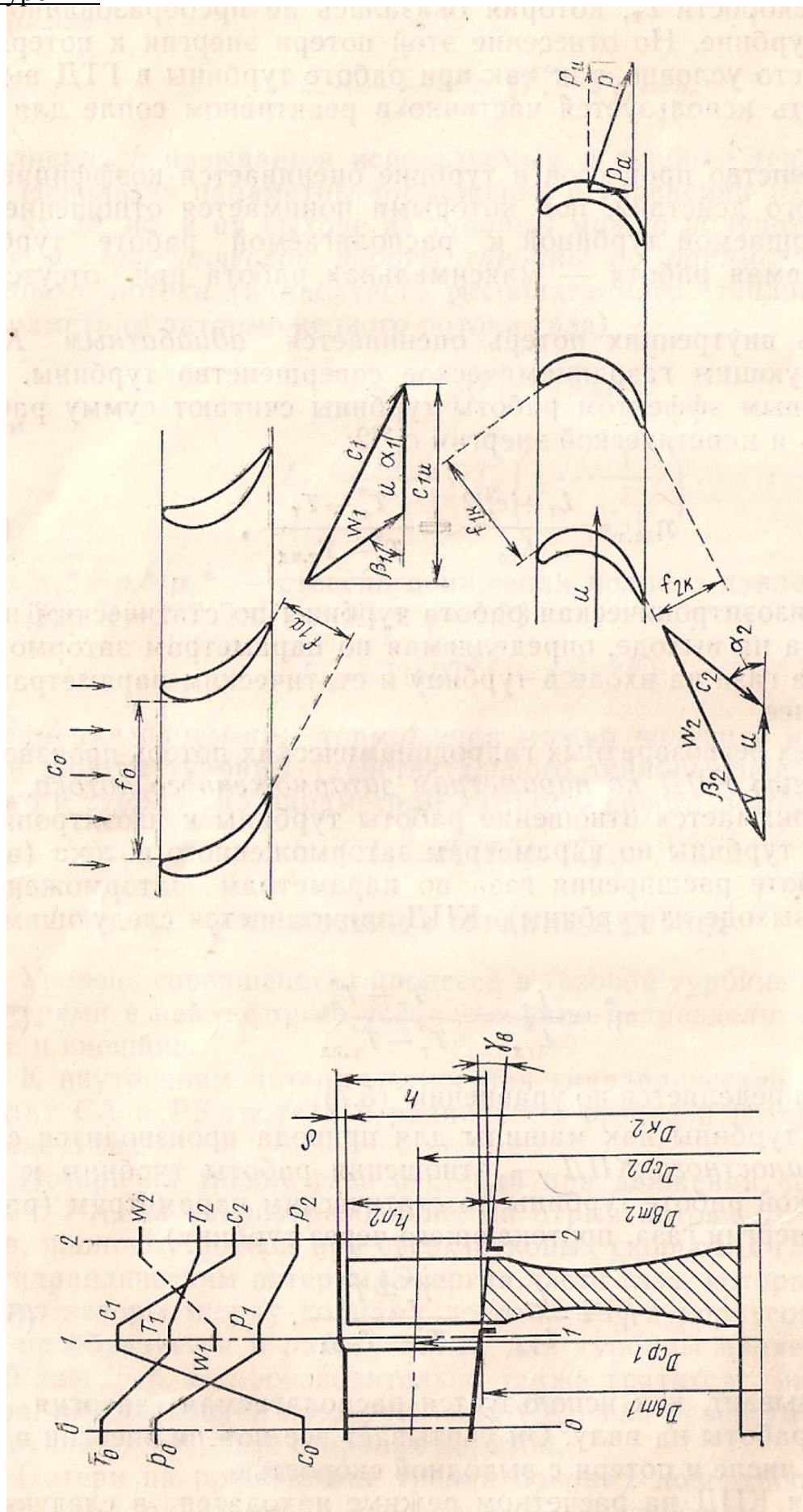
2.5. Составить отчет

СТУПЕНЬ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

На схеме ступени (рис. 1) показаны сечения тракта: 0 — перед СА, 1 — в осевом зазоре между СА и РК, 2 — за РК. Развертка на плоскость цилиндрических сечений лопаток турбины, называемая *элементарной ступенью* турбины, изображена на рис. 2. На входе в СА газ имеет параметры p_0 и T_0 .

СА решает две задачи: преобразует потенциальную энергию газа (энтальпию) в кинетическую и изменяет направление газа перед входом на лопатки РК. Для решения этих задач каналы СА спрофилированы так, чтобы обеспечить расширение газа до заданного давления и тем самым увеличить скорость потока. Поэтому СА представляет собой систему суживающихся каналов, изогнутых в сторону вращения, в которых давление и температура газа уменьшается, а скорость увеличивается от c_0 до c_1 . Направление вектора C определяется в основном направлением выходной кромки лопаток СА, составляющей угол α с плоскостью вращения. Чем этот угол меньше, тем меньше площадь выходного сечения F_{ca} СА,

Рис 5.3. Схема ступени газовой турбины Рис 5.4. Схема трения газа в ступени турбины

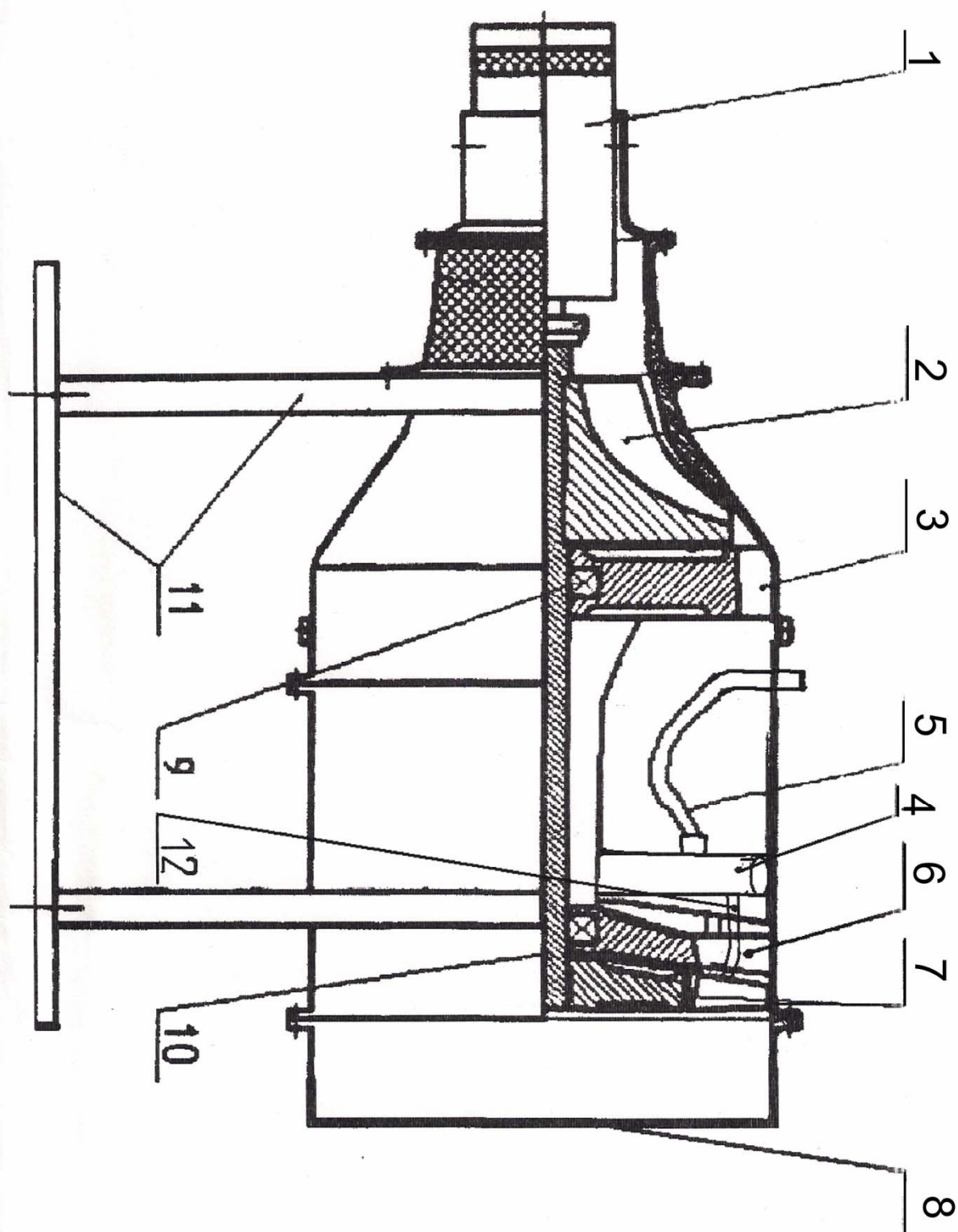


Скорость газа относительно лопаток w_1 находится геометрическим суммированием $\vec{w}_1 = \vec{c}_1 + (-\vec{u})$. Треугольник, составленный из векторов \vec{w}_1 , \vec{u} и \vec{c}_1 называется *треугольником скоростей газа на входе в РК*. В суживающихся криволинейных каналах РК ($s_2 < s_1$) происходит дальнейшее расширение газа, сопровождающееся уменьшением его давления и температуры. Скорость возрастает до w_2 , а поток поворачивается в сторону, обратную направлению движения лопаток.

Абсолютная скорость газа c_2 за РК находится как геометрическая сумма $\vec{c}_2 = \vec{w}_2 + \vec{u}$ а треугольник, составленный из этих векторов, называется *треугольником скоростей газа на выходе из РК*. По величине c_2 меньше, чем c_1 так как значительная часть кинетической энергии газа расходуется на вращение РК. Изменение параметров газа в ступени показано на рис. 1.

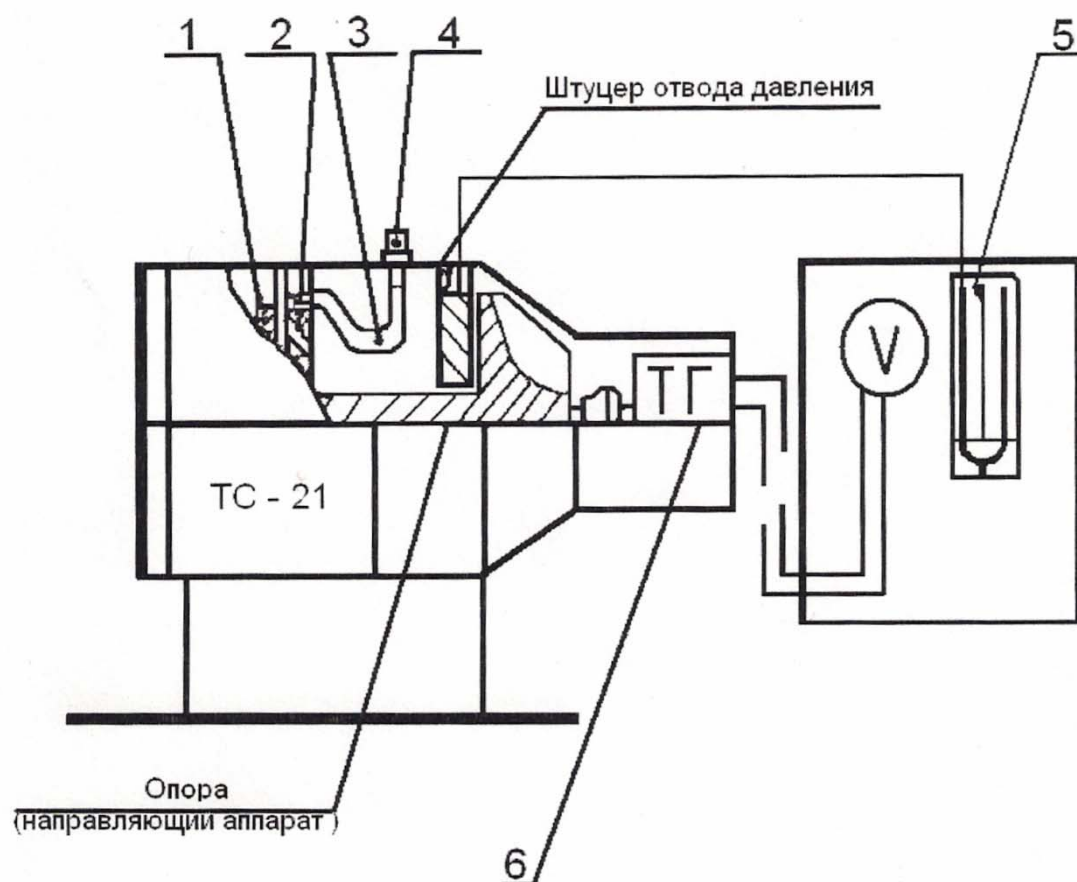
При течении по каналу, образованному лопатками РК, газ, обтекая профили лопаток, изменяет направление и величину скорости своего движения, а лопатки при этом испытывают ответное действие со стороны газа в виде сил давления, больших на корытце и меньших на спинке лопаток (рис. 1). Окружная составляющая равнодействующей этих сил создает крутящий- момент, приводящий РК во вращение, а осевая составляющая воспринимается в конечном счете упорным подшипником турбины.

Схема турбостартера ТС-21



Турбостартер ТС-21 состоит из следующих узлов:

- 1.Тахогенератор
 - 2.Центробежный компрессор
 - 3.Направляющий аппарат
 - 4.Кольцевой распределитель
 - 5.Трубки
 - 6.Сопловой аппарат
 - 7.Диск рабочего колеса
 - 8.Защитная сетка турбины
 - 9.Опоры(подшипники)
 - 10.Ротор турбостартера
 - 11.Станина со стойками
 - 12.Косые насадки
- 4.Схема лабораторной установки и принцип ее действия



-----Измерительные провода

Состав:

- 1 Статор турбины
- 2 Ротор турбины
- 3 Воздушная магистраль

4 Штуцер для подвода сжатого воздуха,

5 Жидкостный манометр

6 Тахогенератор

Принцип работы: Сжатый воздух из компрессора подается через 2 трубки, которые крепятся в сопловом аппарате турбины. Воздух выходя из соплового аппарата приводит во вращение рабочее колесо турбины. Одновременно с рабочим колесом начинает вращаться компрессор и вал тахогенератора. Тахогенератор вырабатывает ток, напряжение которого пропорционально частоте вращения ротора турбостартера. Величина электрического напряжения фиксируется тестером. Давление за компрессором измеряется на жидкостном манометре.

5. Порядок проведения работы:

5.1. Изучить устройство установки и состав контрольно-измерительной аппаратуры

5.2. Убедиться, что установка и аппаратура готовы для выполнения работы

5.3. Накачать воздух в компрессор

5.4. Включить тестер

5.5. Открыть клапан компрессора

5.6. Произвести замер параметров на тестере и жидкостном манометре

5.7. Выключить компрессор

6. Обработка результатов испытаний:

6.1 Перевод замеренных параметров в единицы системы СИ:

$$P_d = \frac{P_{\text{ман}} \cdot 1.013 \cdot 10^5}{760} (\text{Па})$$

$$P_{\text{занм}} = \frac{P_{\text{занм ман}} \cdot 1.013 \cdot 10^5}{760} (\text{Па})$$

$$P_{\text{занм ман}} = \Delta P_{\text{манометр}}$$

6.2 Давление газа перед турбиной:

$$P_{\text{занм}} = P_{\text{занм}} + P_d (\text{Па})$$

6.3 Температура газа перед турбиной:

$$T_2^{\circ} = t_2^{\circ} + 273,15 (\text{K})$$

6.4 Давление газа за турбиной:

$$P_{\text{4ман}} = P_{\text{4ман}} + P_d (\text{Па})$$

6.5 Степень понижения давления:

$$\pi_n = \frac{P_{3ana}}{P_{1ana}}$$

6.6 Адиабатическая работа расширения газа на турбине:

$$L_{adm} = \frac{\gamma}{\gamma-1} R T_3^* \left[1 - \frac{1}{\pi_n^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \right] \left(\frac{D_{тс}}{КС} \right)$$

Рабочим телом на турбине является воздух, поэтому $\gamma = 1,4$; $R = 287 \frac{Дж}{кг \cdot K}$

В этом случае

$$L_{adm} = 1005 \cdot T_3^* \left[1 - \frac{1}{\pi_n^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \right] \left(\frac{D_{тс}}{КС} \right)$$

6.7 Температура газа за турбиной:

$$T_4^* = t_4^* + 273,15 (K)$$

6.8 Эффективная работа расширения газа на турбине:

$$L_{em} = \frac{\gamma}{\gamma-1} R T_3^* [T_3^* - T_4^*] \left(\frac{D_{тс}}{КС} \right)$$

при $\gamma = 1,4$; $R = 287 \frac{Дж}{кг \cdot K}$

$$L_{em} = 1005 [T_3^* - T_4^*] \left(\frac{D_{тс}}{КС} \right)$$

6.9 Эффективный КПД узла турбины:

$$\eta_n = \frac{L_{em}}{L_{adm}}$$

Таблица №1 Результаты измеренных параметров.

n	min ⁻¹			
P _{з зам}	мм.рт.мт			
t _з [*]	°C			
t ₄ [*]	°C			
P _{3 ати.зам.}	мм.вод.ст			
P _{4 ати.зам.}	мм.вод.ст			

Таблица №2 Результаты обработки измеренных величин

P _{4 ата}	n	P _{3 ати}	P _{3 ата}	P _{4 ати}	η _м	L _{ад.т.}	L _{ст.}	η _т
Па	мин ⁻¹	Па	Па	Па		Дж/кг	Дж/кг	

