

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

НАГНЕТАТЕЛИ И ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАРА В КАНАЛЕ СОПЛОВОГО АППАРАТА И УГЛА ОТКЛОНЕНИЯ ПОТОКА ПАРА В КОСОМ СРЕЗЕ

**Методические указания
к практической работе № 1**

**Санкт-Петербург
2019**

УДК 621.18(07)

Нагнетатели и тепловые двигатели. Определение параметров пара в канале соплового аппарата и угла отклонения потока пара в косом срезе: методические указания к практической работе №1/ сост. П.Н. Коновалов, М.С. Липатов; ВШТЭ СПбГУПТД.- СПб., 2019. - 11 с.

В настоящих методических указаниях приводятся исходные данные и алгоритмы по определению угла выхода потока пара из каналов соплового аппарата, угла отклонения потока пара в косом срезе и длины сопловой лопатки с рисунками и таблицами.

Предназначены для обучающихся ИЭиА и ИБФО направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профили «Промышленная теплоэнергетика» и «Энергетика теплотехнологий».

Рецензенты: зав. кафедрой промышленной теплоэнергетики ВШТЭ СПбГУПТД, канд. техн. наук, доцент С.Н. Смородин; профессор кафедры энергетических установок (не ядерных) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», д-р техн. наук В.В. Барановский.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой теплосиловых установок и тепловых двигателей ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 5 от 30.01.2019).

Утверждены к изданию методической комиссией Института энергетики и автоматизации ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 5 от 01.02.2019).

Рекомендованы к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ в качестве методических указаний.

РАСШИРЕНИЕ ПОТОКА ПАРА В МЕЖЛОПАТОЧНОМ КАНАЛЕ СОПЛОВОГО АППАРАТА

Межлопаточные каналы соплового аппарата паровой турбинной ступени предназначены для преобразования потенциальной энергии пара в кинетическую. В указанных каналах происходит расширение пара, т.е. уменьшение давления, увеличение объема, а также увеличивается абсолютная скорость потока пара от значения C_0 на входе в канал до C_1 на выходе из него.

Канал соплового аппарата образован соседними сопловыми лопатками и конструкциями корпуса или диафрагмы турбины. Как правило, канал имеет конфузурную (суживающуюся) форму, ширина канала во входном сечении больше, чем в выходном. *Косым срезом* одиночного канала или решетки называется призматическое пространство с поперечным сечением ABC и высотой, равной высоте (длине) лопатки (рис.1).

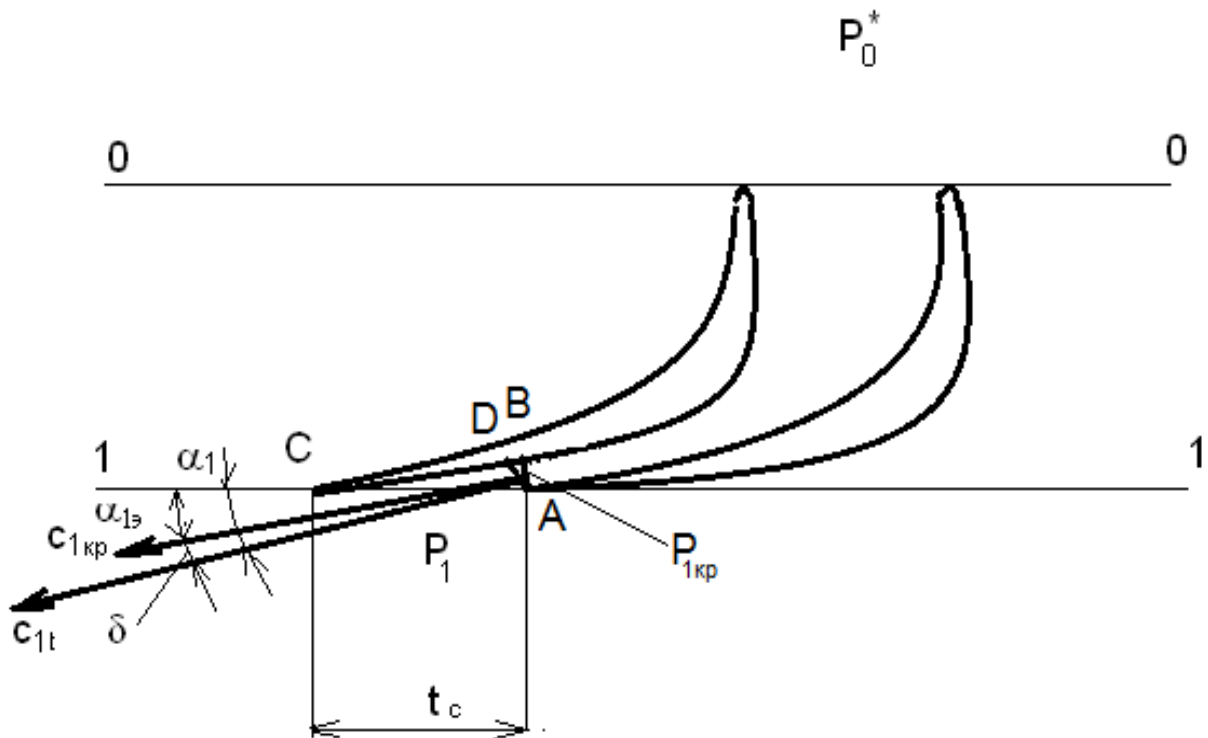


Рис.1. Решетка профилей лопаток соплового аппарата в плоскости u-a:
 P_0^* - давление пара на входе в канал; P_1 - давление пара за каналом;
 $P_{1кр}$ - давление пара в узком сечении канала АВ; $\alpha_{1э}$ - эффективный угол
 выхода потока пара из канала; α_1 - угол выхода потока пара из канала;
 δ - угол отклонения потока пара в косом срезе; t_c - шаг решетки

Процесс расширения пара в межлопаточном канале соплового аппарата в диаграмме h-s показан на рис. 2.

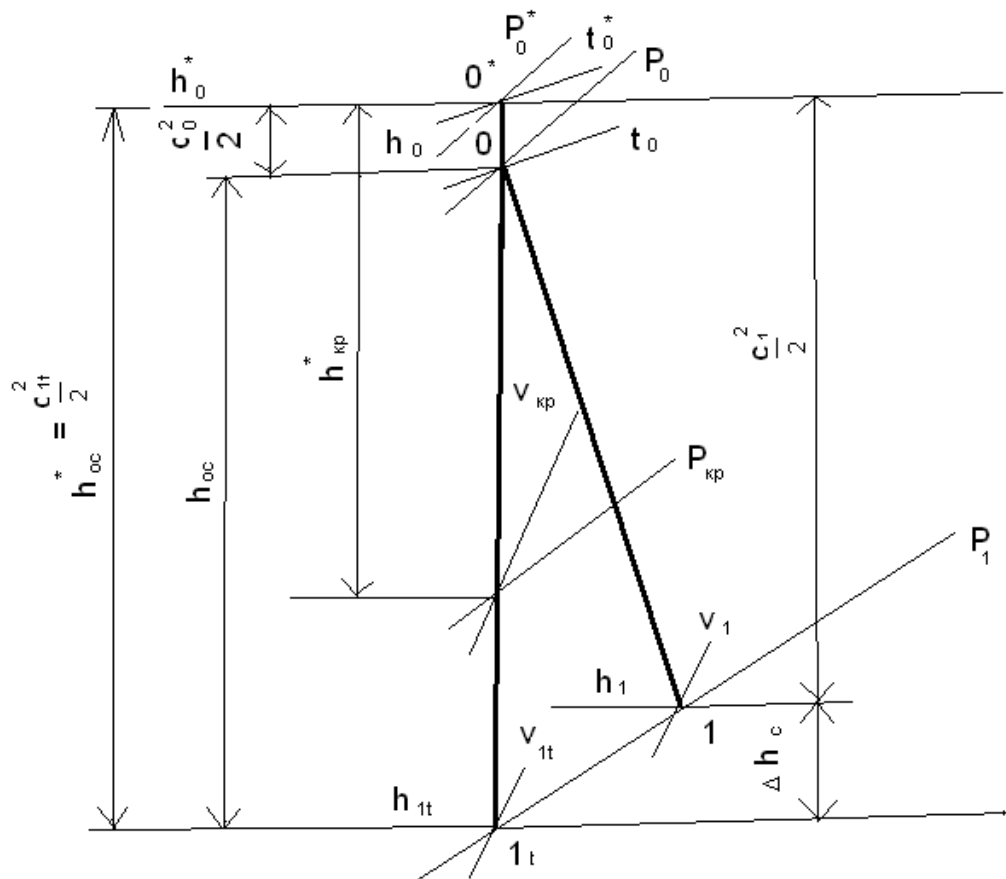


Рис. 2. Процесс расширения пара в канале соплового аппарата

При отсутствии теплообмена с внешней средой и потерь энергии процесс расширения пара в канале соплового аппарата протекает по изоэнтропе 0-1_t. Из уравнения энергии следует:

$$h_0 + C_0^2/2 = h_{1t} + C_{1t}^2/2 \text{ или } h_0 - h_{1t} = C_{1t}^2/2 - C_0^2/2,$$

где h_0 – энтальпия пара на входе в сопловый аппарат; h_{1t} – энтальпия пара на выходе из соплового аппарата; C_{1t} – теоретическая абсолютная скорость потока пара на выходе из канала.

Из указанных формул можно получить следующие выражения:

$$h_0 - h_{1t} = h_{0c}; C_{1t} = (2 \cdot h_{0c} + C_0^2)^{1/2} = (2 \cdot h_{0c}^*)^{1/2}; h_{0c}^* = h_{0c} + C_0^2/2,$$

где h_{0c} – располагаемый теплоперепад в каналах соплового аппарата; h_{0c}^* – полный располагаемый теплоперепад в каналах соплового аппарата или располагаемый теплоперепад в каналах соплового аппарата по заторможенным параметрам.

При наличии потерь энергии скорость потока пара на выходе из соплового аппарата будет меньше и равна C_1 . Отношение $C_1/C_{1t} = \phi$ называют *коэффициентом скорости* сопловой решетки. Потери энергии в каналах соплового аппарата определяются по формуле:

$$\Delta h_c = C_{1t}^2/2 - C_1^2/2 = (C_{1t}^2/2) \times (1 - \varphi^2).$$

Выделившаяся теплота при наличии потерь, связанных с трением, повышает энтальпию пара и она становится равной

$$h_1 = h_{1t} + \Delta h_c.$$

Действительный процесс расширения пара будет определяться линией 0-1 (рис. 2).

При определенном отношении давлений $\varepsilon_1 = P_1/P_0^*$ в узком сечении канала АВ будет иметь место максимальный расход пара, и в этом случае значения параметров пара станут критическими, т.е. $P_1 = P_{1кр}$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_{кр}$; $C_1 = C_{кр} = a_{кр}$. Из уравнения сплошности можно получить критическое отношение давлений:

$$\varepsilon_{кр} = P_{1кр}/P_0^* = (2/(k+1))^{k/(k-1)}.$$

Критическое отношение давлений $\varepsilon_{кр}$ зависит только от показателя адиабаты k . Для перегретого пара этот показатель равен $k = 1,3$, $\varepsilon_{кр} = 0,5457$; для сухого насыщенного пара $k = 1,135$, $\varepsilon_{кр} = 0,5774$; для насыщенного пара со степенью сухости x : $k = 1,035 + 0,1x$.

Возможны четыре случая расширения пара в косом срезе соплового аппарата.

1. Давление пара за косым срезом $P_1 \geq P_{1кр}$ и отношение давлений $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{кр}$. Расширение пара происходит в суживающейся части межлопаточного канала, абсолютная скорость потока пара на выходе из соплового аппарата C_1 будет меньше критического значения $C_{кр}$ при P_1 больше $P_{1кр}$ и неизменном давлении пара на входе в канал P_0 , при P_1 , равном $P_{1кр}$, $C_1 = C_{кр}$. В области косога среза расширения пара не происходит, не будет отклоняться и поток пара, поэтому угол $\alpha_1 = \alpha_{1э}$, угол отклонения $\delta = 0$.

2. Давление пара за косым срезом $P_1 < P_{1кр}$ и отношение давлений $\varepsilon_1 < \varepsilon_{кр}$. Расширение пара в суживающейся части межлопаточного канала будет происходить до давления $P_{1кр}$, а в косом срезе до давления P_1 , которое устанавливается на линии АД. Скорость потока пара в косом срезе увеличится от значения $C_{кр}$ до значения C_1 , которое станет больше скорости звука, поток пара вокруг точки А отклонится в сторону увеличения угла α_1 , т.е. угол

$$\alpha_1 = \alpha_{1э} + \delta \text{ и угол отклонения } \delta \neq 0.$$

Угол отклонения потока пара в косом срезе δ определяется из уравнения сплошности для сечений АВ и АД, где расход пара G равен:

$$G = \mu_1 \times F_{AB} \times C_{кр} \times \rho_{кр} = \mu_1 \times F_{AD} \times C_{1t} \times \rho_{1t};$$

$$F_{AB} = t_c \times \sin \alpha_{1э} \times l_c, F_{AD} = t_c \times \sin(\alpha_{1э} + \delta) \times l_c,$$

где μ_1 - коэффициент расхода пара в канале; F_{AB} - площадь канала в сечении АВ; F_{AD} - площадь канала в сечении АД; $\rho_{кр}$ - критическая плотность пара в сечении АВ; $\rho_{1т}$ - плотность пара в конце изобарного процесса расширения в сечении АД. Учитывая вышепоказанные зависимости, синус угла α_1 получают по формуле, которую называют формулой Бэра [1]:

$$\sin\alpha_1 = \sin(\alpha_{1э} + \delta) = (C_{кр}/C_{1т}) \times (\rho_{кр}/\rho_{1т}) \times \sin\alpha_{1э}.$$

Угол выхода потока пара $\alpha_1 = \arcsin((C_{кр}/C_{1т}) \times (\rho_{кр}/\rho_{1т}) \times \sin\alpha_{1э})$ и угол отклонения потока пара в косом срезе соплового аппарата

$$\delta = \alpha_1 - \alpha_{1э}.$$

При уменьшении давления пара P_1 или ε_1 угол отклонения потока пара в косом срезе δ будет тем больше, чем меньше давление P_1 или отношение давлений ε_1 .

3. Давление пара за косым срезом $P_1 = P_{1пр} < P_{1кр}$ и отношение давлений $\varepsilon_1 = \varepsilon_{пр} < \varepsilon_{кр}$. $P_{1пр}$ – это предельное или наименьшее давление пара на внешней границе косого среза АС, при котором происходит полное использование косого среза для расширения пара. В этом случае поток пара будет отклоняться в косом срезе на предельный угол $\delta_{пр}$. Предельное значение давления пара определяется по формуле:

$$P_{1пр} = \varepsilon_{пр} \times P_0^* = \varepsilon_{кр} \times (\sin\alpha_{1э})^{2к/(к+1)} \times P_0^* = (2/(к+1))^{к/(к-1)} \times (\sin\alpha_{1э})^{2к/(к+1)} \times P_0^*.$$

Синус предельного угла выхода потока пара из канала соплового аппарата $\alpha_{1пр}$ определяется [2]:

$$\sin\alpha_{1пр} = \sin(\alpha_{1э} + \delta_{пр}) = (C_{кр}/C_{1тпр}) \times (\rho_{кр}/\rho_{1пр}) \times \sin\alpha_{1э},$$

где $C_{1тпр}$ – теоретическая абсолютная скорость потока пара на выходе из косого среза при давлении $P_{1пр}$; $\rho_{1пр}$ – предельное значение плотности пара в конце изобарного процесса расширения при давлении $P_{1пр}$. Угол $\alpha_{1пр}$ выражается как

$$\alpha_{1пр} = \arcsin((C_{кр}/C_{1тпр}) \times (\rho_{кр}/\rho_{1пр}) \times \sin\alpha_{1э}) \text{ и } \delta_{пр} = \alpha_{1пр} - \alpha_{1э}.$$

4. Давление пара за косым срезом $P_1 < P_{1пр} < P_{1кр}$ и отношение давлений $\varepsilon_1 < \varepsilon_{пр} < \varepsilon_{кр}$. Расширение потока пара будет происходить за пределами косого среза. В косом срезе картина течения будет аналогична третьему случаю. Окружная составляющая скорости C_1 скорость $C_{1у}$ не меняется при указанном соотношении давлений. Скорость $C_{1а}$, являющаяся осевой составляющей скорости C_1 , растет за счет расширения потока пара в осевом направлении за косым срезом.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПАРА В КАНАЛЕ СОПЛОВОГО АППАРАТА И УГЛА ОТКЛОНЕНИЯ ПОТОКА ПАРА В КОСОМ СРЕЗЕ

Исходные данные:

1. Давление пара на входе в межлопаточный канал соплового аппарата – P_0 , МПа.
 2. Температура пара на входе в межлопаточный канал соплового аппарата – t_0 , °С.
 3. Давление пара за косым срезом канала соплового аппарата – P_1 , МПа.
 4. Расход пара через канал соплового аппарата – G , кг/с.
 5. Шаг сопловой решетки – t_c , мм.
 6. Эффективный угол выхода потока пара из канала соплового аппарата – $\alpha_{1э}$, град.
 7. Абсолютная скорость потока пара на входе в канал соплового аппарата – C_0 , м/с.
 8. Коэффициент скорости в канале соплового аппарата – φ .
- Значения исходных параметров выдаются преподавателем обучающимся в соответствии с его вариантом.

Таблица 1

Алгоритм расчета

Наименование величины	Единица измерения	Расчетная формула	Результаты расчетов
Энтальпия пара на входе в сопловый аппарат, h_0	кДж/кг	Определяется по P_0, t_0 (диаграмма h-s, программа САТТ2)	
Энтальпия пара на входе в сопловый аппарат по заторможенным параметрам, h_0^*	кДж/кг	$h_0 + C_0^2/2000$	
Энтальпия пара на выходе из соплового аппарата в конце изоэнтропного процесса расширения, h_{1t}	кДж/кг	Определяется по P_1 и энтропии s_0 (диаграмма h-s, программа САТТ2)	

Наименование величины	Единица измерения	Расчетная формула	Результаты расчетов
Располагаемый теплоперепад в канале соплового аппарата, h_{0c}	кДж/кг	$h_0 - h_{1t}$	
Полный располагаемый теплоперепад в канале соплового аппарата, h_{0c}^*	кДж/кг	$h_0^* - h_{1t}$	
Теоретическая абсолютная скорость потока пара на выходе из канала, C_{1t}	м/с	$(2000 \times h_{0c}^*)^{1/2}$	
Действительная абсолютная скорость потока пара на выходе из канала, C_1	м/с	$C_{1t} \times \varphi$	
Потери энергии в каналах соплового аппарата, Δh_c	кДж/кг	$(C_{1t}^2/2000) \times (1 - \varphi^2)$	
Энтальпия пара на выходе из соплового аппарата в конце действительного процесса расширения, h_1	кДж/кг	$h_{1t} + \Delta h_c$	
Удельный объем пара в начале процесса расширения, v_0	м ³ /кг	Определяется по P_0, t_0 (диаграмма $h-s$, программа САТТ2)	
Плотность пара в начале процесса расширения, ρ_0	кг/м ³	$1/v_0$	
Давление пара на входе в межлопаточный канал соплового аппарата по заторможенным параметрам, P_0^*	МПа	$P_0 + \rho_0 \times (C_0^2/2 \cdot 10^6)$	
Удельный объем пара в конце изэнтропного процесса расширения, v_{1t}	м ³ /кг	Определяется по P_1 и энтропии s_0	
Удельный объем пара в конце действительного процесса расширения, v_1	м ³ /кг	Определяется по P_1 и энтропии s_1	
Критическое отношение давлений, $\epsilon_{кр}$	-	$(2/(k+1))^{k/(k-1)}$	
Критическое давление пара в сечении АВ, $P_{1кр}$	МПа	$P_0^* \times \epsilon_{кр}$	

Наименование величины	Единица измерения	Расчетная формула	Результаты расчетов
Предельное отношение давлений, $\epsilon_{пр}$	-	$\epsilon_{кр} \times (\sin \alpha_{1э})^{2\kappa/(\kappa+1)}$	
Предельное значение давления пара в сечении АС, $P_{1пр}$	МПа	$P_0^* \times \epsilon_{пр}$	
Давление пара за косым срезом $P_1 \geq P_{1кр}$	МПа	$\delta = 0,$ определяется l_c	
Давление пара за косым срезом $P_1 < P_{1кр}$	МПа	$\delta \neq 0,$ определяются δ и l_c	
Энтальпия пара в сечении АВ при критическом давлении $P_{1кр}, h_{кр}$	кДж/кг	Определяется по $P_{1кр}$ и энтропии s_0	
Удельный объем пара в сечении АВ при критическом давлении $P_{1кр}, v_{кр}$	м ³ /кг	Определяется по $P_{1кр}$ и энтропии s_0	
Скорость потока пара в сечении АВ при критическом давлении $P_{1кр}, C_{кр}$	м/с	$(2000 \times (h_0^* - h_{кр}))^{1/2}$	
Синус угла выхода потока пара из канала $\alpha_1, \sin \alpha_1$	-	$(C_{кр}/C_{1т}) \times (v_{1т}/v_{кр}) \cdot \sin \alpha_{1э}$	
Угол выхода потока пара из канала, α_1	град.	$\arcsin((C_{кр}/C_{1т}) \times (v_{1т}/v_{кр}) \cdot \sin \alpha_{1э})$	
Угол отклонения потока пара в косом срезе, δ	град.	$\alpha_1 - \alpha_{1э}$	
Давление пара за косым срезом $P_1 = P_{1пр} < P_{1кр}$	МПа	$\delta \neq 0,$ определяются $\delta_{пр}$ и l_c	
Энтальпия пара в сечении АС при предельном давлении $P_{1пр}, h_{1пр}$	кДж/кг	Определяется по $P_{1пр}$ и энтропии s_0	
Удельный объем пара в сечении АС при предельном давлении $P_{1пр}, v_{1пр}$	м ³ /кг	Определяется по $P_{1пр}$ и энтропии s_0	
Теоретическая абсолютная скорость потока пара на выходе из косога среза при давлении $P_{1пр}, C_{1тпр}$	м/с	$(2000 \times (h_0^* - h_{1пр}))^{1/2}$	
Синус предельного угла выхода потока пара из канала соплового аппарата $\alpha_{1пр}, \sin \alpha_{1пр}$	-	$(C_{кр}/C_{1тпр}) \times (v_{1пр}/v_{кр}) \cdot \sin \alpha_{1э}$	
Предельный угол выхода потока пара из канала, $\alpha_{1пр}$	град.	$\arcsin((C_{кр}/C_{1тпр}) \times (v_{1пр}/v_{кр}) \cdot \sin \alpha_{1э})$	

Наименование величины	Единица измерения	Расчетная формула	Результаты расчетов
Предельный угол отклонения потока пара в косом срезе, $\delta_{пр}$	град.	$\alpha_{1пр} - \alpha_{1э}$	
Давление пара за косым срезом $P_1 < P_{1пр} < P_{1кр}$	МПа	$\delta \neq 0$, определяются $\delta_{пр}$ и l_c также, как в случае 3	
Высота (длина) сопловой лопатки, l_c	м (мм)	$G \times v_1 / (C_1 \cdot t_c \cdot \sin \alpha_1)$	

Отчет должен содержать

1. Результаты расчета по определению параметров пара в канале соплового аппарата и угла отклонения потока пара в косом срезе.
2. Графическое изображение в масштабе процесса расширения пара в межлопаточном канале соплового аппарата на диаграмме h-s.
3. Изображение решетки профилей сопловых лопаток в плоскости u-a с показом косого среза, углов $\alpha_{1э}$, α_1 , δ , $\alpha_{1пр}$, $\delta_{пр}$, скоростей $C_{кр}$, $C_{1т}$.

Библиографический список

1. Щинников П.А. Проектирование одноцилиндровой конденсационной турбины [Электронный ресурс]: учебное пособие/ П.А. Щинников - Электрон. текстовые данные. - Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013. - 83 с. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45147>.- ЭБС «IPRbooks».
2. Коновалов П.Н. Нагнетатели и тепловые двигатели. Тепловой расчет паровой многоступенчатой противодавленческой турбины: учебно-методическое пособие к выполнению курсовой работы/ П. Н. Коновалов, А.А. Верхованцев, М.С. Липатов. - СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – 68 с.

**КОНОВАЛОВ ПЕТР НИКОЛАЕВИЧ
ЛИПАТОВ МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ**

НАГНЕТАТЕЛИ И ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАРА В КАНАЛЕ СОПЛОВОГО АППАРАТА И УГЛА ОТКЛОНЕНИЯ ПОТОКА ПАРА В КОСОМ СРЕЗЕ

**Методические указания
к практической работе № 1**

Корректор Т.А. Смирнова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2019 г., поз. 3

Подп. к печати 02.02.2019.

Формат 60x84/16.

Бумага тип. № 1.

Печать офсетная.

Объем 0,75 печ.л; 0,75 уч.-изд.л.

Тираж 150 экз.

Изд. № 3. Цена "С" . Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.