

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**  
**ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**  
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ**

**Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей**

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

**Методические указания**  
**к расчетной работе №1**  
**по дисциплине: «Тепловые двигатели и нагнетатели»**

**Санкт-Петербург**  
**2009**

## 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).

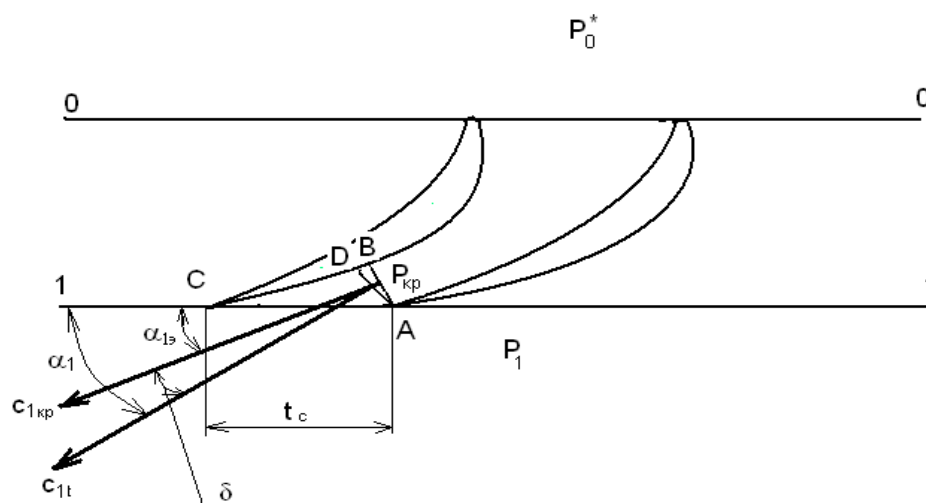


Рис.1. Решетка профилей лопаток соплового аппарата в плоскости u-a:  $P_0^*$  - давление пара на входе в канал;  $P_1$ - давление пара за каналом;  $P_{кр}$ - давление пара в узком сечении канала AB;  $\alpha_{1э}$ - эффективный угол выхода потока пара из канала;  $\alpha_1$ - угол выхода потока пара из канала;  $\delta$ - 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.

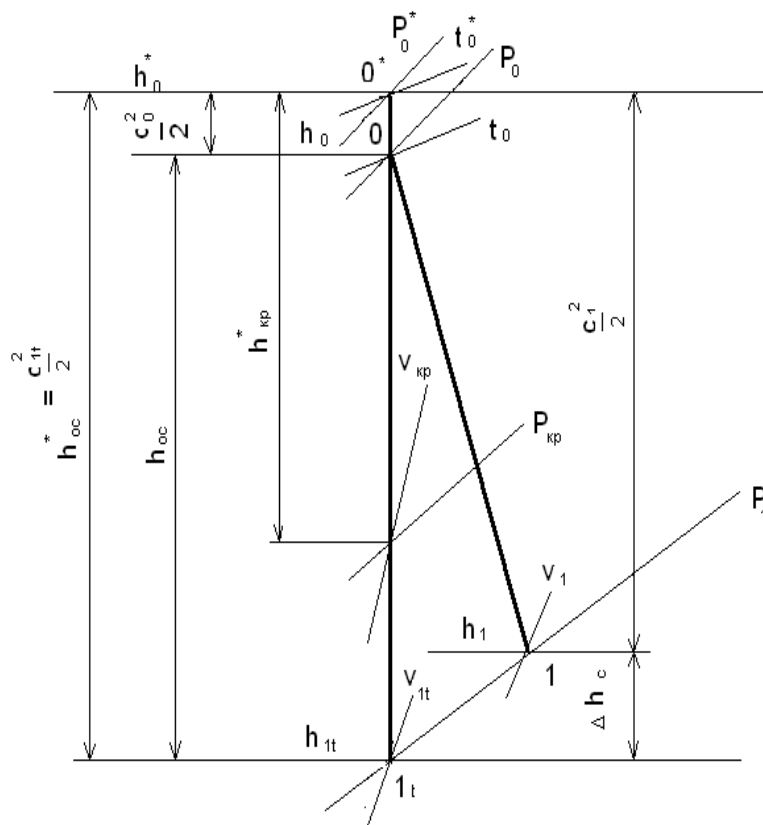


Рис. 2. Процесс расширения пара в канале соплового аппарата

При отсутствии теплообмена с внешней средой и потерь энергии процесс расширения пара в канале соплового аппарата протекает по изоэнтропе 0-1<sub>t</sub>. 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:

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

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:

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

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.  $P_1 = P_{кр}$ ;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{кр}$ ;  $C_1 = C_{кр} = a_{кр}$ . Из уравнения сплошности можно получить критическое отношение давлений:

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

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  $P_1 \geq P_{кр}$  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  $P_{кр}$  и неизменном давлении пара на входе в канал  $P_0$ , при  $P_1$ , равном  $P_{кр}$ ,  $C_1 = C_{кр}$ . В области косого 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  $P_1 < P_{кр}$  и отношение давлений  $\varepsilon_1 < \varepsilon_{кр}$ . Расширение пара в суживающейся части межлопаточного канала будет происходить до давления  $P_{кр}$ , 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  $\alpha_1$ , т.е. угол

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

Угол отклонения потока пара в косом срезе  $\delta$  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  $\mu_1$ - 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;  $\rho_{1t}$ - плотность пара в конце изоэнтропного процесса расширения в сечении АД. Учитывая выше показанные зависимости, синус угла  $\alpha_1$  получают по формуле, которую называют формулой Бэра [1]:

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

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

$$\delta = \alpha_1 - \alpha_{1э}.$$

При уменьшении давления пара  $P_1$  или  $\varepsilon_1$  угол отклонения потока пара в косом срезе  $\delta$  будет тем больше, чем меньше давление  $P_1$  или отношение давлений  $\varepsilon_1$ .

3. Давление пара за косым срезом  $P_1 = P_{1пр} < P_{кр}$  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:

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

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

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

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

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

4. Давление пара за косым срезом  $P_1 < P_{1пр} < P_{кр}$  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  $C_{1u}$  не меняется при указанном

соотношении давлений. Скорость  $C_{1a}$ , 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 –  $\varphi$ .

Значения исходных параметров выдаются преподавателем студентам в соответствии с его вариантом.

### 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)	

Продолжение табл.

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, $\Delta h_c$	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 <sup>3</sup> /кг	Определяется по $P_0, t_0$ (диаграмма $h-s$ , программа САТТ2)	
Плотность пара в начале процесса расширения, $\rho_0$	кг/м <sup>3</sup>	$1/v_0$	
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 изоэнтропного процесса расширения, $v_{1t}$	м <sup>3</sup> /кг	Определяется по $P_1$ и энтропии $s_0$	
Удельный объем пара в конце действительного процесса расширения, $v_1$	м <sup>3</sup> /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, $P_{кр}$	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 $P_1 \geq P_{кр}$	МПа	$\delta = 0$ , определяется $l_c$	
Давление пара за косым срезом $P_1 < P_{кр}$	МПа	$\delta \neq 0$ , определяются $\delta$ и $l_c$	
Энтальпия пара в сечении АВ при критическом давлении $P_{кр}$ , $h_{кр}$	кДж/кг	Определяется по $P_{кр}$ и энтропии $s_0$	
Удельный объем пара в сечении АВ при критическом давлении $P_{кр}$ , $v_{кр}$	м <sup>3</sup> /кг	Определяется по $P_{кр}$ и энтропии $s_0$	
Скорость потока пара в сечении АВ при критическом давлении $P_{кр}$ , $C_{кр}$	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, $\alpha_1$	град.	$\arcsin((C_{кр}/C_{1т}) \times (v_{1т}/v_{кр}) \cdot \sin \alpha_{1э})$	
Угол отклонения потока пара в косом срезе, $\delta$	град.	$\alpha_1 - \alpha_{1э}$	
Давление пара за косым срезом $P_1 = P_{1пр} < P_{кр}$	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 <sup>3</sup> /кг	Определяется по $P_{1пр}$ и энтропии $s_0$	
Теоретическая абсолютная скорость потока пара на выходе из косого 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 соплового аппарата, $\alpha_{1пр}$	град.	$\arcsin((C_{кр}/C_{1тпр}) \times (v_{1пр}/v_{кр}) \cdot \sin \alpha_{1э})$	



Окончание табл.

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 $P_1 < P_{1пр} < P_{кр}$	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 (табл. с.7).
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  $\alpha_{1э}$ ,  $\alpha_1$ ,  $\delta$ ,  $\alpha_{1пр}$ ,  $\delta_{пр}$ , скоростей  $C_1$ ,  $C_{1т}$ .

**Библиографический список**

1. Трубилов М.А., Арсеньев Г.В., Фролов В.В. и др. Паровые и газовые турбины: учебник.- Москва.: Энергоатомиздат, 1985.- 352 с.
2. Никольский Н.И., Луканин П.В. Тепловые двигатели для ЦБП (Теория паровых турбин): учеб. пособие / СПбТИЦБП. СПб., 1992.- 108 с.
3. Луканин П.В., Короткова Т.Ю. Тепловые двигатели для целлюлозно-бумажной промышленности (Теория и конструкция паровых турбин): учеб. пособие / СПбГТУРП. СПб., 2008.- 197 с.