

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

ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

РАСЧЕТ ДВУХВЕНЕЧНОЙ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ СТУПЕНИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Выполнение практических работ

Методические указания для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки
13.03.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

Составители:
В. Г. Злобин
Н. Н. Пилипенко
А. Д. Ширяев
К. О. Кашеев

Санкт-Петербург
2025

Утверждено
на заседании кафедры ТСУиТД
29.01.2025 г., протокол № 4

Рецензент С. Н. Смородин

Методические указания соответствует программам и учебным планам дисциплины «Тепловые двигатели» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

В методических указаниях изложены основы расчета двухвенечной регулирующей ступени паровой турбины. Приведена методика и пример расчета двухвенечной регулирующей ступени паровой турбины. Приводятся справочные данные в таблицах и на графиках, необходимые для расчетов.

Материалы, изложенные в методических указаниях, могут быть использованы для выполнения расчетов двухвенечных ступеней в курсовом проектировании и при выполнении выпускных квалификационных работ.

Методические указания предназначены для бакалавров всех форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве
методических указаний

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 24.02.2025 г. Рег. № 5117/25

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ	4
Раздел 1. Методика расчета двухвенечной регулирующей ступени паровой турбины	5
1.1. Порядок (алгоритм) расчета двухвенечной регулирующей ступени	6
Раздел 2. Пример расчета двухвенечной регулирующей ступени	11
Раздел 3. Порядок оформления отчета по практическому занятию	17
Раздел 4. Вопросы для подготовки к экзамену (зачету) по курсу «Тепловые двигатели»	22
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	23

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Целью расчета двухвенечной регулирующей ступени паровой турбины является отработка навыков практических расчетов и формирование необходимых компетенций по проектированию паровых турбин. При выполнении практического задания необходимо, ориентируясь на исходные данные и навыки, полученные при выполнении расчетно-графической работы по одновенечной ступени в дисциплине «Тепловые двигатели» на тему «Расчет промежуточной ступени многоступенчатой паровой турбины», выбрать вариант исходных данных и произвести расчеты:

- 1) располагаемых теплоперепадов в решетках ступени по принятым значениям степени реактивности;
- 2) по этим теплоперепадам с помощью h, s -диаграммы определить давления за решетками;
- 3) подобрать профили сопловых, направляющих и рабочих решеток первого и второго ряда;
- 4) построить треугольники скоростей и определить геометрические и аэродинамические характеристики этих решеток, найти относительные лопаточный и внутренний КПД, после чего вычислить использованный теплоперепад ступени H_i и внутреннюю мощность ступени N_i .

В объем практического задания входит расчетно-пояснительная записка и графический материал. В качестве графического материала выполняются треугольники скоростей и проточная часть двухвенечной ступени.

Расчетно-пояснительная записка к практическому заданию должна включать введение, исходные данные, таблицы с расчетными формулами и результатами расчетов, выводы по результатам расчетов, библиографический список. При выполнении расчетов студенты должны пользоваться Международной системой единиц СИ.

При подготовке к защите отчета по практическому заданию необходимо использовать вопросы для подготовки к экзамену (зачету) (см. Раздел 4).

РАЗДЕЛ 1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДВУХВЕНЕЧНОЙ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ СТУПЕНИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Задача определения размеров сопловых и рабочих лопаток для двухвенечных ступеней паровых турбин состоит из двух взаимосвязанных подзадач. При решении первой подзадачи определяются основные размеры сопловых и рабочих лопаток, при решении второй определяются относительные КПД ступени, ее мощности и усилия, действующие на рабочие лопатки. Решение этих подзадач должно быть подчинено требованиям высокой надежности и экономичности ступени с учетом затрат при ее изготовлении.

Размеры сопловых и рабочих лопаток турбинных ступеней определяют одновременно с расчетом и построением треугольников скоростей. Ступень рассчитывают по следующим исходным данным: расходу пара через ступень, параметрам пара перед ступенью, давлению за ступенью. Кроме этих данных из предварительного распределения теплоперепадов по ступеням многоступенчатой турбины известны приближенные значения отношения скоростей u/c_ϕ , средний диаметр ступени d и степень реактивности ρ .

При расчете размеров сопловой решетки при дозвуковых скоростях на выходе из этой решетки основными расчетными размерами являются площадь горловых сечений F_1 , высота лопаток l_1 и степень парциальности e .

Для регулируемых ступеней при сопловом парораспределении приходится вводить парциальный впуск пара, так как в этой ступени конструктивно невозможно обеспечить подвод пара по всей окружности.

Прежде чем определять основные размеры рабочей решетки, необходимо построить треугольник скоростей на входе в рабочие лопатки, найти относительную скорость w_1 и угол β_1 . Для построения треугольника скоростей определяют скорость $c_1 = \varphi c_{1t}$ и принимают при дозвуковых скоростях $a_1 \approx a_{13}$.

Размеры рабочих лопаток так же, как и сопловых, определяют с использованием уравнения расхода (неразрывности), записанного для горловых сечений каналов рабочей решетки. Для двухвенечной ступени скорости размеры направляющей и рабочей решетки второго ряда рассчитывают аналогично рабочей решетке одновенечной ступени.

Как для двухвенечной, так и для одновенечной ступени возможны случаи, когда поток на выходе из сопловых, а иногда и из рабочих решеток сверхзвуковой. При больших сверхзвуковых скоростях на выходе из сопловых решеток, как правило, применяют решетки с расширяющимися каналами (сопла Лавалю). В соплах с расширяющимися каналами расчетными являются площадь минимального сечения $F_{\min}$ и выходная площадь сопловой решетки F_1 .

В минимальном сечении, как известно, устанавливаются критические параметры, которые можно определить с помощью h , s -диаграммы, предварительно вычислив критическое давление $p_{1кр} = \varepsilon_{кр} \bar{p}_0$. Сверхзвуковые скорости можно получать в суживающихся решетках при отклонении потока в косом срезе.

Суживающиеся сопла при небольших сверхзвуковых скоростях на выходе из косого среза при соответствующем профилировании спинки лопатки имеют небольшие потери энергии при переменных режимах работы.

По выбранным характеристикам решетки профилей вычерчиванием проверяют форму межлопаточного канала, в котором при дозвуковых скоростях должны отсутствовать диффузорные участки и, кроме того, участки большой кривизны на спинке профиля не должны располагаться в зоне косого среза решетки. Для окончательного формирования решетки необходимо определить число профилей в решетке.

При определении относительного лопаточного КПД вычисляют основные потери энергии в двухвенечной ступени: в сопловых лопатках, в рабочих лопатках первого ряда, направляющих лопатках и в рабочих лопатках второго ряда. Кроме перечисленных, в ступени возникают так называемые дополнительные потери: от трения диска и лопаточного бандажа; потери, связанные с парциальным подводом пара в ступени; потери от протечек пара через зазоры. Для вычисления полезной мощности ступени N_i необходимо учитывать эти дополнительные потери.

1.1. Порядок (алгоритм) расчета двухвенечной регулирующей ступени

Требуется рассчитать двухвенечную регулирующую ступень по следующим исходным данным (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Давление перед соплами ступени	$p_0 = 12,0$ МПа
Температура пара перед ступенью	$t_0 = 540$ °С
Располагаемый теплоперепад ступени	$H_0 = 164,5$ кДж/кг
Расход пара	$G = 57$ кг/с
Частота вращения	$n = 50$ 1/с
Эквивалентный зазор в уплотнении по бандажу	$\delta_{\text{э}} = 0,6$ мм
Средний диаметр ступени	$d = 0,95$ м

Пример и результаты расчета ступени представлены во 2 разделе.

Исходные данные расчета: теплоперепад и средний диаметр ступени выбраны исходя из конструктивных соображений и вариантных проработок турбины, при этом использована зависимость:

$$H_0 = \frac{1}{2} \frac{(\pi d n)^2}{(u/c_{\text{ф}})^2},$$

где отношение скоростей $\frac{u}{c_{\text{ф}}}$ принято равным 0,26.

Располагаемые теплоперепады в решетках ступени определены по принятым значениям степени реактивности в рабочей решетке первого ряда, направляющей и рабочей решетках второго ряда соответственно:

$\rho = 0,02$, $\rho_n = 0,04$ и $\rho' = 0,04$ (строка 8 в таблице 2.1):

$$H_{oc} = (1 - \rho - \rho_n - \rho')H_0 = 148,05 \text{ кДж/кг};$$

$$H_{op} = \rho H_0 = 3,29 \text{ кДж/кг};$$

$$H_{он} = \rho_n H_0 = 6,58 \text{ кДж/кг};$$

$$H'_{op} = \rho' H_0 = 6,58 \text{ кДж/кг}.$$

По этим теплоспадам с помощью h , s -диаграммы (см. рисунок 2.3) определены давления:

1) за сопловой решеткой $p_1 = 7,4$ МПа;

2) за рабочей решеткой первого ряда $p_2 = 7,32$ МПа;

3) за направляющей решеткой $p'_1 = 7,16$ МПа;

4) за рабочей решеткой второго ряда $p'_2 = 7,00$ МПа.

Теоретическая скорость на выходе из сопловой решетки:

$$c_{1t} = \sqrt{2H_{oc}} = 543 \text{ м/с}.$$

Удельный объем за сопловой решеткой из h , s -диаграммы (см. рисунок 2.3):

$$v_{1t} = 0,0415 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Число $M_{1t} = c_{1t}/a_1$ определено по отношению давлений $\varepsilon_1 = p_1/p_0 = 0,617$ с помощью таблиц газодинамических функций для перегретого пара:

$$M_{1t} = 0,89.$$

Так как режим течения в сопловой решетке дозвуковой, проходная площадь ее горловых сечений определена с использованием обобщенных зависимостей (см. рисунок 2.1):

$$F_1 = \frac{G}{\mu_1} \frac{v_{1t}}{c_{1t}} = 0,00446 \text{ м}^2.$$

Принят угол выхода потока из сопловой решетки $\alpha_1 = 12^\circ$.

По этому углу и числу $M_{1t} = 0,89$ из атласа профилей выбран профиль сопловой решетки С-90-12Б, рассчитанный на околосвуковые скорости (таблица 2.2):

$$M_{1t} = 0,85 \div 1,15.$$

Далее определено произведение el_1 :

$$el_1 = \frac{F_1}{\pi d \sin \alpha_1} = 0,00718 \text{ м}.$$

Оценена оптимальная степень парциальности по формуле:

$$e_{opt} = (0,29 \div 0,34) \sqrt{el_1} = 0,266.$$

Высота сопловых лопаток:

$$l_1 = el_1/e_{opt} = 27 \text{ мм}.$$

Хорда профиля сопловой решетки выбрана по условиям прочности:

$$b_1 = 50 \text{ мм}.$$

Число сопловых каналов:

$$z_1 = \pi de/(b_1 \bar{t}) = 20,$$

где относительный шаг $\bar{t}$ принят близким к оптимальному по характеристикам решетки С-90-12Б из атласа профилей (таблица 2.2):

$$\bar{t} = 0,794.$$

По $\bar{t}$ и $a_1 \approx a_{13}$ также с помощью атласа найден угол установки профиля в решетке:

$$a_y = 32^{\circ}35'.$$

Коэффициент скорости сопловой решетки определен по обобщенным кривым (см. рисунок 2.2):

$$\varphi = 0,965.$$

Уточнение значения коэффициента скорости при необходимости можно произвести с помощью атласа профилей по коэффициентам потерь энергии профиля С-90-12Б.

Далее построен треугольник скоростей на входе в рабочую решетку. Отложен вектор скорости на выходе из сопловой решетки:

$$c_1 = \varphi c_{1t} = 524 \text{ м/с},$$

под углом $a_1 = 12^{\circ}$ к направлению окружной скорости:

$$u = \pi d n = 149 \text{ м/с (см. рисунок 2.4).}$$

Из этого треугольника относительная скорость на входе в рабочую решетку первого ряда $w_1 = 381 \text{ м/с}$ и угол направления этой скорости $\beta_1 = 17^{\circ}40'$, который определен по тангенсу, а тангенс, в свою очередь, рассчитан по формуле:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\sin a_1}{\cos a_1 - \frac{u}{c_1}}.$$

Далее определены характеристики рабочей решетки. Вначале на h, s -диаграмме отложены потери энергии в сопловой решетке:

$$\Delta H_c = (1 - \varphi^2) H_{oc} = 10,36 \text{ кДж/кг}.$$

Там же найден удельный объем за рабочей решеткой:

$$v_{2t} = 0,0425 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретическая относительная скорость на выходе из рабочей решетки первого ряда:

$$w_{2t} = \sqrt{2H_{op} + w_1^2} = 391 \text{ м/с}.$$

Число $M_{2t} = \frac{w_{2t}}{a_2} \approx M_{1t} = \frac{w_{2t}}{c_{1t}} = 0,64$, так как $a_2 \approx a_1$.

Проходная площадь горловых сечений рабочей решетки первого ряда:

$$F_2 = \frac{G}{\mu_2} \frac{v_{2t}}{w_{2t}} = 0,0067 \text{ м}^2.$$

Принята перекрыша рабочих лопаток первого ряда $\Delta = 3,0 \text{ мм}$.

Тогда высота рабочих лопаток $l_2 = l_1 + \Delta = 30 \text{ мм}$ и угол выхода потока:

$$\beta_2 = \arcsin \left[\frac{F_2}{\pi d l_2} \right] = 16^{\circ}15'.$$

По углу β_2 и числу M_{2t} выбран по атласу (таблица 2.2) профиль рабочей решетки первого ряда Р-23-14А. Хорда профиля принята $b_2 = 50 \text{ мм}$, относительный шаг $\bar{t}_2 = 0,65$.

Число лопаток в рабочей решетке первого ряда по всей окружности рабочего колеса:

$$z_2 = \frac{\pi d}{b_2 \bar{t}_2} = 92.$$

Далее построен треугольник скоростей на выходе из рабочей решетки первого ряда. Отложен вектор $w_2 = \psi w_{2t} = 364$ м/с под углом $\beta_2 = 16^\circ 15'$ к направлению, противоположному окружной скорости u (см. рисунок 2.4).

Из этого треугольника вектор скорости $c_2 = 225$ м/с и угол $\alpha_2 = 27^\circ$.

Для определения характеристик направляющей решетки продолжается построение процесса в h, s -диаграмме.

Отложены потери энергии в рабочей решетке первого ряда:

$$\Delta H_p = (1 - \psi^2) \frac{w_{2t}^2}{2} = 10,30 \text{ кДж/кг.}$$

Удельный объем на выходе из направляющей решетки:

$$v'_{1t} = 0,0438 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретическая скорость на выходе из направляющей решетки:

$$c'_{1t} = \sqrt{2H_{\text{он}} + c_2^2} = 252,5 \text{ м/с.}$$

Число $M'_{1t} = \frac{c'_{1t}}{a'_1} \approx M_{1t} = \frac{c_{1t}}{c_{1t}} = 0,414$.

Проходная площадь горловых сечений направляющей решетки:

$$F_H = \frac{G}{\mu_H} \frac{v'_{1t}}{c'_{1t}} = 0,01045 \text{ м}^2.$$

Принимая перекрышу направляющих лопаток $\Delta = 3,5$ мм, определена высота направляющих лопаток:

$$l'_1 = l_2 + \Delta = 33,5 \text{ мм.}$$

Угол выхода потока из направляющей решетки:

$$\alpha'_1 = \arcsin \left[\frac{F_H}{\pi d l'_1} \right] = 23^\circ 10'.$$

По углу α'_1 и числу M'_{1t} выбран по атласу (таблица 2.2) профиль направляющей лопатки Р-30-21А.

Хорда профиля направляющей лопатки принята равной 40 мм, относительный шаг $\bar{t}'_1 = 0,637$.

Число каналов направляющей решетки:

$$z_H = \frac{\pi d}{b'_1} \frac{e}{\bar{t}'_1} = 31.$$

Учитывая растекание потока за рабочей решеткой, а также изменение расположения струи пара за рабочими лопатками при изменении отношения скоростей u/c_ϕ в переменных режимах работы, принято число каналов направляющей решетки увеличенным на два по сравнению с расчетным, т. е.:

$$z_H = 33.$$

Построение треугольников скорости на входе и выходе из рабочей решетки второго ряда, а также определение геометрических и аэродинамических характеристик этой решетки проведено аналогично рабочей решетке первого ряда. Все необходимые расчетные данные для этой решетки представлены в таблице 2.1 и на рисунке 2.4. Проточная часть рассчитанной ступени с основными размерами решеток приведена на рисунке 2.5.

Относительный лопаточный КПД $\eta_{o.l}$ рассчитан двумя способами:

1) по балансу потерь:

$$\eta_{o.l} = \frac{H_0 - \Delta H_c - \Delta H_p - \Delta H_n - \Delta H_p' - \Delta H_{в.с}}{H_0} = 0,822,$$

где $\Delta H_c = (1 - \varphi^2) \frac{c_{1t}^2}{2};$

$$\Delta H_p = (1 - \psi^2) \frac{w_{2t}^2}{2};$$

$$\Delta H_n = (1 - \varphi_n^2) \frac{c_n'^2}{2};$$

$$\Delta H_{вс} = \frac{c_2'^2}{2}.$$

2) с использованием проекций скоростей из треугольников:

$$\eta_{o.l} = \frac{u[(c_1 \cos a_1 + c_2 \cos a_2) + (c_1' \cos a_1' + c_2' \cos a_2')]}{H_0} = 0,825.$$

Оба значения КПД в пределах точности расчета совпадают.

Потери трения диска:

$$\xi_T = \frac{k_{тр} d (u/c_\phi)^3}{\pi e l_1 \sin a_1} = 0,02.$$

Потери от утечек в уплотнениях бандажа рабочей решетки первого ряда:

$$\xi_y^\delta = \frac{\pi d_\Pi \delta_\Delta}{F_1} \sqrt{\rho + 1,8 \frac{l}{d}} \eta_{o.l} = 0,092.$$

Эти потери приближенно равны потерям от утечек в уплотнениях трех решеток: первой рабочей, направляющей и второй рабочей.

Составляющие потерь от парциальности:

1) от вентиляции:

$$\xi_B = \frac{k_B (1 - e - 0,5 e_{кож})}{e \sin a_1} \left(\frac{u}{c_\phi} \right)^3 = 0,0181.$$

2) сегментные:

$$\xi_{сегм} = 0,25 \frac{B_2 l_2 + 0,6 B_2' l_2'}{F_1} \frac{u}{c_\phi} \eta_{o.l} i = 0,063.$$

В этих формулах принято часть дуги, занятая противовентиляционным кожухом, $e_{кож} = 0,6$ и число пар концов сопловых сегментов $i = 2$.

Относительный внутренний КПД ступени:

$$\eta_{oi} = \eta_{o.l} - \xi_T - \xi_y^\delta - \xi_\Pi = 0,632.$$

Использованный теплоперепад ступени:

$$H_i = H_0 \eta_{oi} = 104 \text{ кДж/кг.}$$

Внутренняя мощность ступени:

$$N_i = G H_i = 5930 \text{ кВт.}$$

РАЗДЕЛ 2. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДВУХВЕНЕЧНОЙ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ СТУПЕНИ

Таблица 2.1 – Результаты расчета двухвенечной ступени

№ п/п	Показатель	Решетки				Прим.
		Сопловая	Первая рабочая	Направляющая	Вторая рабочая	
1	Расход G , кг/с	57,0				-
2	Начальное давление p_0 , МПа	12,0				-
3	Начальная температура t_0 , °C	540				-
4	Средний диаметр d , м	0,95				-
5	Частота вращения n , 1/с	50				-
6	Окружная скорость u , м/с	149				-
7	Отношение скоростей u/c_ϕ	0,26				-
8	Располагаемый теплоперепад ступени H_0 , кДж/кг	164,5				-
9	Эквивалентный зазор в уплотнении по бандажу δ_3 , мм	0,6				-
10	Степень реактивности ρ	-	0,02	0,04	0,04	Принято по оценке
11	Располагаемые теплоперепады решеток $H_{0c}, H_{0p}, H_{0н}, H'_{0p}$, кДж/кг	148,05	3,29	6,58	6,58	-
12	Давления за решетками p_1, p_2, p'_1, p'_2 , МПа	7,4	7,32	7,16	7,00	По h, s – диаграмме
13	Теоретические скорости выхода $c_{1t}, w_{2t}, c'_{1t}, w'_{2t}$, м/с	543	391	252,5	165,5	-
14	Удельные объемы пара за решеткой $v_{1t}, v_{2t}, v'_{1t}, v'_{2t}$, м³/кг	0,0415	0,0425	0,438	0,0446	По h, s – диаграмме
15	Число M	0,89	0,64	0,414	0,271	-
16	Коэффициент расхода μ	0,975	0,925	0,945	0,955	По рис. 2.1
17	Выходные площади F_1, F_2, F_n, F'_2 , 10³ м²	4,46	6,70	10,45	16,02	-
18	Эффективные углы выхода $\alpha_{1з}, \beta_{2з}, \alpha'_{1з}, \beta'_{2з}$, град	12°	16°15'	23°10'	33°10'	-
19	Углы входа $\alpha_0, \beta_1, \alpha_2, \beta'_1$, град	90°	17°40'	27°	53°45'	-
20	Профили в решетке	С-90-12Б	Р-23- 14А	Р-30-21А	Р-46- 29А	Выбраны по атласу профилей, таблица 2.2

Окончание табл. 2.1

№ п/п	Показатель	Решетки				Прим.
		Сопловая	Первая рабочая	Направля- ющая	Вторая рабочая	
21	Степень парциальности ϵ	0,266				-
22	Выходная высота лопаток $l_1, l_2, l_n, l_2', 10^{-3} \text{ м}$	27	30	33,5	37	-
23	Хорды профиля $b_1, b_2, b_n, b_2', 10^3 \text{ м}$	50	50	40	50	Принято по условиям прочности
24	Относительные шаги $\bar{t}_1, \bar{t}_2, \bar{t}_n, \bar{t}_2'$	0,794	0,65	0,637	0,542	-
25	Число лопаток z_1, z_2, z_n, z_2'	20	92	33	110	20 сопловых каналов
26	Коэффициенты скорости $\varphi, \psi, \varphi_n, \psi'$	0,965	0,931	0,941	0,951	По рис. 2.2
27	Скорости выхода потока $c_1, w_2, c_1', w_2', \text{ м/с}$	524	364	237	157	-
28	Скорости входа в решетку $c_0, w_1, c_2, w_1', \text{ м/с}$	0	381	225	120	-
29	Потери энергии в решетке $\Delta H_c, \Delta H_p, \Delta H_n, \Delta H_p',$ кДж/кг	10,36	10,30	3,66	1,32	-
30	Потери с выходной скоростью $\Delta H_{вс}, \text{ кДж/кг}$	3,81				-
31	Относительный лопаточный КПД $\eta_{ол}$	0,822				-
32	Потери на трение диска ξ_t	0,02				-
33	Потери от утечек ξ_{γ}^{δ}	0,092				-
34	Потери от парциальности $\xi_{\pi} = \xi_{\pi} + \xi_{\text{сегм}}$	0,018 + 0,063 = 0,081				-
35	Относительный внутренний КПД η_{oi}	0,632				-
36	Использованный теплоперепад ступени $H_i, \text{ кДж/кг}$	104				-
37	Внутренняя мощность ступени $N_i, \text{ кВт}$	5930				-

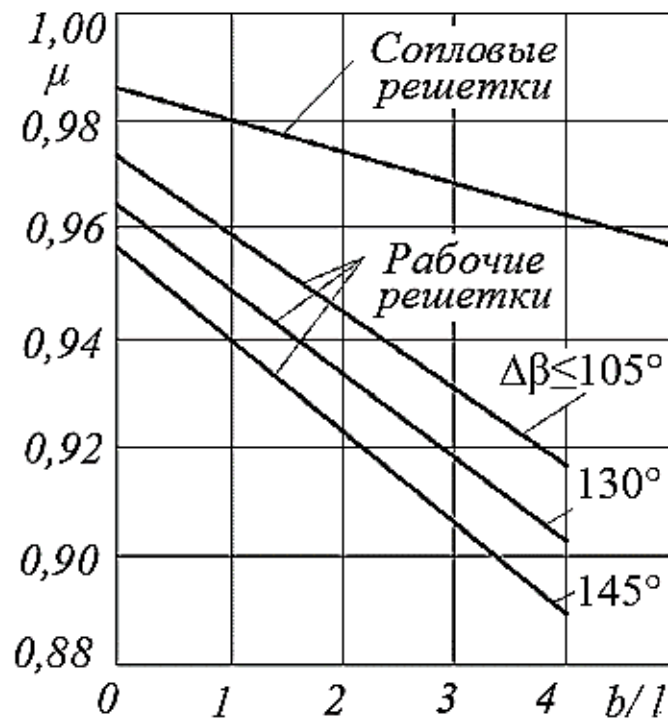


Рисунок 2.1 – Коэффициенты расхода для сопловых и рабочих решеток в зависимости от b/l и угла поворота потока в решетке

$\Delta\beta = 180 - (\beta_1 + \beta_2)$ перегретого пара.

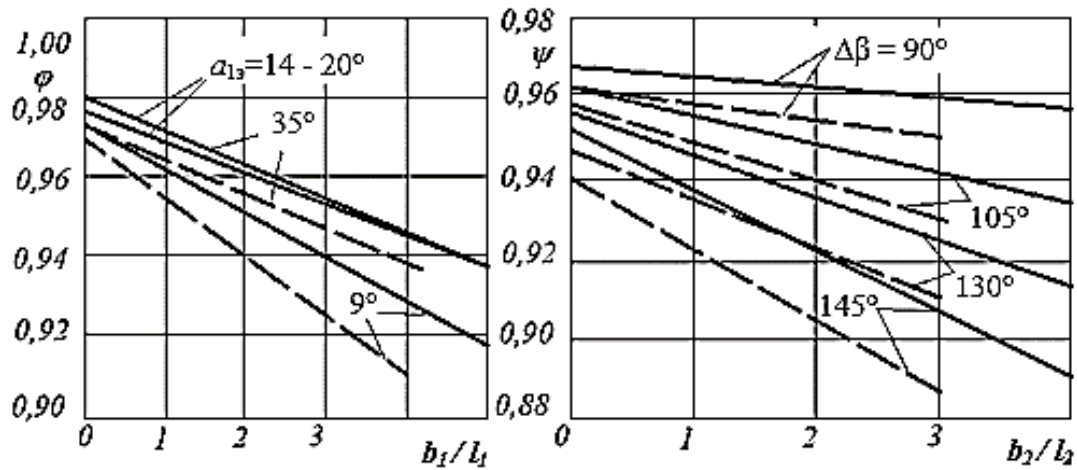


Рисунок 2.2 – Коэффициенты скорости для сопловых и рабочих решеток в зависимости от b/l и угла поворота потока в решетке

$\Delta\beta = 180 - (\beta_1 + \beta_2)$ (или от угла α_{13}): $d/l_1 > 10$; $d/l_1 < 4$.

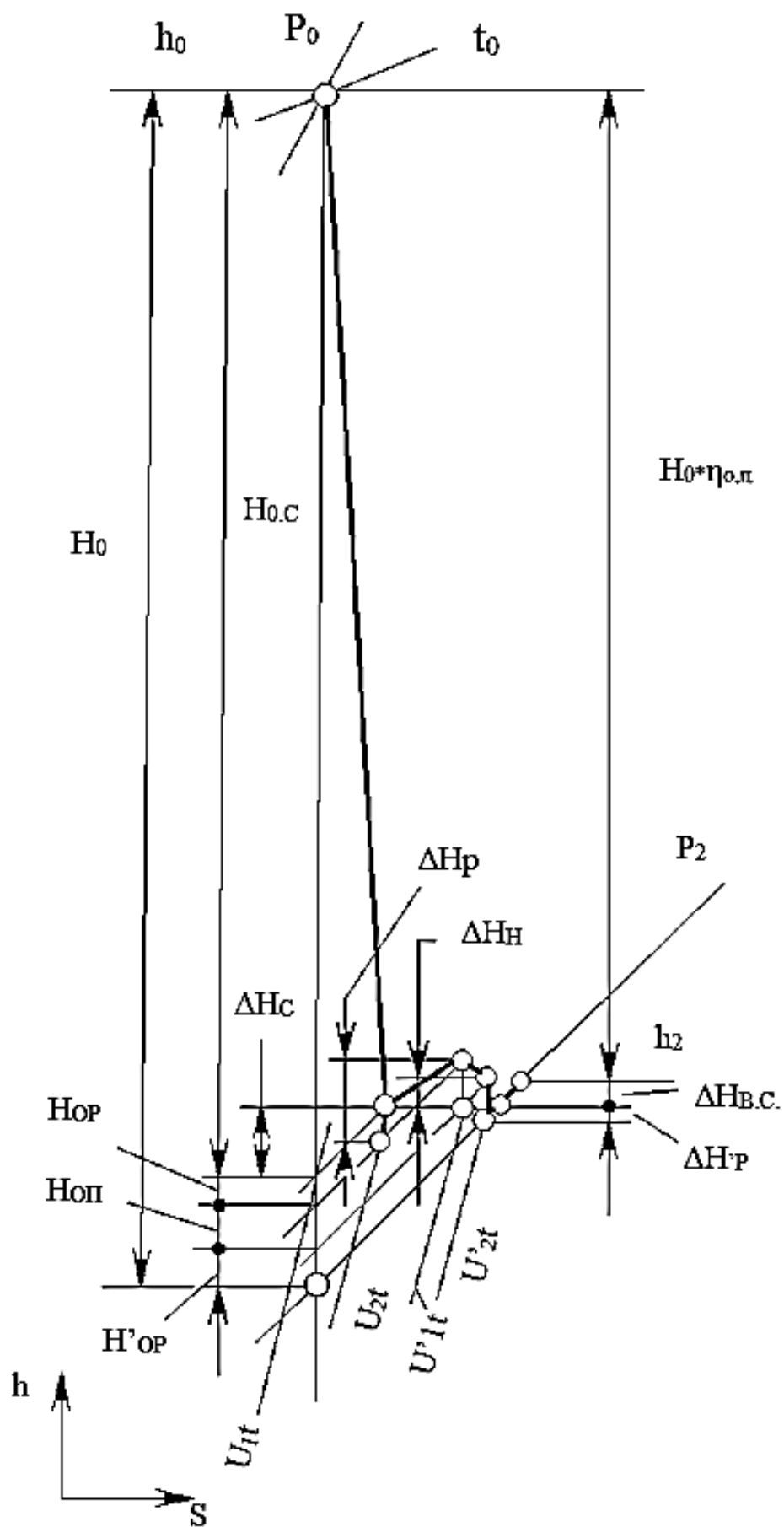


Рисунок 2.3 – Тепловой процесс для двухвечной ступени

Таблица 2.2 – Геометрические характеристики профилей сопловых и рабочих решеток (атлас МЭИ)

Обозначение профиля	$\alpha_{1э}, \beta_{2э},$ град	$\alpha_0^{расч}, \beta_1^{расч},$ град	$\overline{t_{опт}}$	$M_{1т}^{опт}, M_{2т}^{опт}$	$b_1,$ см	$f_1,$ см ²	$I_{мин},$ см ⁴	$W_{мин},$ см ³
С 90-09А	8 – 11	70 – 120	0,72 – 0,85	До 0,90	6,06	3,45	0,416	0,471
С 90-12А	10 – 14	70 – 120	0,72 – 0,87	До 0,85	5,254	4,09	0,591	0,575
С 90-15А	13 – 17	70 – 120	0,70 – 0,85	До 0,85	5,15	3,30	0,360	0,450
С 90-18А	16 – 20	70 – 120	0,70 – 0,80	До 0,85	4,71	2,72	0,243	0,333
С 90-22А	20 – 24	70 – 120	0,70 – 0,80	До 0,90	4,50	2,35	0,167	0,265
С 90-27А	24 – 30	70 – 120	0,65 – 0,75	До 0,90	4,50	2,03	0,116	0,195
С 90-33А	30 – 36	70 – 120	0,62 – 0,75	До 0,90	4,50	1,84	0,090	0,163
С 90-38А	35 – 42	70 – 120	0,60 – 0,73	До 0,90	4,50	1,75	0,081	0,141
С 55-15А	12 – 18	45 – 75	0,72 – 0,87	До 0,90	4,50	4,41	1,195	0,912
С 55-20А	17 – 23	45 – 75	0,70 – 0,85	До 0,90	4,15	2,15	0,273	0,275
С 45-25А	21 – 28	35 – 65	0,60 – 0,75	До 0,90	4,58	3,30	0,703	0,536
С 60-30А	27 – 34	45 – 85	0,52 – 0,70	До 0,90	3,46	1,49	0,118	0,154
С 65-20А	17 – 23	45 – 85	0,60 – 0,70	До 0,90	4,50	2,26	0,338	0,348
С 70-25А	22 – 28	55 – 90	0,50 – 0,67	До 0,90	4,50	1,89	0,242	0,235
С 90-12Б	10 – 14	70 – 120	0,72 – 0,87	0,85 – 1,15	5,66	3,31	0,388	0,420
С 90-15Б	13 – 17	70 – 120	0,70 – 0,85	0,85 – 1,15	5,20	3,21	0,326	0,413
С 90-12Р	10 – 14	70 – 120	0,58 – 0,68	1,40 – 1,80	4,09	2,30	0,237	0,324
С 90-15Р	13 – 17	70 – 120	0,55 – 0,65	1,40 – 1,70	4,20	2,00	0,153	0,238
Р 23-14А	12 – 16	20 – 30	0,60 – 0,75	До 0,95	2,59	2,44	0,430	0,390
Р 26-17А	15 – 19	23 – 35	0,60 – 0,70	До 0,95	2,57	2,07	0,215	0,225
Р 30-21А	19 – 24	25 – 40	0,58 – 0,68	До 0,90	2,56	1,85	0,205	0,234
Р 35-25А	22 – 28	30 – 50	0,55 – 0,65	До 0,85	2,54	1,62	0,131	0,168
Р 46-29А	25 – 32	44 – 60	0,45 – 0,58	До 0,85	2,56	1,22	0,071	0,112
Р 60-33А	30 – 36	47 – 65	0,43 – 0,55	До 0,85	2,56	1,02	0,044	0,079
Р 60-38А	35 – 42	55 – 75	0,41 – 0,51	До 0,85	2,61	0,76	0,018	0,035
Р 23-14Ак	12 – 16	20 – 30	0,60 – 0,75	До 0,95	2,59	2,35	0,387	0,331
Р 26-17Ак	15 – 19	23 – 45	0,60 – 0,70	До 0,95	2,57	1,81	0,152	0,165
Р 27-17Б	15 – 19	23 – 45	0,57 – 0,65	0,80 – 1,15	2,54	2,06	0,296	0,296
Р 27-17Бк	15 – 19	23 – 45	0,57 – 0,68	0,85 – 1,15	2,54	1,79	0,216	0,216
Р 30-21Б	19 – 24	23 – 40	0,55 – 0,65	0,85 – 1,10	2,01	1,11	0,073	0,101
Р 35-25Б	22 – 28	30 – 50	0,55 – 0,65	0,85 – 1,10	2,52	1,51	0,126	0,159
Р 21-18Р	16 – 20	19 – 24	0,60 – 0,70	1,30 – 1,60	2,00	1,16	0,118	0,142
Р 25-22Р	20 – 24	23 – 27	0,54 – 0,67	1,35 – 1,60	2,00	0,99	0,084	0,100

Примечание. В столбце $M_{1т}^{опт}, M_{2т}^{опт}$ указан диапазон чисел M на выходе из решетки, для которого рассчитаны профили.

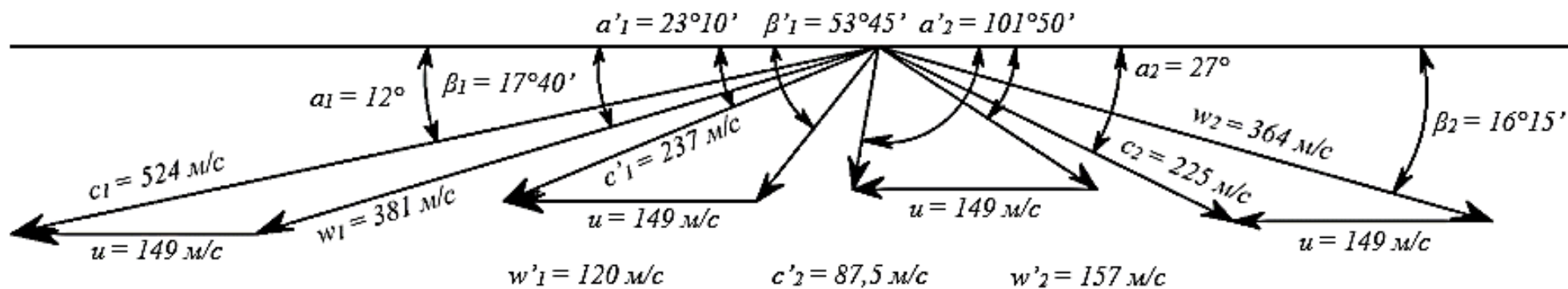


Рисунок 2.4 – Треугольники скоростей двухвенечной ступени

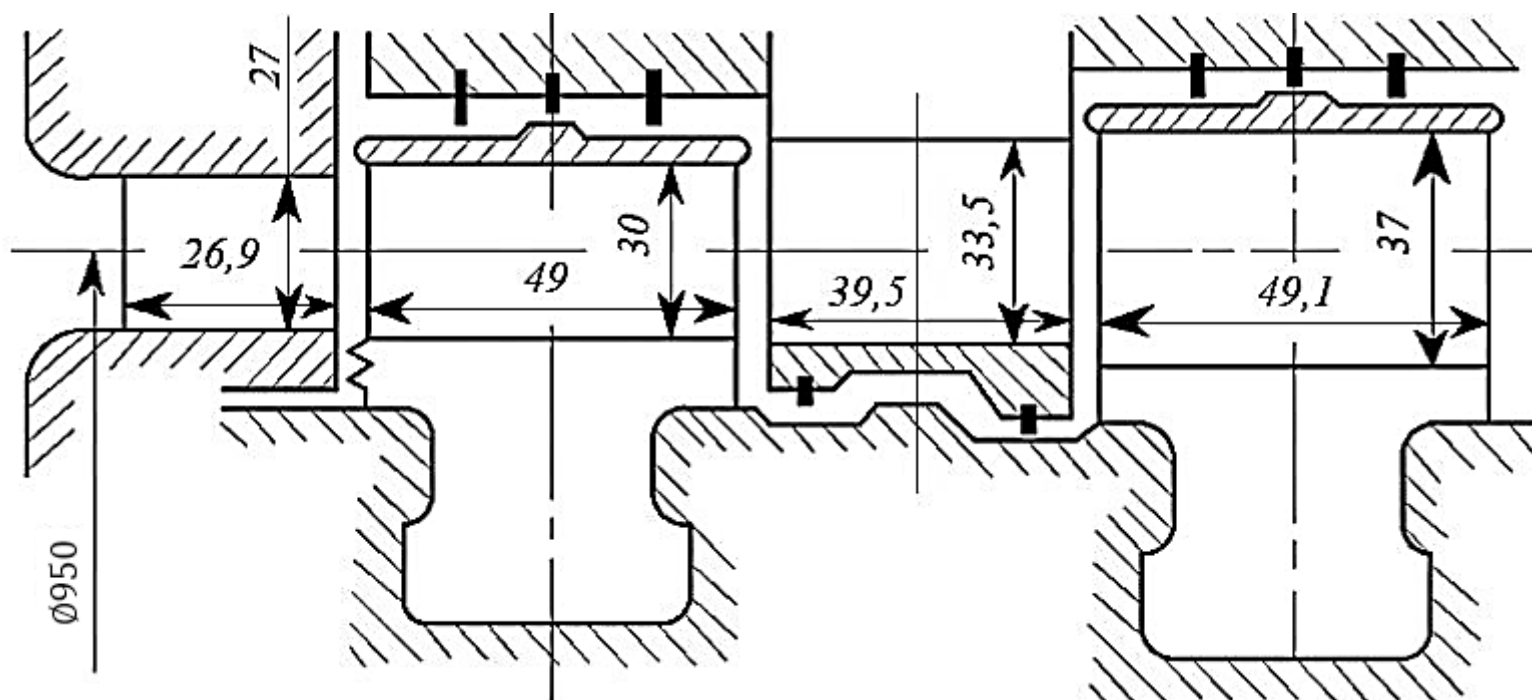


Рисунок 2.5 – Проточная часть рассчитанной регулирующей ступени

РАЗДЕЛ 3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ

Общие требования к оформлению отчета по практическому занятию

Шрифт Times New Roman, обычный, цвет черный, размер 14 пт. Выравнивание текста по ширине. Межстрочный интервал полуторный (допускается одинарный). Красная строка (абзацный отступ) 1,25 см. Отступы и интервалы в тексте 0 см. Размеры полей: левое 3,0 см, правое 1,5 см, верхнее и нижнее 2,0 см. Номера страниц арабскими цифрами, внизу по центру тем же шрифтом и размером, что и основной текст.

Титульный лист включают в общую нумерацию страниц. Номер страницы на титульном листе не проставляют.

Оформление содержания

При оформлении содержания структурные элементы «СОДЕРЖАНИЕ», «ВВЕДЕНИЕ», «ЗАКЛЮЧЕНИЕ», «БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК», «ПРИЛОЖЕНИЯ» (или «ПРИЛОЖЕНИЕ А», «ПРИЛОЖЕНИЕ Б» и т.д.) пишутся прописными (заглавными буквами).

Каждую запись содержания оформляют как отдельный абзац, выровненный по левому краю. Номера страниц указывают выровненными по правому краю поля и соединяют с наименованием структурного элемента работы посредством отточия.

Пример оформления содержания:

1. НАЗВАНИЕ РАЗДЕЛА	10
1.1. Подраздел	11
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	15
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	20

Оформление заголовков разделов и подразделов

Заголовки разделов пишутся с абзацным отступом (как и основной текст), в конце текста заголовка точки не ставятся. Для выделения заголовков первого уровня используется полужирный шрифт.

Заголовки первого уровня выполняются прописными буквами и выравниваются по центру страницы. Заголовки второго уровня выполняются строчными буквами и выравниваются по центру страницы. Заголовки третьего и последующих уровней выполняются строчными буквами с абзаца. До и после заголовка и подзаголовка оставляется одна пустая строка.

Заголовки первого уровня и разделы: «СОДЕРЖАНИЕ», «ВВЕДЕНИЕ», «ЗАКЛЮЧЕНИЕ», «БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК», «ПРИЛОЖЕНИЯ» всегда начинаются с новой страницы.

Пример оформления заголовков:

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТА

1.1. Анализ предметной области

1.1.1. Необходимость web-сайта для компании

Оформление перечислений (списков)

Перед позицией перечисления следует ставить двоеточие или, если есть необходимость, делать в тексте документа ссылки на одно из перечислений. Списки маркируются арабскими цифрами со скобками, начиная с «1».

Не допускается использование данной точки «•».

Пример оформления маркированного списка:

Можно выделить следующие задачи, которые должен разрешить сайт:

- 1) облегчение получения пользователем информации;
- 2) повышение скорости обратной связи;
- 3) облегчение поиска пользователем организации на карте.

Пример оформления сложного нумерованного списка:

Разрабатываемое сверхмощное устройство можно будет применить в различных отраслях реального сектора экономики:

а) в машиностроении:

- 1) для очистки отливок от формовочной смеси;
- 2) для холодной штамповки из листа.

б) в ремонте техники:

- 1) устранение наслоений во внутренних стенках труб;
- 2) очистка каналов от грязи.

Оформление рисунков

Перед вставкой рисунка обязательно должна быть ссылка на него в тексте, под рисунком должна быть полная подпись, до рисунка и после подписи под рисунком оставляется пустая строка.

Не допускается сокращение типа «рис. 5». Допускается нумерация рисунков в пределах раздела, например, «Рисунок 2.1». Для названий рисунков используется шрифт основного текста. Выравнивание рисунка и подписи – по центру.

Если название рисунка состоит из нескольких строк, то его записывают через один межстрочный интервал. Точка в конце названия не ставится.

Пример оформления рисунка:

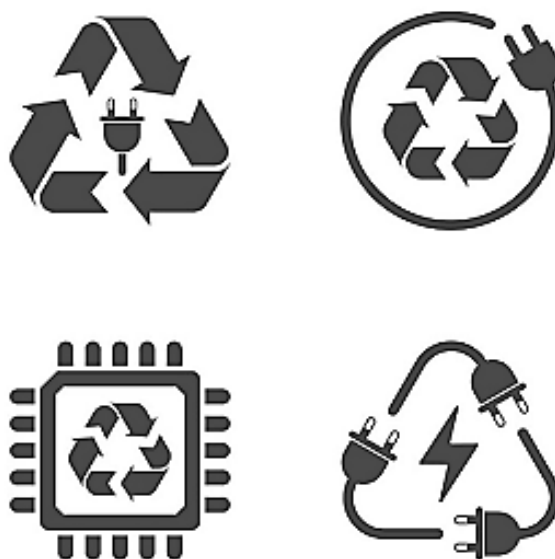


Рисунок 1 – Название рисунка

Оформление формул

Уравнения и формулы следует выделять из текста в отдельную строку.

Ссылки в тексте на порядковые номера формул указывают в скобках, например, «... в формуле (1)».

Формула должна быть выровнена по центру, а номер формулы выровнен по правому краю.

Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее в тексте, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения каждого символа следует писать с новой строки в той последовательности, в которой символы приведены в формуле.

Первая строка пояснения должна начинаться со слова «где» без двоеточия после него с абзаца.

Пример оформления формулы:

$$A = B - C, \quad (1)$$

где B – ... ;

C –

Оформление таблиц

Таблицы нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией. Название таблицы следует помещать над таблицей слева без абзацного отступа в одну строку с ее номером через тире, например, «Таблица 1 – Название» (в конце точка не ставится).

Как и у рисунка, до вставки таблицы необходимо сделать на нее ссылку в тексте. Допускается применять размер шрифта в таблице меньший, чем в тексте.

В приложениях таблицы нумеруются в соответствии с номером (буквенным обозначением) приложения и обозначаются: «Таблица А.1 – Исходные данные».

Если таблица занимает больше двух страниц, то после первого переноса таблицы пишут «Продолжение таблицы 1», а на самом последнем листе «Окончание таблицы 1».

Пример оформления таблицы:

Таблица 1 – Название таблицы

Параметр	Значение параметра
Параметр 1	Значение параметра 1
Параметр 2	Значение параметра 2
Параметр 3	Значение параметра 3
Параметр 4	Значение параметра 4

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

Институт (*название института*)
Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

ОТЧЕТ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ

по дисциплине «Тепловые двигатели»

на тему:

РАСЧЕТ ДВУХВЕНЕЧНОЙ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ СТУПЕНИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Выполнил: студент учебной группы №

(фамилия, имя, отчество)

Проверил:

(должность, фамилия, имя, отчество)

Санкт-Петербург
(год)

РАЗДЕЛ 4. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ (ЗАЧЕТУ) ПО КУРСУ «ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ»

1. В чем отличие конструкции двухвенечной ступени от одновенечной?
2. Какими преимуществами и недостатками обладают двухвенечные ступени?
3. Что такое направляющие лопатки в составе двухвенечной ступени? Каково их назначение?
4. Почему значения степеней реактивности рабочих и направляющих решеток двухвенечных ступеней обычно не велики и составляют 0,02 – 0,06?
5. Почему двухвенечные ступени применяют в качестве регулирующих ступеней?
6. В чем отличие процесса расширения пара в двухвенечной ступени от одновенечной?
7. Какие потери энергии в двухвенечной ступени? Показать их на h, s -диаграмме двухвенечной ступени.
8. Какова формула определения внутреннего относительного лопаточного КПД двухвенечной ступени?
9. Как определить значение скорости потока на выходе из направляющих и рабочих лопаток второго ряда для двухвенечной ступени?
10. Какова формула определения удельной работы на лопатках всей двухвенечной ступени?
11. Как определить полезную работу на лопатках двухвенечной ступени?
12. Как определить внутреннюю мощность двухвенечной ступени?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костюк, А. Г. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник для вузов / А. Г. Костюк, В. В. Фролов, А. Е. Булкин, А. Д. Трухний; под ред. А. Г. Костюка. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – 556 с.
2. Луканин, П. В. Тепловые двигатели для целлюлозно-бумажной промышленности (теория и конструкция паровых турбин): учебное пособие / П. В. Луканин, Т. Ю. Короткова. – СПб.: СПбГТУРП, 2010. – 197 с.: ил. 101.