Расчет количества и теплоперепадов нерегулируемых ступеней ЦВД

Исходные данные для первого отсека ЦВД

№	Наименование	Значение
1	Давление полного торможения после нерегулируемой ступени	$\bar{p}_0^{(1)} = 8.73$ МПа
2	Энтальпия полного торможения перед первой нерегулируемой ступенью	$\bar{h}_0^{(1)} = 3563.4$ кДж/кг
3	Частота вращения вала	$n = 95$ Гц
4	Расход пара в группе ступеней	$G_0^{(1)} = 38.88$ кг/с
5	Давление за отсеком	$p_z^{(1)} = 1.8$ МПа
6	Внутренний КПД группы ступеней	$\eta_{oi}^{(1)} = 0.846$

Далее по расчету все переменные, относящиеся к полным параметрам имеют префикс f, например переменная fp_0 означает $\bar{p}_0$, аналогично и для других параметров

In [1]:
```
# Используемые для расчета библиотеки

# out1, row:209 green

# Для динамического вывода значений
from IPython.display import Math

# Для использования единиц измерения
from pint import Quantity as Q
import pint

# Для расчета термодинамических параметров
import API

# Для математических расчетов
import numpy as np

# Для построения графиков
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
import matplotlib.ticker as ticker
```

```
API loaded
```

In [2]:
```
# Объявление начальных переменных

# Давление полного торможения перед группой ступеней
fp_0        = Q(8.73, "MPa")

# Энтальпия полного торможения перед группой ступеней
fh_0        = Q(3563.4, "kJ/kg")

# Термодинамическая точка f0
fPoint_0    = API.ThPoint(p=fp_0, h=fh_0)

# Номинальная частота вращения вала
n           = Q(95, "1/s")

# Массовый расход через группу ступеней
G_0         = Q(38.88, "kg/s")

# Давление за группой ступеней
p_z         = Q(1.8, "MPa")

# Внутренний относительный КПД группы ступеней
etaHPC_oi   = Q(0.846, "")
```

Варируемые величины

№	Наименование	Обозначение
1	Степень реактивности первой нерегулируемой ступени в корне	$\rho_к^{(1)} = 0.03 - 0.07 = 0.05$
2	Эффективный угол выхода потока из сопловой решетки	$\alpha_{1эф}^{(1)} = 8 - 16\ ^\circ$
3	Коэффициент скорости сопловой решетки	$\varphi^{(1)} = 0.93 - 0.96 = 0.94$
4	Коэффициент расхода сопловой решетки первой нерегулируемой ступени	$\mu^{(1)} = 0.95 - 0.97 = 0.98$
5	Перекрыша между высотами лопаток первой нерегулируемой ступени	$\Delta^{(1)} = 0.003$ м

In [3]:
```
# Объявление варируемых переменных

# Степень реактивности первой нерегулируемой ступени в корне
rho_k       = Q(0.07, "")

# Эффективный угол выхода потока из сопловой решетки
alpha_1eef  = Q(10, "deg")

# Коэффициент скорости сопловой решетки
phi         = Q(np.mean([0.93,0.96]), "")

# Коэффициент расхода сопловой решетки первой нерегулируемой ступени
mu          = Q(np.mean([0.95,0.97]), "")

# Перекрыша между высотами лопаток первой нерегулируемой ступени
Delta       = Q(0.003, "m")

# Предполагаемое количество ступеней
Z           = Q(7, '')
```

Алгоритм расчета

1. Задаемся средним диаметром первой нерегулируемой ступени $d_1^{(1)} = 0.6$ м

In [4]:
```
# Средний диаметр первой нерегулируемой ступени
d_1 = Q(0.608, "m")
```

2. Определяем энтропию пара за первой нерегулируемой ступенью

In [5]:
```
fs_0 = fPoint_0.s()

Math(r"\Large 2.\ \bar {s}_{0}^{(1)} = " + r"f(p={fp_0}, h={fh_0}) = {fs_0:~}".format(fp_0 = fp_0.m, fh_0 = fh_0.m, fs_0 = round(fs_0, 3)))
```

Out[5]:

$$2.\ \bar{s}_0^{(1)} = f(p = 8.73, h = 3563.4) = 6.891 kJ/K/kg$$

3. Определяем высоту первой нерегулируемой ступени

Для этого задаемся величиной обратной веренности $\theta = var$ и проводим итерационный расчет, в результате которого заданная и расчетная обратная веерность должна совпадать не менее чем на 0.1%, так же проверяем длину лопатки первой нерегулируемой ступени.

1. Задаем величину обратной веерности

$$\theta = var$$

2. Определяем степень реактивности на среднем диаметр

$$\rho = \rho_{\text{к}} + \frac{1.8}{\theta + 1.8}$$

3. Определяем располагаемый теплоперепад по параметрам торможения при оптимальном для первой ступени

$$\left(\frac{u}{c_{\text{ф}}}\right)_{\text{опт}} = \frac{\varphi \cdot \cos\alpha_{1\text{эф}}}{2\sqrt{1-\rho}}$$

4. Определяем располагаемый теплоперепад по параметрам торможения при оптимальном $\left(\frac{u}{c_{\text{ф}}}\right)_{\text{опт}}$ с помощью зависимости:

$$\bar{H}_{01} = 12300 \left(\frac{d_1}{\left(\frac{u}{c_{\text{ф}}}\right)_{\text{опт}}} \frac{n}{50} \right)^2$$

5. Определяем теоретическое значение энтальпии за первой ступенью

$$h_{2t} = \bar{h}_0 - \bar{H}_{01}$$

6. Определяем удальный объем пара за первой нерегулируемой ступенью при изоэнтропном процессе расширения по свойствам воды и водяного пара

$$v_{2t} = f(h_{2t}, \bar{s}_0)$$

7. Определяем высоту лопаток первой нерегулируемой ступени

$$l_{11} = \frac{G_0 v_{2t} (u/c_{\text{ф}})_{\text{опт}}}{\pi^2 d_1^2 n \sqrt{1-\rho}\, \mu_1 \sin\alpha_{1\text{эф}}}$$

В расчете так же надо учесть тот факт, что изначально задаваемое количество ступеней влияет на конечный результат.

In [6]:
```
# 3.1. Величина обратной веерности
theta = 20
iterations_number = 0
percent_difference = 0.0
l_11 = 0
while (True):

    # 3.2. Определяем степень реактивности на среднем диаметре
    rho = rho_k + 1.8/(theta+1.8)

    # 3.3. Определяем оптимальное значение u/c_f
    uDIVu_cf = phi*np.cos(alpha_1eef)/(2*np.sqrt(1-rho))

    # 3.4. Определяем располагаемый теплоперепад по параметрам торможения при оптимальном
    # u/c_f для первой ступени
    fH_01 = 12300 * np.power((d_1 * n)/(uDIVu_cf * 50), 2)
    fH_01.ito('kJ/kg')

    # 3.5. Определяем теоретическое значение энтальпии за первой ступенью
    h_2t = fh_0 - fH_01

    # 3.6. Определяем удальный объем пара за первой нерегулируемой ступенью при
    # изоэнтропном процессе расширения по свойствам воды и водяного пара
    Point_2t = API.TCPv2.ThPoint(h=h_2t, s=fPoint_0.s())
    v_2t = Point_2t.v()

    # 3.7. Определеяем высоту первой нерегулируемой ступени
    l_11 = (G_0 * v_2t * uDIVu_cf)/(np.power(np.pi*d_1,2) * n * np.sqrt(1-rho) * np.sin(alpha_1eef) * mu)
    l_11.ito("m")
    # 3.8. Определяем окончательное значение обратной веерности и проверяем его

    # Проверка условия
    # Если получившаяся величина больше, чем заданная
    if (d_1/l_11 > theta):
        # То вычитаем отношение из единицы
        percent_difference = (1 - theta/(d_1/l_11))
    # Если величина меньше, чем заданная
    else:
        # То вычитаем из отношения единицу
        percent_difference = (theta/(d_1/l_11) - 1)

    # Если условие выполнилось - выходим из цикла
    if (np.abs(percent_difference) < 0.01):
        break
    # Иначе добавляем итерацию и меняем приближающее значение на найденное в процессе цикла
    else:
        iterations_number += 1
        theta = (d_1/l_11)
```

In [7]:
```
# Далее идет класс для вывода в LaTeX'e

class lstr(str):

    # классическая версия str.format с изменением замены {} на [] и без поддержки [1] [2]
    def format(self, *args, **kwargs):

        for i in args:
            self = self.replace("[]", lstr(i), 1)

        for i in kwargs.items():
            self = self.replace(lstr('[' + i[0] + ']'), lstr(i[1]))

        return lstr(self)



    def __correct_round(self, value, ALIGN_MODE = 0):
```

```
        '''
            Правильное округление величин, достаточное для инженерных расчетов:

            # if ==0,1 : 0.0044, .0044 -> 0.004
            # if ==2: 12.3313123 -> 12.33
            # if >=3: 343.131233 -> 343.1, 34141414.54 ->34141414.5
            # if 0,1 : 0.00, .0

        '''

        dot_pos = lstr(value).find(".")



        if ((dot_pos == 0) or (dot_pos == 1)):
            # Если включен режим округления для ровного выравнивния
            # Так как число может начинаться с любого количества нулей, а нам нужно только последние три цифры после, то
                # необходимо найти координаты начала этих значимых цифр
            last_null_pos = 0

                # ищем
            for i in lstr(value)[dot_pos + 1:]:
                if (i != '0'):
                    break
                else:
                    last_null_pos += 1

            if (ALIGN_MODE):
                if (len(str(value)) < 2 + last_null_pos+3):
                    return str(value)

                # округляем до позиции первой цифры и еще две цифры сверху (в сумме 3)
                out_value = round(value, last_null_pos+3)

                # Если число округляется так, что значащих цифр станвится 2 (и еще ноль, который не отрисовывается), то
                # добавляем его для ровной отрисовки далее
                # 0.000010999 -> 0.0000110 а не 0.000011

                # литералы ниже: 2-это "0." в начале числа, 3-это последние значащие цифры
                if len(str(out_value)) != 2 + last_null_pos+3:
                    return str(out_value) + '0'
                else:
                    return str(out_value)
            # режим выравнивания выключен
            else:
                return round(value, last_null_pos+3)

        elif (dot_pos == 2):
            if (ALIGN_MODE):
                out_value = round(value, 2)

                # Если число не состоит из двух перврых знаков, запятой и двух последующих, то добавляем ноль для ровной отрисовки
                # 14.0999 -> 14.10 а не 14.1

                # литералы ниже: 2 - первые два знака до запятой, 1 - точка между целыми и дробными, 2 - два знака после запятой
                if len(str(out_value)) != 2 + 1 + 2:
                    return str(out_value) + '0'
                else:
                    return str(out_value)
            else:
                return round(value,2)

        elif (dot_pos >= 3):
            if (ALIGN_MODE):
                out_value = round(value, 1)

                # Если большое число округлилось в большую сторону, то добавляем ноль для правильной отрисовки далее
                # 19999.9999 -> 20000.0 а не 20000

                # если длина строки меньше, чем была бы с знаком после точки
                if len(str(out_value)) <= dot_pos+1:
                    return str(out_value) + '0'
                else:
                    return str(out_value)
            else:
                return round(value,1)
        else:
            return value

    def dlformat(self, *args, **kwargs):
        '''
            Версия lstr.format(...) с поддержкой единиц измерения с использоваением округления
        '''

        _args = list()
        for i in args:
            if (isinstance(i, pint.Quantity)):
                _args.append(self.__correct_round(i.m, ALIGN_MODE=1))
            else:
                _args.append(i)

        _kwargs = list()
        for i in kwargs.items():
            if (isinstance(i[1], pint.Quantity)):
                _kwargs.append((i[0], self.__correct_round(i[1].m, ALIGN_MODE=1)))
            else:
                _kwargs.append((i[0], i[1]))

        return self.format(*tuple(_args), **dict(_kwargs))

    def dformat(self, *args, **kwargs):
        '''
            Версия lstr.format(...) с поддержкой единиц измерения с использоваением округления
        '''

        _args = list()
        for i in args:
            if (isinstance(i, pint.Quantity)):
                _args.append(self.__correct_round(i.m, ALIGN_MODE=0))
            else:
                _args.append(i)

        _kwargs = list()
        for i in kwargs.items():
            if (isinstance(i[1], pint.Quantity)):
                _kwargs.append((i[0], self.__correct_round(i[1].m, ALIGN_MODE=0)))
            else:
                _kwargs.append((i[0], i[1]))

        return self.format(*tuple(_args), **dict(_kwargs))

    def get_large(self):
        local_lstr = self
        local_lstr = lstr(r"\Large{") + local_lstr + lstr(r"} \\ \ \\")
        return local_lstr
```

```
a = lstr("[][][b][c]")

#print(a.format(1,2,b=" 13",c=" vd"))

#print("{}{}{b}".format("AAA", "b", b="3"))
#swap_br_in_math_string("3213123", a=10, b=20)
#Math(lstr("\Delta [H_0] = [H_0v]\ кДж/кг").format(H_0="H_0",H_0v=33))
f = Q(0.0330031, "kJ/kg")
b = Q(22.0993213123, "meter")
d = Q(3131313.9992999, "kg")
print(lstr("[d] [b] [c]").dlformat(d=f,b=b,c=d))

#print(type(lstr(r"3.2 \ \theta = []").dformat(theta)))
```

```
0.0330 22.10 3131314.0
```

In [8]:
```
Math(
    # 3.2. theta
    lstr(r"3.2.\ \theta = []").dformat(theta).get_large() +

    # 3.3. rho
    lstr(r"3.3.\ \rho = \rho_{к} + \frac{1.8}{\theta + 1.8} = [rho_k] + \frac{1.8}{[theta] + 1.8} = [rho]").dformat(rho_k = rho_k, theta = theta, rho=rho).get_large() +

    # 3.4. fH_01 = 12.3 * np.power((d_1 * n)/(uDIVu_cf * 50), 2)
    lstr(r"3.4.\ \bar H_{01}=12300 \Bigg( \frac{d_1}{(u/c)_{опт}} \frac{n}{50} \Bigg)^2 = 12300 \Bigg( \frac{[d_1]}{[uDIVc]} \frac{[n]}{50} \Bigg)^2 = [fH_01] \ кДж/кг").dformat(d_1=d_1,

    # 3.5. h_2t = fh_0 - fH_01
    lstr(r"3.5.\ h_{2t} = \bar h_0 - \bar H_{01} = [fh_0] - [fH_01] = [h_2t]\ кДж/кг").dformat(fh_0=fh_0, fH_01=fH_01, h_2t=h_2t).get_large() +

    # 3.6. v_2t = Point_2t.v() /  Point_2t = API.TCPv2.ThPoint(h=h_2t, s=fPoint_0.s())
    lstr(r"3.6.\ v_{2t} = f\Bigg(\begin{matrix}h_{2t} = [h_2t] \\ \bar s_0 = [fs_0]\end{matrix}\Bigg)  = [v_2t]\ м^3/кг").dformat(h_2t=h_2t,fs_0=fs_0,v_2t=v_2t).get_large() +

    # 3.7. l_11 = (G_0 * v_2t * uDIVu_cf)/(np.power(np.pi*d_1,2) * n * np.sqrt(1-rho) * np.sin(alpha_1eef) * mu)
    lstr(r"3.7.\ l_{11} = \frac{G_0\ v_{2t} \ (u/c_ф)_{опт} }{\pi^2 \ d_1^2\ n\ \sqrt{1-\rho}\ \mu \ \sin{\alpha_{1эф}}} = \frac{[G_0]\cdot [v_2t]\cdot [uDIVc]}{\pi^2\cdot [d_1]^2\cdot [n

    lstr(r"3.8.\ При\ расчете\ высоте\ лопатки\ и\ определения\ веерности\ проделано\ [] \ итерации\ и\ погрешность\ составляет\ [] \%").dformat(iterations_number, percent_difference * 10
)
```

Out[8]:

$$3.2.\ \theta = 34.85$$

$$3.3.\ \rho = \rho_{к} + \frac{1.8}{\theta + 1.8} = 0.07 + \frac{1.8}{34.85 + 1.8} = 0.119$$

$$3.4.\ \bar H_{01}=12300 \Bigg(\frac{d_1}{(u/c)_{опт}} \frac{n}{50} \Bigg)^2 = 12300 \Bigg(\frac{0.608}{0.496} \frac{95}{50} \Bigg)^2 = 66.78 \ кДж/кг$$

$$3.5.\ h_{2t} = \bar h_0 - \bar H_{01} = 3563.4 - 66.78 = 3496.6\ кДж/кг$$

$$3.6.\ v_{2t} = f\Bigg(\begin{matrix}h_{2t} = 3496.6 \\ \bar s_0 = 6.891\end{matrix}\Bigg) = 0.049\ м^3/кг$$

$$3.7.\ l_{11} = \frac{G_0\ v_{2t} \ (u/c_ф)_{опт} }{\pi^2 \ d_1^2\ n\ \sqrt{1-\rho}\ \mu \ \sin{\alpha_{1эф}}} = \frac{38.88\cdot 0.049\cdot 0.496}{\pi^2\cdot 0.608^2\cdot 95\ \sqrt{1-0.119}\cdot 0.96\cdot \sin 10^\circ} = 0.0174\ м$$

3.8. При расчете высоте лопатки и определения веерности проделано 2 итерации и погрешность составляет 0.145%

4. Определение высоту рабочей лопатки первой нерегулирумой ступени

In [9]:
```
# Высота рабочей лопатки
l_21 = l_11 + Delta
l_21.ito('m')
```

In [10]:
```
Math(
    lstr(r"4.\ l_{21} = l_{11} + \Delta = [l_11] + [Delta] = [l_21]\ м").dformat(l_11=l_11,Delta=Delta,l_21=l_21).get_large()
)
```

Out[10]:

$$4.\ l_{21} = l_{11} + \Delta = 0.0174 + 0.003 = 0.0204\ м$$

5. Определение корневого диаметра ступени

In [11]:
```
# Корневой диаметр ступени
d_k = d_1 - l_21
d_k.ito('m')
```

In [12]:
```
Math(
    lstr(r"5.\ d_к = d_1 - l_{21} = [d_1] - [l_21] = [d_k]\ м").dformat(d_1=d_1,l_21=l_21,d_k=d_k).get_large()
)
```

Out[12]:

$$5.\ d_к = d_1 - l_{21} = 0.608 - 0.0204 = 0.588\ м$$

6. Определение параметров пара за последней ступенью группы

1. Значение энтальпии пара при изоэнтропном расширении пара в ЦВД

$$h_{zt} = f\Bigg(\begin{matrix}p_z \\ \bar s_0\end{matrix}\Bigg)$$

2. Теоретический перепад на отсек нерегулируемых ступеней группы

$$\bar H_0 = \bar h_0 - h_{zt}$$

3. Действительный теплоперепад на отсек нерегулирумых ступеней группы

$$H_i = \bar H_0 \cdot \eta_{oi}^{(1)}$$

4. Действительное значение энтальпии за последней ступенью группы

$$h_z = \bar h_0 - H_i$$

5. Действительный объем за последней ступенью группы

$$v_{2z} = f\begin{pmatrix} p_z \\ h_z \end{pmatrix}$$

In [13]:
```
# 6.1. Значение энтальпии пара при изоэнтропном расширении пара в ЦВД:
# Термодинамическая точка zt
Point_zt = API.TCPv2.ThPoint(p=p_z, s=fPoint_0.s())
# Энтальпия
h_zt = Point_zt.h()

# 6.2. Теоретический перепад на отсек нерегулируемых ступеней ЦВД:
fH_0 = fh_0 - h_zt

# 6.3. Действительный теплоперепад на отсек нерегулируемых ступеней ЦВД
H_i = fH_0 * etaHPC_oi

# 6.4. Действительное значение энтальпии за ЦВД (за последней ступенью)
h_z = fh_0 - H_i

# 6.5 Действительный объем за ЦВД (за последней ступенью)
# Термодинамическая точка 2z
Point_2z = API.TCPv2.ThPoint(p=p_z, h=h_z)
v_2z = Point_2z.v()
```

In [14]:
```
Math(
    # 6.1
    lstr(r"6.1.\ h_{zt} = f\bigg(\begin{matrix}p_z=[p_z] \\ \bar s_0=[fs_0] \end{matrix}\bigg) = [h_zt]\ кДж/кг").dformat(p_z=p_z,fs_0=fs_0,h_zt=h_zt).get_large() +
    # 6.2
    lstr(r"6.2.\ \bar H_0 = \bar h_0 - h_{zt} = [fh_0] - [h_zt] = [fH_0]\ кДж/кг").dformat(fh_0=fh_0,h_zt=h_zt,fH_0=fH_0).get_large() +
    # 6.3
    lstr(r"6.3.\ H_i = \bar H_0 \cdot \eta_{oi}^{(1)} = [fH_0] \cdot [eta] = [H_i]\ кДж/кг").dformat(fH_0=fH_0,eta=etaHPC_oi,H_i=H_i).get_large() +
    # 6.4
    lstr(r"6.4.\ h_z = \bar h_0 - H_i = [fh_0] - [H_i] = [h_z]\ кДж/кг").dformat(fh_0=fh_0,H_i=H_i,h_z=h_z).get_large() +
    # 6.5
    lstr(r"6.5.\ v_{2z} = f\bigg(\begin{matrix}p_z=[p_z] \\ h_z=[h_z] \end{matrix}\bigg)=[v_2z]\ м^3/кг").dformat(p_z=p_z,h_z=h_z,v_2z=v_2z).get_large()
)
```

Out[14]:

$$6.1.\ h_{zt} = f\begin{pmatrix} p_z = 1.8 \\ \bar s_0 = 6.891 \end{pmatrix} = 3068.7\ \text{кДж/кг}$$

$$6.2.\ \bar H_0 = \bar h_0 - h_{zt} = 3563.4 - 3068.7 = 494.7\ \text{кДж/кг}$$

$$6.3.\ H_i = \bar H_0 \cdot \eta_{oi}^{(1)} = 494.7 \cdot 0.846 = 418.5\ \text{кДж/кг}$$

$$6.4.\ h_z = \bar h_0 - H_i = 3563.4 - 418.5 = 3144.9\ \text{кДж/кг}$$

$$6.5.\ v_{2z} = f\begin{pmatrix} p_z = 1.8 \\ h_z = 3144.9 \end{pmatrix} = 0.155\ \text{м}^3/\text{кг}$$

7. Определение высоты рабочей лопатки последней ступени

Так как объем при высоких давлениях изменяются практически линейно, то можно принять закон изменения диаметров/высот лопаток линейным. Для начала необходимо найти высоту лопатки последней ступени в группе из уравнения:

$$l_{2z}^2 + l_{2z}\, d_\text{к} = l_{21}\, d_{21} \frac{v_{2z}}{v_{2t}}$$

$$l_{2z} = \frac{-d_\text{к} \pm \sqrt{d_\text{к}^2 + 4 l_{21}\, d_{21} \frac{v_{2z}}{v_{2t}}}}{2}$$

In [15]:
```
# 7 Высота рабочей лопатки последней ступени
l_2z = (-d_k + np.sqrt(d_k**2 + 4*l_21*d_1*v_2z/v_2t))/2
```

In [16]:
```
Math(
    lstr(r"l_{2z} = \frac{-d_к + \sqrt{d_к^2 + 4 l_{21}\ d_{21} \frac{v_{2z}}{v_{2t}}}}{2} = \frac{-[d_k] + \sqrt{[d_k]^2 + 4 \cdot [l_21] \cdot [d_21] \frac{[v_2z]}{[v_2t]}}}{2} = [l_2z]
)
```

Out[16]:

$$l_{2z} = \frac{-d_\text{к} + \sqrt{d_\text{к}^2 + 4 l_{21}\ d_{21} \frac{v_{2z}}{v_{2t}}}}{2} = \frac{-0.588 + \sqrt{0.588^2 + 4 \cdot 0.0204 \cdot 0.608 \frac{0.155}{0.049}}}{2} = 0.0606\ \text{м}$$

8. Определение среднего диаметра последней ступени группы

$$d_{2z} = d_\text{к} + l_{2z}$$

In [17]:
```
# 8 Средний диаметр последней ступени группы
d_2z = d_k + l_2z
```

In [18]:
```
Math(
    lstr(r"d_{2z} = d_к + l_{2z} = [d_k] + [l_2z] = [d_2z]\ м").dformat(d_k=d_k,l_2z=l_2z,d_2z=d_2z).get_large()
)
```

Out[18]:

$$d_{2z} = d_\text{к} + l_{2z} = 0.588 + 0.0606 = 0.648\ \text{м}$$

9. Определяем основные параметры первой и последней ступени

1. Определение обратной вверности в первой и последней ступени группы

$$\theta_1 = \frac{l_{21} + d_\text{к}}{l_2 1}$$

$$\theta_z = \frac{l_{2z} + d_\text{к}}{l_2 z}$$

2. Определение степени реактивности на среднем диаметре в первой и последней ступени группы

$$\rho_1 = \rho_\text{к} + \frac{1.8}{\theta_1 + 1.8}$$

$$\rho_z = \rho_\text{к} + \frac{1.8}{\theta_z + 1.8}$$

3. Определение оптимального значения $u/c_ф$

$$\left(\frac{u}{c_ф}\right)_1 = \frac{\varphi \cos \alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_1}}$$

$$\left(\frac{u}{c_ф}\right)_z = \frac{\varphi \cos \alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_z}}$$

In [19]:
```python
# 9.1 Обратная вверность в первой и последней ступени
theta_1 = (l_21 + d_k)/l_21
theta_z = (l_2z + d_k)/l_2z

# 9.2 Степень реактивности в первой и последней ступени
rho_1 = rho_k + 1.8/(theta_1 + 1.8)
rho_z = rho_k + 1.8/(theta_z + 1.8)

# 9.3 Оптимальное значение u/c_ф
uDIVu_1 = phi*np.cos(alpha_1eef)/(2*np.sqrt(1-rho_1))
uDIVu_z = phi*np.cos(alpha_1eef)/(2*np.sqrt(1-rho_z))
```

In [20]:
```python
Math(
    lstr(r"9.1.1\ \theta_1 = \frac{l_{21} + d_к }{l_21} = \frac{[l_21] + [d_k]}{[l_21]} = [theta_1]").dformat(l_21=l_21,d_k=d_k,theta_1=theta_1).get_large() +
    lstr(r"9.1.1\ \theta_z = \frac{l_{2z} + d_к }{l_2z} = \frac{[l_2z] + [d_k]}{[l_2z]} = [theta_z]").dformat(l_2z=l_21,d_k=d_k,theta_z=theta_z).get_large() +

    lstr(r"\\ \  \\") +

    lstr(r"9.2.1\ \rho_1 = \rho_к + \frac{1.8}{\theta_1 + 1.8} = [rho_k] + \frac{1.8}{[theta_1] + 1.8} = [rho_1]").dformat(rho_k=rho_k, theta_1=theta_1,rho_1=rho_1).get_large() +
    lstr(r"9.2.2\ \rho_z = \rho_к + \frac{1.8}{\theta_z + 1.8} = [rho_k] + \frac{1.8}{[theta_z] + 1.8} = [rho_z]").dformat(rho_k=rho_k, theta_z=theta_z,rho_z=rho_z).get_large() +

    lstr(r"\\ \  \\") +

    lstr(r"9.3.1\ \Bigg(\frac{u}{c_ф}\Bigg)_1 = \frac{\varphi \cos{\alpha_{1эф}}}{2\sqrt{1-\rho_1}} = \frac{[phi] \cdot \cos{[alpha_1eef]^\circ}}{2\sqrt{1-[rho_1]}} = [uDIVc]").dformat(ph
    lstr(r"9.3.2\ \Bigg(\frac{u}{c_ф}\Bigg)_z = \frac{\varphi \cos{\alpha_{1эф}}}{2\sqrt{1-\rho_z}} = \frac{[phi] \cdot \cos{[alpha_1eef]^\circ}}{2\sqrt{1-[rho_z]}} = [uDIVc]").dformat(ph

)
```

Out[20]:

$$9.1.1\ \theta_1 = \frac{l_{21} + d_к}{l_2 1} = \frac{0.0204 + 0.588}{0.0204} = 29.77$$

$$9.1.1\ \theta_z = \frac{l_{2z} + d_к}{l_2 z} = \frac{0.0204+0.588}{0.0204} = 10.7$$

$$9.2.1\ \rho_1 = \rho_к + \frac{1.8}{\theta_1+1.8} = 0.07 + \frac{1.8}{29.77+1.8} = 0.127$$

$$9.2.2\ \rho_z = \rho_к + \frac{1.8}{\theta_z+1.8} = 0.07 + \frac{1.8}{10.7+1.8} = 0.214$$

$$9.3.1\ \Bigg(\frac{u}{c_ф}\Bigg)_1 = \frac{\varphi \cos \alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_1}} = \frac{0.945 \cdot \cos 10^\circ}{2\sqrt{1-0.127}} = 0.498$$

$$9.3.2\ \Bigg(\frac{u}{c_ф}\Bigg)_z = \frac{\varphi \cos \alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_z}} = \frac{0.945 \cdot \cos 10^\circ}{2\sqrt{1-0.214}} = 0.525$$

10. Выполнение разбивки теплоперепадов

1. Предполагаем, что средний диаметр ступеней и высота лопаток высота лопаток изменяются вдоль ЦВД линейно. Так же учтем, что удобнее использовать нумерацию для ступеней с 1, поэтому:

   A. Для диаметров:

$$d(z_i) = \left(\frac{d_z - d_1}{Z-1}\right) z_i + \frac{d_1 Z - d_{2z}}{Z-1}$$

   B. Для высот лопаток:

$$l(z_i) = \left(\frac{l_z - l_{21}}{Z-1}\right) z_i + \frac{l_{21} Z - l_{2z}}{Z_1}$$

2. Определяем обратную веерность для каждой ступени

$$\theta_i = \frac{l_i + d_к}{l_i}$$

3. Определяем степень реактивности на среднем диаметре для каждой ступени

$$\rho_i = \rho_к + \frac{1.8}{\theta_i + 1.8}$$

4. Для каждой ступени определяем опимальную величину $u/c_ф$

$$\left(\frac{u}{c_ф}\right)_{опт i} = \frac{\varphi \cos \alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_i}}$$

5. Для каждой ступени определяем теплоперепад по статическим параметрам

$$H_{0i} = 12300 \left(\frac{d_i}{(u/c_ф)_{опт i}} \frac{n}{50}\right)^2 K_i$$

$$\text{при } i > 1 \dashrightarrow K_i = 0.95$$

$$\text{при } i = 1 \dashrightarrow K_i = 1.00$$

6. Определяем среднее арифметическое значение теплоперепадов

$$H_{0ср} = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^{Z} H_{0i}$$

7. Определяем коэффициент возврата теплоты

$$q_t = 4.8 \cdot 10^{-4} (1 - \eta_{oi}^{(1)}) \bar{H}_0 \frac{Z-1}{Z}$$

8. Новое значение количества ступеней ЦВД

$$Z_{\text{нов}} = (1+q_t)\frac{\bar{H}_0}{H_{0\text{ср}}}$$

In [21]:
```
## 10.1.1, 10.1.2
# Коэффициент k для функции диаметра
k_d = (d_2z - d_1)/(Z.m-1)
b_d = (d_1*Z.m - d_2z)/(Z.m-1)

# Коэффициент k для функции длины лопатки
k_l = (l_2z - l_21)/(Z.m-1)
b_l = (l_21*Z.m - l_2z)/(Z.m-1)

# Функция для определения диаметра по номеру ступени
def d(z_i):
    return k_d*z_i + b_d

# Функция для определения длины лопатки по номеру ступени
def l(z_i):
    return k_l*z_i + b_l

# Перечислим номера ступеней в данном векторе
stages_number_vec = np.arange(1, Z.m+1, 1)

# Диаметры каждой ступени
d_vec = d(stages_number_vec)

# Длины сопловых лопаток каждой ступени
l_vec = l(stages_number_vec)
```

In [22]:
```
d_vec_str = lstr(r"\begin{matrix}")
for i in range(0, len(d_vec)):
    d_vec_str += lstr(r"d_{[it]} = k_d z_{[it]} + b_d = [k_d] \cdot [z] + [b_d] = [d_i]\ м ").dlformat(it=i+1,z=i+1,d_i=d_vec[i],k_d=k_d,b_d=b_d)
    d_vec_str += lstr(r"&|\ \ \ l_{[it]} = k_l z_{[it]} + b_l = [k_l] \cdot [z] + [b_l] = [l_i]\ м  \\").dlformat(it=i+1,k_l=k_l,z=i+1,b_l=b_l,l_i=l_vec[i])

Math(
    lstr(r"\Large{10.1} \\ ") +
    lstr(d_vec_str + r"\end{matrix}").get_large()
)
```

Out[22]:

10.1

$$\begin{matrix}
d_1 = k_d z_1 + b_d = 0.00669 \cdot 1 + 0.601 = 0.608\ \text{м} & |\ \ \ l_1 = k_l z_1 + b_l = 0.00669 \cdot 1 + 0.0137 = 0.0204\ \text{м} \\
d_2 = k_d z_2 + b_d = 0.00669 \cdot 2 + 0.601 = 0.615\ \text{м} & |\ \ \ l_2 = k_l z_2 + b_l = 0.00669 \cdot 2 + 0.0137 = 0.0271\ \text{м} \\
d_3 = k_d z_3 + b_d = 0.00669 \cdot 3 + 0.601 = 0.621\ \text{м} & |\ \ \ l_3 = k_l z_3 + b_l = 0.00669 \cdot 3 + 0.0137 = 0.0338\ \text{м} \\
d_4 = k_d z_4 + b_d = 0.00669 \cdot 4 + 0.601 = 0.628\ \text{м} & |\ \ \ l_4 = k_l z_4 + b_l = 0.00669 \cdot 4 + 0.0137 = 0.0405\ \text{м} \\
d_5 = k_d z_5 + b_d = 0.00669 \cdot 5 + 0.601 = 0.635\ \text{м} & |\ \ \ l_5 = k_l z_5 + b_l = 0.00669 \cdot 5 + 0.0137 = 0.0472\ \text{м} \\
d_6 = k_d z_6 + b_d = 0.00669 \cdot 6 + 0.601 = 0.641\ \text{м} & |\ \ \ l_6 = k_l z_6 + b_l = 0.00669 \cdot 6 + 0.0137 = 0.0539\ \text{м} \\
d_7 = k_d z_7 + b_d = 0.00669 \cdot 7 + 0.601 = 0.648\ \text{м} & |\ \ \ l_7 = k_l z_7 + b_l = 0.00669 \cdot 7 + 0.0137 = 0.0606\ \text{м}
\end{matrix}$$

In [23]:
```
# 10.2
# Обратная веерность для каждой ступени
theta_vec = (l_vec + d_k)/l_vec

# 10.3
# Степень реактивности на среднем диаметре для каждой ступени
rho_vec = rho_k + 1.8/(theta_vec + 1.8)
```

In [24]:
```
theta_vec_str = r"\begin{matrix}"
for i in range(0, len(theta_vec)):
    theta_vec_str += lstr(r"\theta_{[i]} = \dfrac{l_{[i]} + d_к}{l_{[i]}} = \dfrac{[l_i] + [d_k]}{[l_i]}=[theta]").dlformat(i=i+1,theta=theta_vec[i],l_i=l_vec[i],d_k=d_k)
    theta_vec_str += lstr(r"&\ \ \ \ \ \ \ \rho_{[i]}=\rho_к+\dfrac{1.8}{1.8+\theta_{[i]}}=[rho_k]+\dfrac{1.8}{1.8+[theta_i]}=[rho_i] \\ ").dlformat(i=i+1,rho_k=rho_k,theta_i=theta_vec[
    theta_vec_str += lstr(r"& \ \ \\")
Math(
    lstr(r"10.2\ \& \ 10.3 \\ ").get_large() +
    lstr(theta_vec_str + r"\end{matrix}").get_large()
)
```

Out[24]: 10.2 & 10.3

$$\theta_1 = \dfrac{l_1 + d_к}{l_1} = \dfrac{0.0204 + 0.588}{0.0204} = 29.77 \qquad \rho_1 = \rho_к + \dfrac{1.8}{1.8 + \theta_1} = 0.07 + \dfrac{1.8}{1.8 + 29.77} = 0.127$$

$$\theta_2 = \dfrac{l_2 + d_к}{l_2} = \dfrac{0.0271 + 0.588}{0.0271} = 22.67 \qquad \rho_2 = \rho_к + \dfrac{1.8}{1.8 + \theta_2} = 0.07 + \dfrac{1.8}{1.8 + 22.67} = 0.144$$

$$\theta_3 = \dfrac{l_3 + d_к}{l_3} = \dfrac{0.0338 + 0.588}{0.0338} = 18.38 \qquad \rho_3 = \rho_к + \dfrac{1.8}{1.8 + \theta_3} = 0.07 + \dfrac{1.8}{1.8 + 18.38} = 0.159$$

$$\theta_4 = \dfrac{l_4 + d_к}{l_4} = \dfrac{0.0405 + 0.588}{0.0405} = 15.51 \qquad \rho_4 = \rho_к + \dfrac{1.8}{1.8 + \theta_4} = 0.07 + \dfrac{1.8}{1.8 + 15.51} = 0.174$$

$$\theta_5 = \dfrac{l_5 + d_к}{l_5} = \dfrac{0.0472 + 0.588}{0.0472} = 13.45 \qquad \rho_5 = \rho_к + \dfrac{1.8}{1.8 + \theta_5} = 0.07 + \dfrac{1.8}{1.8 + 13.45} = 0.188$$

$$\theta_6 = \dfrac{l_6 + d_к}{l_6} = \dfrac{0.0539 + 0.588}{0.0539} = 11.90 \qquad \rho_6 = \rho_к + \dfrac{1.8}{1.8 + \theta_6} = 0.07 + \dfrac{1.8}{1.8 + 11.90} = 0.201$$

$$\theta_7 = \dfrac{l_7 + d_к}{l_7} = \dfrac{0.0606 + 0.588}{0.0606} = 10.70 \qquad \rho_7 = \rho_к + \dfrac{1.8}{1.8 + \theta_7} = 0.07 + \dfrac{1.8}{1.8 + 10.70} = 0.214$$

In [25]:
```python
# 10.4. Для каждой ступени определяем величину u/c_f
uDIVc_f_vec = phi*np.cos(alpha_1eef)/(2*np.sqrt(1-rho_vec))

# 10.5 Теплоперепад по статическим параметрам для каждой ступени
# Вектор коэффициентов K_i
K_vec = np.full(Z.m, 0.95)
K_vec[0] = 1.0

H_vec = 12300 * (d_vec/uDIVc_f_vec)**2 * (n/50)**2 * K_vec
H_vec.ito('kJ/kg')
```

In [26]:
```python
H_vec_str = lstr(r"\begin{matrix}")
for i in range(0, len(H_vec)):
    H_vec_str += lstr(r"\Bigg(\dfrac{u}{c_ф}\Bigg)_{[i]} = \dfrac{\varphi\cos{\alpha_{1эф}}}{2\sqrt{1-\rho_{[i]}}} = \dfrac{[phi]\cos{[alpha_1eef]^\circ}}{2\sqrt{1-[rho_i]}}=[uDIVc_i]").d
    H_vec_str += lstr(r"&\ \ \ \ \ \ \ \ \  H_{0[i]} = 12300 \Bigg(\dfrac{d_[i]}{(u/c_ф)_{опт[i]}} \dfrac{n}{50}\Bigg)^2K_[i] = 12300\Bigg(\dfrac{[d_i]}{[uDIVc_i]}\dfrac{[n]}{50}\Bigg)^2[
    H_vec_str += lstr(r"& \ \ \\")
Math(
    lstr(r"10.4\ \& \ 10.5 \\").get_large() +
    lstr(H_vec_str + r"\end{matrix}").get_large()
)
```

Out[26]: 10.4 & 10.5

$$\left(\dfrac{u}{c_ф}\right)_1 = \dfrac{\varphi\cos\alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_1}} = \dfrac{0.945\cos 10^\circ}{2\sqrt{1-0.127}} = 0.498 \qquad H_{01} = 12300\left(\dfrac{d_1}{(u/c_ф)_{опт1}}\dfrac{n}{50}\right)^2 K_1 = 12300\left(\dfrac{0.608}{0.498}\dfrac{95}{50}\right)^2 1.0 = 66.18 \text{ кДж/кг}$$

$$\left(\dfrac{u}{c_ф}\right)_2 = \dfrac{\varphi\cos\alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_2}} = \dfrac{0.945\cos 10^\circ}{2\sqrt{1-0.144}} = 0.503 \qquad H_{02} = 12300\left(\dfrac{d_2}{(u/c_ф)_{опт2}}\dfrac{n}{50}\right)^2 K_2 = 12300\left(\dfrac{0.615}{0.503}\dfrac{95}{50}\right)^2 0.95 = 63.04 \text{ кДж/кг}$$

$$\left(\dfrac{u}{c_ф}\right)_3 = \dfrac{\varphi\cos\alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_3}} = \dfrac{0.945\cos 10^\circ}{2\sqrt{1-0.159}} = 0.507 \qquad H_{03} = 12300\left(\dfrac{d_3}{(u/c_ф)_{опт3}}\dfrac{n}{50}\right)^2 K_3 = 12300\left(\dfrac{0.621}{0.507}\dfrac{95}{50}\right)^2 0.95 = 63.25 \text{ кДж/кг}$$

$$\left(\dfrac{u}{c_ф}\right)_4 = \dfrac{\varphi\cos\alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_4}} = \dfrac{0.945\cos 10^\circ}{2\sqrt{1-0.174}} = 0.512 \qquad H_{04} = 12300\left(\dfrac{d_4}{(u/c_ф)_{опт4}}\dfrac{n}{50}\right)^2 K_4 = 12300\left(\dfrac{0.628}{0.512}\dfrac{95}{50}\right)^2 0.95 = 63.48 \text{ кДж/кг}$$

$$\left(\dfrac{u}{c_ф}\right)_5 = \dfrac{\varphi\cos\alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_5}} = \dfrac{0.945\cos 10^\circ}{2\sqrt{1-0.188}} = 0.516 \qquad H_{05} = 12300\left(\dfrac{d_5}{(u/c_ф)_{опт5}}\dfrac{n}{50}\right)^2 K_5 = 12300\left(\dfrac{0.635}{0.516}\dfrac{95}{50}\right)^2 0.95 = 63.74 \text{ кДж/кг}$$

$$\left(\dfrac{u}{c_ф}\right)_6 = \dfrac{\varphi\cos\alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_6}} = \dfrac{0.945\cos 10^\circ}{2\sqrt{1-0.201}} = 0.521 \qquad H_{06} = 12300\left(\dfrac{d_6}{(u/c_ф)_{опт6}}\dfrac{n}{50}\right)^2 K_6 = 12300\left(\dfrac{0.641}{0.521}\dfrac{95}{50}\right)^2 0.95 = 64.02 \text{ кДж/кг}$$

$$\left(\dfrac{u}{c_ф}\right)_7 = \dfrac{\varphi\cos\alpha_{1эф}}{2\sqrt{1-\rho_7}} = \dfrac{0.945\cos 10^\circ}{2\sqrt{1-0.214}} = 0.525 \qquad H_{07} = 12300\left(\dfrac{d_7}{(u/c_ф)_{опт7}}\dfrac{n}{50}\right)^2 K_7 = 12300\left(\dfrac{0.648}{0.525}\dfrac{95}{50}\right)^2 0.95 = 64.33 \text{ кДж/кг}$$

In [27]:
```
# 10.6 Среднее значение теплоперепада за группу ступеней
H_0ave = np.mean(H_vec)
```

In [28]:
```
H_0_sum_str = lstr(r"[]").dformat(H_vec[0])
for i in range(1, len(H_vec)):
    H_0_sum_str += lstr("+[]").dformat(H_vec[i])

Math(
  lstr( lstr(r"10.6\ H_{0cp} = \frac{") + H_0_sum_str + lstr(r"}{[Z]} = [H_0ave]\ кДж/кг").dformat(Z=Z,H_0ave=H_0ave)).get_large()
)
```

Out[28]:

$$10.6\ H_{0ср} = \frac{66.18+63.04+63.25+63.48+63.74+64.02+64.33}{7} = 64.01\ кДж/кг$$

In [29]:
```
# 10.7 Коэффициент возврата теплоты
q_t_k = Q(4.8*10**(-4), 'kg/kJ')
q_t = q_t_k * (1 - etaHPC_oi)*H_0ave * (Z.m-1)/Z.m
```

In [30]:
```
Math(
    lstr(r"10.7\ q_t=4.8\cdot10^{-4}(1-\eta^{(1)}_{oi})H_{0cp}\dfrac{Z-1}{Z}=4.8\cdot10^{-4}(1-[eta])\cdot[H_0ave]\dfrac{[Z]-1}{[Z]} = [q_t]").dformat(eta=etaHPC_oi,H_0ave=H_0ave,Z=Z,q_t=
)
```

Out[30]:

$$10.7\ q_t = 4.8\cdot10^{-4}(1-\eta^{(1)}_{oi})H_{0ср}\frac{Z-1}{Z} = 4.8\cdot10^{-4}(1-0.846)\cdot 64.01\frac{7-1}{7} = 0.00406$$

In [31]:
```
# 10.8 Уточненное количество ступеней группы
Z_new = fH_0/H_0ave * (1+q_t)
Z_new.ito('')
```

In [32]:
```
Math(
    lstr(r"10.8\ Z_{нов}=\dfrac{\bar H_0}{H_{0cp}}(1+q_t) = \dfrac{[fH_0]}{[H_0ave]}(1+[q_t]) = [Z_new]").dformat(fH_0=fH_0,H_0ave=H_0ave,q_t=q_t,Z_new=Z_new).get_large()
)
```

Out[32]:

$$10.8\ Z_{нов} = \frac{\bar{H}_0}{H_{0ср}}(1+q_t) = \frac{494.7}{64.01}(1+0.00406) = 7.76$$

11. Определение невязки после разбивки теплоперепадов

$$\Delta_H = \frac{\bar{H}_0(1+q_t)}{Z} - \frac{1}{Z}\sum_{i=1}^{Z} H_i = \frac{\bar{H}_0(1+q_t)}{Z} - H_{0ср}$$

Если невязка получается отрицательной - ступени считаются разгруженными, если - положительной, то перегруженными. Перегруженные ступени в среднем имеют большее КПД на переменных режимах.

In [33]:
```
# 11 Величина распределения теплоперепадов дробной ступени на остальные
Delta_H = (fH_0*(1+q_t)/Z.m) - H_0ave
```

In [34]:
```
Math(
    lstr(r"11.\ \Delta_H = \dfrac{\bar H_0(1+q_t)}{Z}-H_{0cp}=\dfrac{[fH_0](1+[q_t])}{[Z]}-[H_0ave] = [Delta_H]").dformat(fH_0=fH_0,q_t=q_t,Z=Z,H_0ave=H_0ave,Delta_H=Delta_H).get_large()
)
```

Out[34]:

$$11.\ \Delta_H = \frac{\bar{H}_0(1+q_t)}{Z} - H_{0ср} = \frac{494.7(1+0.00406)}{7} - 64.01 = 6.947$$

12. Уточнее теплоперепадов с учетом невязки

$$H_{нов i} = H_i + \Delta_H$$

In [35]:
```
# 12 Уточненные теплоперепады
H_new_vec = H_vec + Delta_H
```

In [36]:
```
H_new_vec_str = r""
for i in range(0, len(H_new_vec)):
    H_new_vec_str += lstr( r"H_{нов[i]}=H_{[i]} + \Delta_H = [H_i] + [Delta_H] = [H_new]\ кДж/кг").dformat(i=i+1,H_i=H_vec[i],Delta_H=Delta_H,H_new=H_new_vec[i]).get_large()

Math(
    lstr(r"\Large{12. }\\") +
    H_new_vec_str
)
```

Out[36]: 12.

$$H_{нов1} = H_1 + \Delta_H = 66.18 + 6.947 = 73.13\ кДж/кг$$

$$H_{нов2} = H_2 + \Delta_H = 63.04 + 6.947 = 69.99\ кДж/кг$$

$$H_{нов3} = H_3 + \Delta_H = 63.25 + 6.947 = 70.19\ кДж/кг$$

$$H_{нов4} = H_4 + \Delta_H = 63.48 + 6.947 = 70.43\ кДж/кг$$

$$H_{нов5} = H_5 + \Delta_H = 63.74 + 6.947 = 70.69\ кДж/кг$$

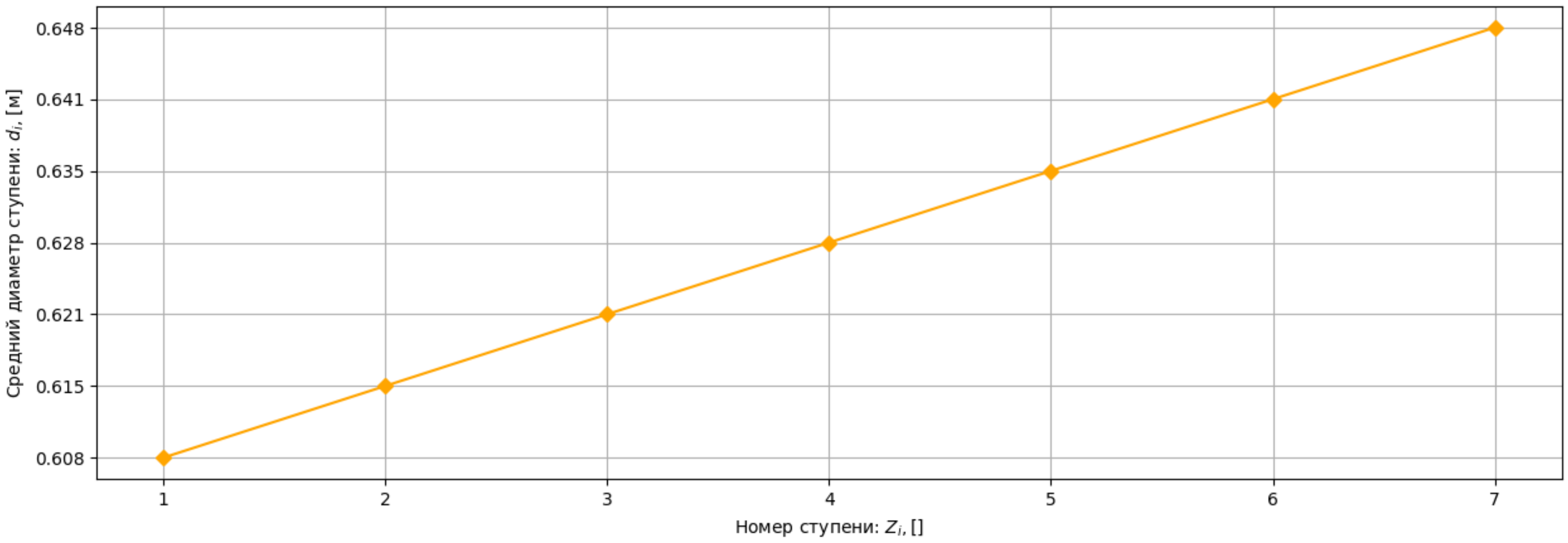
$$H_{нов6} = H_6 + \Delta_H = 64.02 + 6.947 = 70.97\ кДж/кг$$

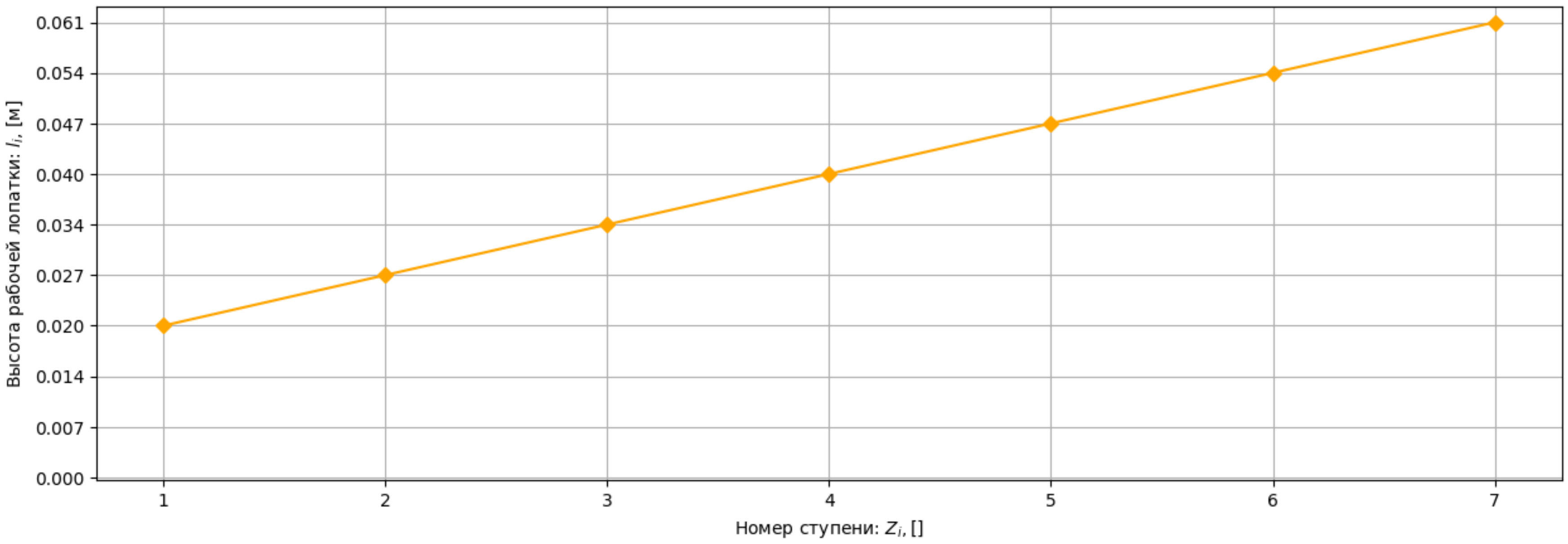
$$H_{нов7} = H_7 + \Delta_H = 64.33 + 6.947 = 71.28\ кДж/кг$$

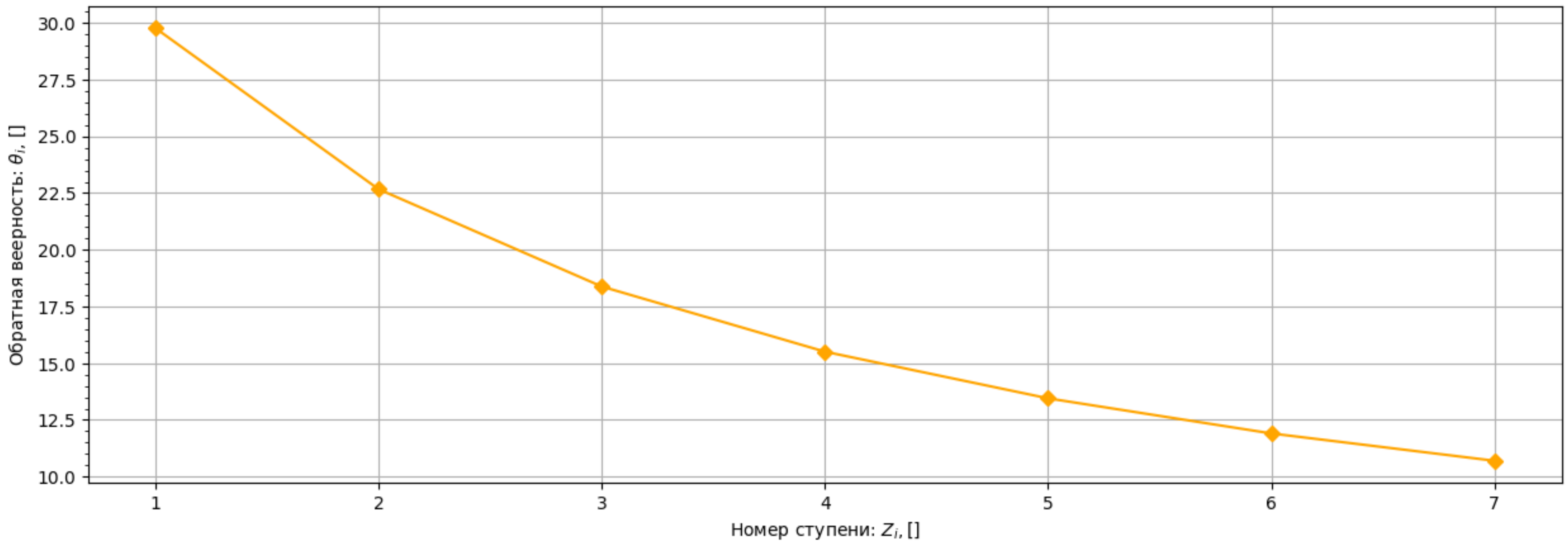
In [37]:
```
def get_index_offset_value(in_vec):
    delta = (in_vec[1] - in_vec[0]).m
    offset_start = in_vec[0].m
    offset_it = 0

    while(offset_start > 0):
        offset_start -= delta
        offset_it += 1
```

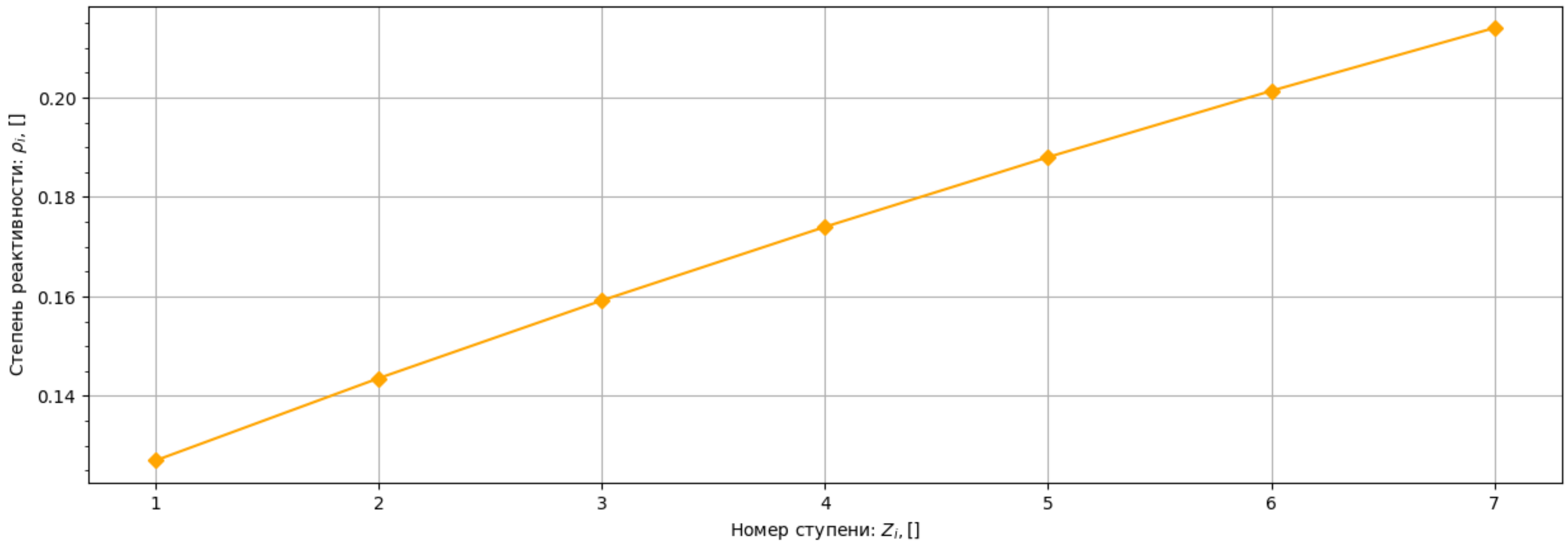
```
    offset_start += delta
    return [delta, -offset_it*delta]

# Графики
fig,axs = plt.subplots(figsize=(15,40),nrows=7, ncols=1)

# Для зависимости диаметров
axs[0].plot(stages_number_vec, d_vec.m, **{'marker': 'D'}, color='orange')
axs[0].set_xlabel('Номер ступени: $Z_{i}, []$')
axs[0].set_ylabel("Средний диаметр ступени: $d_{i}$, [м]", **{'fontname':'sans-serif'})
#axs[0].set_ylim([0,None])
#axs[0].text(1.5,0.837, 'Общее количество ступеней: $Z={}$'.format(Z), **{'fontname':'DejaVu Sans'})
plot_delta_d, plot_offset_d = get_index_offset_value(d_vec)
axs[0].yaxis.set_major_locator(ticker.IndexLocator(base=plot_delta_d, offset= 0))
axs[0].xaxis.set_major_locator(ticker.IndexLocator(base=1, offset=0))
axs[0].grid(True)

# # Для зависимости высот лопаток
axs[1].plot(stages_number_vec, l_vec, **{'marker': 'D'}, color='orange')
axs[1].set_xlabel('Номер ступени: $Z_{i}, []$')
axs[1].set_ylabel('Высота рабочей лопатки: $l_{i}$, [м]', **{'fontname':'sans-serif'})
axs[1].set_ylim([0,None])
# plot_delta_l = l_vec[1] - l_vec[0]
# #plot_delta_l = l_fun_handler.get_no_dim(2) - l_fun_handler.get_no_dim(1)
# offset_l = l_vec[0].m
# offset_it = 0
# while(offset_l > 0):
#     offset_l -= plot_delta_l.m
#     offset_it += 1
# offset_l +=plot_delta_l.m

plot_delta_l, plot_offset_l = get_index_offset_value(l_vec)
axs[1].yaxis.set_major_locator(ticker.IndexLocator(base=plot_delta_l, offset=plot_offset_l))
#axs[1].yaxis.set_major_locator(ticker.LinearLocator())
axs[1].xaxis.set_major_locator(ticker.IndexLocator(base=1, offset=0))
axs[1].grid(True)

# Для обратной веерности
axs[2].plot(stages_number_vec, theta_vec, **{'marker': 'D'}, color='orange')
axs[2].set_xlabel('Номер ступени: $Z_{i}, []$')
axs[2].set_ylabel('Обратная веерность: $\\theta_{i}$, []', **{'fontname':'sans-serif'})
axs[2].yaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(5))
axs[2].minorticks_on()
axs[2].xaxis.set_minor_locator(plt.NullLocator())
axs[2].xaxis.set_major_locator(ticker.IndexLocator(base=1, offset=0))
axs[2].grid(True)

# Для степени реактивности
axs[3].plot(stages_number_vec, rho_vec, **{'marker': 'D'}, color='orange')
axs[3].set_xlabel('Номер ступени: $Z_{i}, []$')
axs[3].set_ylabel('Степень реактивности: $\\rho_{i}$, []', **{'fontname':'sans-serif'})
axs[3].xaxis.set_major_locator(ticker.IndexLocator(base=1, offset=0))
plot_delta_rho = rho_vec[1] - rho_vec[0]
axs[3].yaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(5))
axs[3].minorticks_on()
axs[3].xaxis.set_minor_locator(plt.NullLocator())
axs[3].grid(True)

# Для отношения U/c_f
axs[4].plot(stages_number_vec, uDIVc_f_vec, **{'marker': 'D'}, color='orange')
axs[4].set_xlabel('Номер ступени: $Z_{i}, []$')
axs[4].set_ylabel('$(u/c_{ф})_{i}$, []', **{'fontname':'sans-serif'})
axs[4].minorticks_on()
axs[4].xaxis.set_major_locator(ticker.IndexLocator(base=1, offset=0))
axs[4].yaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(5))
axs[4].xaxis.set_minor_locator(plt.NullLocator())
axs[4].grid(True)

# Для теплоперепадов
axs[5].plot(stages_number_vec, H_vec, **{'marker': 'D'}, color='orange')
axs[5].set_xlabel('Номер ступени: $Z_{i}, []$')
axs[5].set_ylabel('$H_i$, [кДж/кг]', **{'fontname':'sans-serif'})
#axs[5].xaxis.set_major_locator(ticker.IndexLocator(base=1, offset=0))
axs[5].minorticks_on()
axs[5].xaxis.set_minor_locator(plt.NullLocator())

#axs[5].yaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(Z.m + 2))

axs[5].grid(True)

# Для теплоперепадов с учетом невязки
axs[6].plot(stages_number_vec, H_new_vec, **{'marker': 'D'}, color='orange')
axs[6].set_xlabel('Номер ступени: $Z_{i}, []$')
axs[6].set_ylabel('$H_{i} + \\Delta$, [кДж/кг]', **{'fontname':'sans-serif'})
axs[6].minorticks_on()
#axs[6].xaxis.set_major_locator(ticker.IndexLocator(base=1, offset=0))
#axs[6].yaxis.set_minor_locator(ticker.MultipleLocator(Z.m + 2))
axs[6].xaxis.set_minor_locator(plt.NullLocator())


axs[6].grid(True)
```

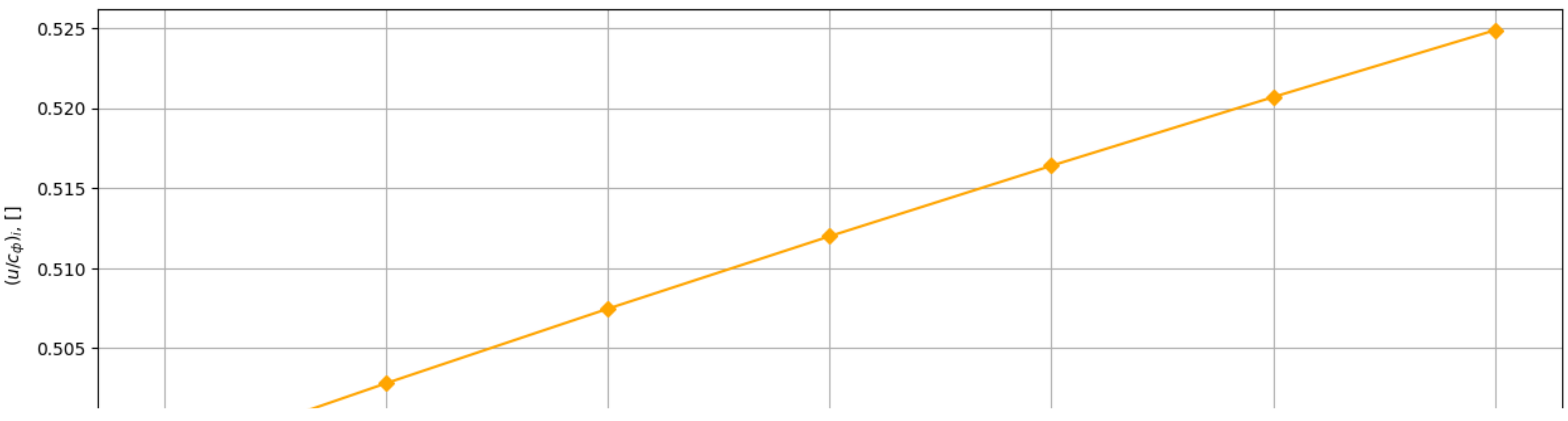
```
C:\prog\py\lib\site-packages\matplotlib\cbook\__init__.py:1369: UnitStrippedWarning: The unit of the quantity is stripped when downcasting to ndarray.
  return np.asarray(x, float)
```


0.648
0.641
0.635
0.628
0.621
0.615
0.608
Средний диаметр ступени: d_i, [м]
1 2 3 4 5 6 7
Номер ступени: Z_i, []


0.061
0.054
0.047
0.040
0.034
0.027
0.020
0.014
0.007
0.000
Высота рабочей лопатки: l_i, [м]
1 2 3 4 5 6 7
Номер ступени: Z_i, []


30.0
27.5
25.0
22.5
20.0
17.5
15.0
12.5
10.0
Обратная веерность: θ_i, []
1 2 3 4 5 6 7
Номер ступени: Z_i, []


0.20
0.18
0.16
0.14
Степень реактивности: ρ_i, []
1 2 3 4 5 6 7
Номер ступени: Z_i, []


0.525
0.520
0.515
0.510
0.505
$(u/c_\phi)_i$, []