

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

## **Проектирование центробежного компрессора с применением технологии оптимизации *IOSO***

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка технологии создания виртуального ГТД и проектирование на ее основе микрогазотурбинного двигателя»

Соглашение № 2/12от 03 июня 2013 г.

С А М А Р А

2013

УДК СГАУ: 621.515 (075)  
ББК: 39.55  
П 791

Авторы: Батури́н Олег Витальевич  
Колмакова Дарья Алексеевна  
Матвеев Валерий Николаевич  
Попов Григорий Михайлович

Редакторская обработка: О. В. Батури́н  
Компьютерная верстка: О. В. Батури́н  
Доверстка: О. В. Батури́н

**Проектирование центробежного компрессора с применением технологии оптимизации IOSO:** электрон.учеб. пособие / О. В. Батури́н, Д. А. Колмакова, В. Н. Матвеев, Г. М. Попов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон.текстовые и граф. дан. (2,4- Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт.диск (CD-ROM).

В учебном пособии приводится пошаговая методика проектного расчета ступени центробежного компрессора. Показано, что из-за большого количества противоречиво влияющих исходных данных, а также существующих прочностных, технологических и конструктивных ограничений создание высокоэффективного компрессора является сложной задачей. Данную проблему предлагается решать с привлечением программ оптимизации. Методическое пособие содержит подробную инструкцию по поиску оптимального сочетания параметров рабочего процесса компрессора с помощью программы IOSO.

Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов, обучающихся по специальности 160302.65 «Авиационные двигатели и энергетические установки» (ФГОС-2), изучающих дисциплины «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок», «Теория и расчет лопаточных машин», в 6 и 7 семестрах, для специалистов, обучающихся по специальности 140501.65 «Двигатели внутреннего сгорания» (ФГОС-2), изучающих дисциплину «Агрегаты наддува двигателей» в 6 и 7 семестрах; для магистров по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов» (ФГОС-3), изучающих дисциплины «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок», «Теория и расчет лопаточных машин», в 6 и 7 семестрах, для бакалавров по направлению 141100.62 "Энергетическое машиностроение" (ФГОС-3), изучающих дисциплину «Агрегаты наддува двигателей» в 6 и 7 семестрах.

Разработано на кафедре теории двигателей летательных аппаратов

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

	Оглавление
Основные условные обозначения	4
Введение	7
1. Исходные данные для проектирования ступени центробежного компрессора	12
2. Методика проектного газодинамического расчета ступени центробежного компрессора	16
2.1. Расчёт основных параметров и геометрии РК	17
2.2. Расчёт параметров потока на входе в РК по высоте проточной части	22
2.3. Расчёт параметров на выходе РК	24
2.4. Проектирование безлопаточного диффузора	30
2.5. Расчет лопаточного диффузора	34
3. Поиск оптимального сочетания параметров рабочего процесса ступени центробежного компрессора с применением технологии <i>IOSO</i>	38
Список использованных источников	60
Приложение	62

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$c$	— скорость воздуха или газа в абсолютном движении, м/с;
$D$	— диаметр, м;
$F$	— площадь проходного сечения, м <sup>2</sup> ;
$G$	— массовый расход воздуха или газа, кг/с;
$H_{th}$	— теоретический напор, создаваемый компрессором, Дж/кг;
$H_U$	— теоретическая работа турбины, Дж/кг;
$h$	— высота лопатки, м;
$i$	— энтальпия, Дж/кг;
$k$	— показатель изэнтропы;
$L_K$	— удельная работа компрессора, Дж/кг;
$L_T$	— удельная работа турбины, Дж/кг;
$m$	— масса, кг;
$M$	— число Маха (отношение скорости потока к скорости звука), крутящий момент, Н · м;
$N_K$	— мощность привода компрессора, кВт;
$N_T$	— мощность на валу турбины, кВт;
$n$	— частота вращения, мин <sup>-1</sup> ; показатель политропы;
$p$	— давление, Па;
$P$	— сила, Н;
$Q$	— тепло, Дж/кг;
$R$	— универсальная газовая постоянная, Дж/(кг К);
$T$	— температура, К;
$t$	— шаг, мм;
$u$	— окружная скорость колеса, м/с;
$w$	— скорость в относительном движении, м/с;
$z$	— число ступеней; число лопаток;
$\alpha$	— углы потока и лопаток в абсолютном движении, град;
$\beta$	— углы потока и лопаток в относительном движении, град;
$\delta$	— радиальный зазор, мм;
$\rho$	— плотность, кг/м <sup>3</sup> ;

$\sigma$	— коэффициент восстановления полного давления;
$\eta$	— коэффициент полезного действия (КПД);
$\lambda$	— приведенная скорость;
$\pi_k^*$	— степень повышения давления в компрессоре;
$\omega$	— угловая скорость, рад/с;

### Индексы

*	— заторможенные параметры;
<i>a</i>	— осевое направление;
<i>в</i>	— вход, воздух;
<i>к</i>	— на выходе из компрессора;
<i>н</i>	— теоретический, параметры атмосферного воздуха;
<i>на</i>	— относящийся к направляющему аппарату;
<i>пр</i>	— приведенный;
<i>рк</i>	— относящийся к рабочему колесу;
<i>ст</i>	— ступень;
<i>ср</i>	— средний;
<i>т</i>	— турбина, теоретический;
<i>г</i>	— радиальный;
<i>s</i>	— изэнтропический;
<i>и</i>	— окружная проекция;
<i>w</i>	— относительный;
<i>z</i>	- затраченный;
<i>1</i>	— сечение на входе в рабочее колесо;
<i>2</i>	— сечение на выходе из РК;
<i>3</i>	— сечение на выходе из направляющего аппарата.

### Условные сокращения

ВНА	— входной направляющий аппарат;
ВМ	— верхнее меню;
ГТД	— газотурбинный двигатель;
ГТУ	— газотурбинная установка;
КПД	— коэффициент полезного действия;
ЛВ	— лопаточный венец;
ЛД	— лопаточный диффузор;

ЛКМ	— левая кнопка мыши;
ЛМ	— лопаточная машина;
НА	— направляющий аппарат;
ПКМ	— правая кнопка мыши;
РЗ	— радиальный зазор;
РК	— рабочее колесо;
СК	— система координат;
ТРД	— турбореактивный двигатель;
ЦБК	— центробежный компрессор;
<i>CFD</i>	— англ. аббр. <i>ComputationalFluidDynamics</i> ) –принятое в мире сокращение термина «вычислительная газовая динамика».

Остальные обозначения, индексы и условные сокращения объяснены в тексте.

## ВВЕДЕНИЕ

Компрессоры разных типов широко применяются в промышленности для повышения давления газов и их перемещения. Значительную часть среди используемых них занимают центробежные компрессоры. Они широко применяются в агрегатах наддува ДВС, газотурбинных двигателях и установках разного назначения, в холодильных установках, в химической нефтяной и газовой промышленности и др.

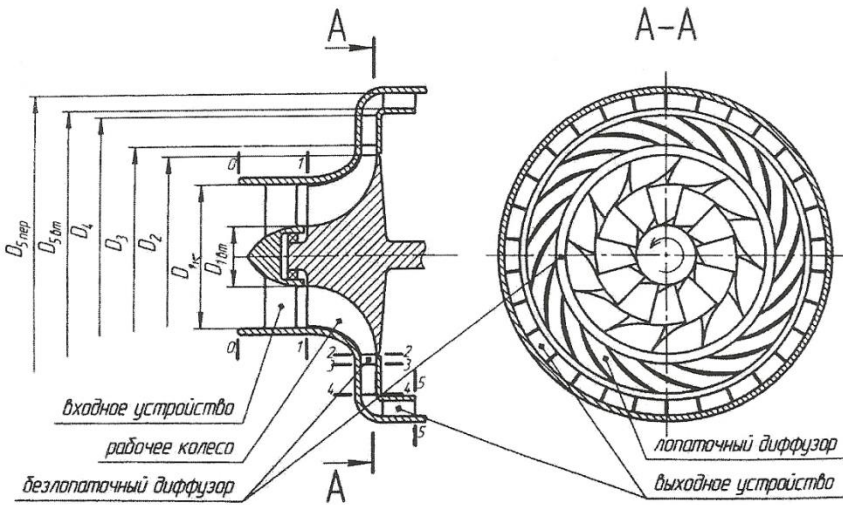
Главным отличием центробежных компрессоров от осевых является траектория движения рабочего тела. Оно движется от центра к периферии («бежит от центра»). При этом линии тока на выходе обычно располагаются в плоскостях, перпендикулярных оси лопаточной машины [1]. Внешний вид РК и ступени центробежного компрессора показаны на рис. 1 и 2.

Главным достоинством центробежного компрессора по сравнению с осевым является возможность получать большие значения степени сжатия  $\pi_k^*$  в одной ступени. Зачастую, она превышает величину 5...6, а в перспективных авиационных компрессорах может достигать величины 12 [3]. Суммарная степень сжатия промышленных многоступенчатых центробежных компрессоров может достигать 3000 [4]. КПД ступени центробежного компрессора  $\eta_k^*$  может достигать значения 0,85 [1, 2], что меньше чем в осевом. Величины КПД близкие к названной величине характерны для компрессоров авиационных ГТД относительно большой произ-



*Рис. 1. Рабочее колесо центробежного компрессора [3]*

водительности. Однако, в отличие от осевых компрессоров, при уменьшении размерности компрессора по расходу и, как следствие, уменьшении высот лопаток, падение КПД центробежных не столь значительно. Поэтому основная область применения ЦБК – ГТУ с небольшими расходами рабочего тела и относительно небольшими степенями сжатия  $\pi_k^* = 1,5 \dots 10$ . В этой области центробежный компрессор превосходит осевой по КПД и по массе при одинаковой степени сжатия [1].



**Рис.2. Схема ступени центробежного компрессора**

К числу достоинств ЦБК относятся также относительная простота конструкции, меньшее число деталей, более благоприятное протекание характеристики и меньшая чувствительность к условиям эксплуатации [1].

К недостаткам этого типа компрессора следует отнести меньший уровень КПД по сравнению с осевыми, и сложность организации многоступенчатого сжатия без существенного роста массы и диаметральных размеров. Кроме того размеры ЦБК растут прямо пропорционально расходу воздуха через них. Это еще одна причина, по которой область ЦБК широко применяются в установках ограничивается малыми расходами рабочего тела ( $G_0 < 10 \text{ кг/сек}$ ) [1].



Поскольку центробежные компрессоры широко распространены в технике, то даже незначительное повышение их КПД приводит к существенной экономии средств в рамках отдельных предприятий и отраслей, а также страны в целом. В этой связи становится актуальным создание новых высокоэффективных компрессоров.

Процесс проектирования новой ступени центробежного компрессора состоит в поиске таких ее геометрических и кинематических параметров, при которых достигается заданная степень сжатия, при минимальных габаритах, массе, стоимости, а также обеспечиваются высокая эффективность ее работы и надежность в течение заданного ресурса.

Очевидно, что спроектированный компрессор, и каждый его элемент, должен быть достаточно прочным, чтобы отработать требуемый ресурс без повреждений, критичных для работоспособности изделия, при этом иметь малый вес. Детали компрессора должны быть легкими в изготовлении, их число должно быть минимальным, что в свою очередь определяет время изготовления и себестоимость изделий. Технологические отклонения должны мало влиять на эффективность компрессора. Он должен обеспечивать благоприятное протекание характеристик, что позволит обеспечить заданные характеристики установки в целом.

Процесс проектирования ступени центробежного компрессора состоит из нескольких этапов. На первом этапе производится выбор наиболее рационального сочетания параметров рабочего процесса компрессора, которое позволяет потенциально достигнуть высокого КПД с учетом наличия конструктивных, прочностных и технологических ограничений. На данном этапе определяется меридиональная форма проточной части и планов скоростей. Хотя данный расчет производится с помощью относительно простых одно и двухмерных методик он имеет высокое значение, поскольку эффективность компрессора на 60.....80% именно кинематикой потока.

На следующем этапе проводится профилирование лопаточных венцов. Задача данного этапа - найти такую форму лопаток ступени компрессора, которые позволят обеспечить то направление и величину скоростей потока в тракте, которые были получены для варианта компрессора принятого на первом этапе при удовлетворении основным ограничениям.

На третьем этапе течение в межлопаточных каналах исследуется с помощью *CFD* методов. По результатам данного анализа, в случае наличия в каналах зон с неблагоприятной структуры потока, принимается решение о перепрофилировании лопаток. Затем течение в новом варианте исследуется и процесс повторяется. В конечном итоге проектировщик должен добиться, чтобы планы скоростей максимально приблизились к желаемым, при достижении или уменьшении принятого уровня потерь. В целом данный этап сильно схож с традиционной экспериментальной доводкой с тем отличием, что вместо реального компрессора исследуется его физико-математическая (*CFD*) модель высокого уровня. Также важно отметить, что над проектировщиком не довлеет материальный фактор, и он может рассмотреть варианты исполнения турбомашин, существенно отличающиеся от первоначального, и таким образом расширить горизонты поиска.

На четвертом этапе газодинамической доводки изготавливается окончательный вариант компрессора (возможно также еще и 1.....2 альтернативных варианта) и производится экспериментальное подтверждение характеристик, заявленных в ходе компьютерной газодинамической доводки.

Как видно, важнейшим этапом проектирования ступени центробежного компрессора является проектировочный расчет. Действительно если в венце компрессора имеет место высокие скорости, либо резкое торможение никакое даже самое качественное профилирование не сможет исправить ошибки проектного расчета.

Процесс проектирования компрессора с помощью относительно простых одномерных методик на первый взгляд не представляет собой сложную задачу. Однако в действительности это не так, поскольку процесс проектного расчета сводится к поиску оптимума функции большого числа взаимно влияющих друг на друга переменных в условиях ограничений, что представляет собой нетривиальную математическую задачу.

Данная задача может быть решена путем привлечения программ оптимизации, например *IOSO* [5]. Суть данной технологии заключается в том, что производится поиск оптимизируемой величины как максимума/минимума объектной функции нескольких переменных. В качестве

объектной функции может использоваться изменение потерь энергии в ступени, КПД, потерь полного давления и т.п. Функция создается на основе данных серии расчетов с помощью математической модели оптимизируемого процесса разного уровня с учетом действующих ограничений, затем осуществляется поиск ее максимума/минимума. Весь такой расчет протекает в автоматическом режиме без участия пользователя.

В представленном методическом пособии подробно описана методика проектного расчета ступени центробежного компрессора, а также приводится технология поиска оптимального сочетания параметров его рабочего процесса с помощью программы оптимизации *IOSO* версии 2.1.

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

Исходные данные, необходимые для проектирования ступени компрессора условно можно разделить на несколько групп.

Первая группа данных принимается неизменяемыми параметрами рабочего тела на входе в компрессор, найденные по результатам проектного газодинамического расчета, проектировочного расчета турбины или заданные в техническом задании. К этой группе относятся следующие данные:

- полная температура на входе в компрессор -  $T_v^*$ , К;
- полное давление на входе в компрессор -  $p_v^*$ , Па;
- расход рабочего тела на входе в ЦБК  $G_v$ , кг/с;
- расход рабочего тела на выходе из ЦБК (с учетом утечек, отборов и втекании)  $G_k$ , кг/с;
- потребная степень сжатия компрессора -  $\pi_k^*$ ;
- ожидаемый КПД ступени компрессора -  $\eta_k$ ;
- частота вращения ротора –  $n$ , об/мин;
- работа, подводимая к компрессору -  $L_k$ , Дж/кг.

Данная группа определяется параметрами входящего потока, также подводимой энергией и требованиями, предъявляемыми к проектируемому компрессору. Данные исходные данные не будут меняться в процессе расчета.

К этой же группе следует отнести также свойства рабочего тела: показатель адиабаты –  $k$  и универсальную газовую постоянную  $R$ , которые также будут неизменны в ходе расчета. Все остальные комплексы, зависящие от свойств рабочего тела, могут быть рассчитаны с помощью

известных величин  $k$  и  $R$ . Например, изобарная теплоемкость может быть найдена с помощью следующего выражения:

$$c_p = \frac{kR}{k-1}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Для воздуха основные свойства рабочего тела принимаются равными:  $k=1,4$ ;  $R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ,  $c_p = 1005 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

В представленной методике полагается, что свойства рабочего тела не зависят от параметров рабочего процесса и не меняются в процессе расчета.

Ко второй группе параметров относятся переменные, непосредственно определяющие рабочий процесс компрессора и форму его треугольников скоростей, меридионального сечения проточной части и в конечном итоге КПД ступени. Процесс проектирования ступени компрессора состоит как раз в поиске такого их сочетания, которое обеспечит достижение высокого КПД. Поиск такого сочетания осложняется большим числом переменных, а также действующими ограничениями.

К параметрам этой группы следует отнести следующие переменные:

1. Коэффициент теоретического напора:

$$\bar{H}_T = \frac{L_u}{u_2^2}$$

Его величина обычно находится в интервале 0,5 ... 0,8.

2. Конструктивный угол на выходе из РК  $\beta_{2л}$ . Для уменьшения изгибных напряжений, действующих на лопатки ротора их часто выполняют радиальными ( $\beta_{2л}=90^\circ$ ). У высокоэффективных компрессоров величина данного угла, как правило, меньше  $90^\circ$  и составляет  $\beta_{2л}=60...90^\circ$ .

3. Относительный диаметр периферийного сечения на входе в компрессор:

$$\bar{D}_{1к} = \frac{D_{1к}}{D_2}$$

Значение данного параметра обычно находится в диапазоне 0,4 ... 0,95.

4. Относительный диаметр втулочного сечения на входе в компрессор:

$$\bar{D}_{1вт} = \frac{D_{1вт}}{D_2}$$

Величина данного параметра обычно находится в диапазоне 0,25 ... 0,5. Меньшие значения не могут быть реализованы по условию прочности втулки диска и размещения лопаток у входа.

5. Относительная протяженность щелевого диффузора:

$$\bar{D}_3 = \frac{D_3}{D_2}$$

Данная величина характеризует радиальную протяженность безлопаточного щелевого диффузора и обычно находится в диапазоне 1.1...1.35.

6. Относительная протяженность лопаточного диффузора:

$$\bar{D}_4 = \frac{D_4}{D_2}$$

Данная величина характеризует радиальную протяженность лопаточного диффузора (при его наличии) и обычно находится в диапазоне 1.3...1.6. Очевидно, что всегда должно выполняться неравенство  $\bar{D}_4 > \bar{D}_3$ .

7. Коэффициент закрутки потока на входе в РК  $\overline{c_{1u}}$ . Данный параметр говорит о наличии и отсутствии предварительной закрутки потока на входе в РК, а также об относительной величине закрутки. Значение  $\overline{c_{1u}}$  находится в интервале  $-0,2 \dots 0,2$ . Положительные значения соответствуют положительной закрутке, когда направление сектора  $c_{1u}$  совпадает с направлением вращения ротора. Отрицательные значения указывают на отрицательную закрутку. Здесь следует напомнить о том, что закрутка потока на входе в ступень создается входным направляющим аппаратом (ВНА).

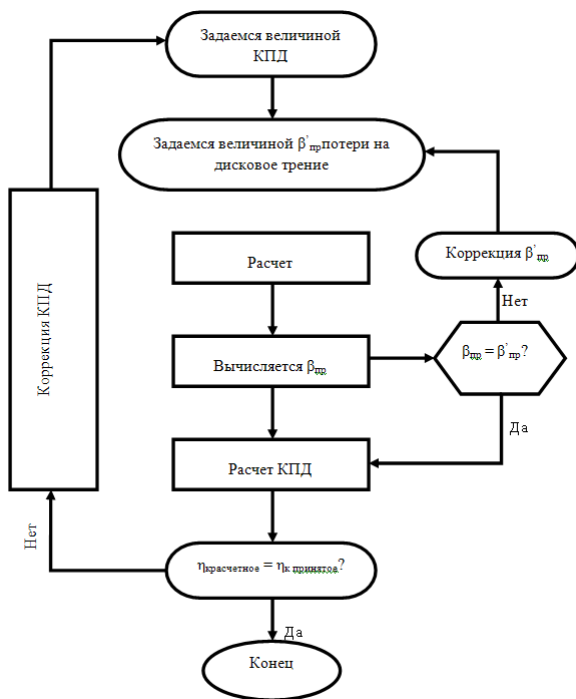
Если  $\overline{c_{1u}} = 0$ , то закрутка отсутствует, и ступень не имеет ВНА.

При выборе исходных данных второй группы следует помнить, что в первом приближении их выбор весьма приблизителен и не является окончательным. Они могут быть многократно уточнены в ходе проектирования

по результатам аэродинамического, гидравлического, прочностного, экономического расчетов, проработки конструкции и технологии изготовления элементов. По этой причине газодинамические расчеты турбины могут многократно уточняться с учетом результатов последующих расчетов и ограничений.

## 2. МЕТОДИКА ПРОЕКТНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

В данном разделе приводится последовательность проектного расчета ступени центробежного компрессора. Схема алгоритма использованной методики проектирования приведена на рис. 2.1.



**Рис. 2.1.** Схема алгоритма проектного расчета ступени центробежного компрессора



## 2.1. РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ГЕОМЕТРИИ РК

1. Вычисляется изоэнтальпический напор ступени компрессора:

$$L_{к\delta} = \frac{k}{k-1} RT_{\theta}^* \left( \pi_{\kappa}^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right), \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

2. Определяется затраченный напор ступени компрессора:

$$L_z = L_{к\delta} / \eta_{\kappa}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

3. Оцениваются полное давление и температура на выходе из ступени компрессора:

$$p_{\kappa}^* = p_{\text{в}}^* \cdot \pi_{\kappa}^*, \text{ Па}$$

$$T_{\kappa}^* = T_{\theta}^* + \frac{L_z}{\frac{kR}{k-1}}, \text{ К}$$

4. Вычисляется окружная скорость на выходе из РК:

$$u_2 = \sqrt{\frac{L_z}{H_z}}, \text{ м/с}$$

По соображениям прочности данная величина не должна превышать 550 м/с. В случае применения радиальных рабочих лопаток  $\beta_{2i} = 90^\circ$  допускается окружная скорость на периферии РК до 600 м/с.

5. Находится периферийный диаметр на выходе из РК:

$$D_2 = \frac{60 u_2}{\pi n}, \text{ м}$$

6. Определяется втулочный и периферийный диаметры на входе в РК:

$$D_{1\kappa} = \bar{D}_{1\kappa} \cdot D_2, \text{ м}$$

$$D_{Iem} = \bar{D}_{Iem} \cdot D_2, \text{ м}$$

7. Вычисляются средний диаметр на входе в РК и высота лопатки:

$$D_{Icp} = \frac{D_{Ik} + D_{Iem}}{2}, \text{ м}$$

$$h_l = \frac{D_{Ik} - D_{Iem}}{2}, \text{ м}$$

8. Назначается ширина РК:

$$S = 0,15 \dots 0,35 \cdot D_2, \text{ м}$$

9. Рассчитывается окружная скорость на входе в РК на среднем диаметре:

$$u_{Icp} = \frac{\pi D_{Icp} n}{60}, \text{ м/с}$$

10. Определяется величина условного коэффициента расхода ступени ЦБК:

$$\Phi_p = \frac{4G_g}{\pi \rho_g^* D_2^2 u_2},$$

где  $\rho_g^* = \frac{p_B^*}{RT_B^*}$ .

Нормальное значение условного коэффициента расхода  $\Phi_p = 0,05 \dots 0,12$ .

11. По приведенной ниже формуле оценивается необходимое число лопаток РК:

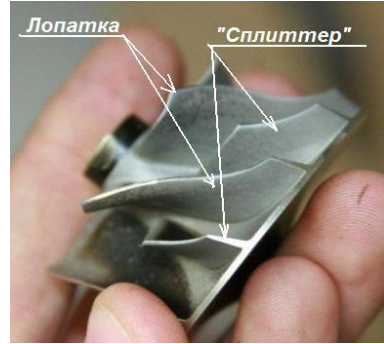
$$z_{PK} = \frac{\beta_{2l}}{4} + \frac{(105 - \beta_{2l}) \cdot (\beta_{2l} - 10)}{200}$$

Приблизительное число лопаток также может быть оценено с помощью формулы Дена:

$$z_{PK} = 10\pi \cdot \sin\beta_{2L}, \text{ шт}$$

Полученное предварительно число лопаток округляется до целых значений. При округлении следует стремиться к простым нечетным числам.

Если число лопаток более 15, имеет смысл для уменьшения нагрузки на диск и упрощения размещения лопаток во входной части целесообразно использовать сплиттеры (рис. 2.2). В этом случае число лопаток должно быть четным. Оно будет



**Рис. 2.2. Лопатки и сплиттеры**

соответствовать числу лопаток на выходе РК. На входе число лопаток будет вдвое меньшим.

12. Задаваясь в первом приближении углом входа потока в РК в относительном движении  $\beta_{1cp}$ , находится площадь проходного сечения на входе в РК:

$$F_{1a} = \frac{\pi}{4} (D_{1K}^2 - D_{1em}^2) - z_{PK} \cdot \frac{l}{2} \cdot b_l \cdot \frac{(t_k + t_{em})}{\sin\beta_{1cp}}, \text{ м}^2$$

13. Находится значение ГДФ  $q(\lambda_{c_{1a}})$ :

$$q(\lambda_{c_{1a}}) = \frac{G_e \sqrt{T_6^*}}{m \cdot p_6^* F_{1a}},$$

$$\text{где } \text{дем} = \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} = 0,04.$$

По величине  $q(\lambda_{c_{1a}})$  с помощью таблиц ГДФ (прил. 1) находится значение  $\lambda_{c_{1a}}$ .

14. Вычисляется осевая проекция скорости на входе в РК:

$$c_{1a} = \lambda_{c_{1a}} \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} R T_1^*}, \text{ м/с}$$

Оптимальное значение относительной осевой проекции  $c_{1a}/u_2$  находится в интервале  $0,25 \dots 0,35$ .

15. Рассчитывается окружная составляющая абсолютной скорости на входе в РК:

$$c_{1u} = \left( \frac{c_{1u}}{u_{1cp}} \right) \cdot u_{1cp}, \text{ м/с}$$

16. Определяется величина абсолютной скорости на входе в РК:

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1u}^2}, \text{ м/с}$$

17. Находится угол входа потока в РК в абсолютном движении:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{c_{1a}}{c_{1u}}, \text{ град}$$

18. Вычисляется приведённая абсолютная скорость на входе в РК:

$$\lambda_{c_1} = \frac{c_1}{\sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} R T_1^*}}$$

Зная величину  $\lambda_{c_1}$ , по таблицам ГДФ (прил. 1) легко найти значения функций  $\tau(\lambda_{c_1})$  и  $\pi(\lambda_{c_1})$ .

19. Рассчитываются величины статических давлений и температуры на входе в РК, а также плотности потока там:

$$p_1 = p_1^* \cdot \pi(\lambda_{c_1}), \text{ Па}$$

$$T_1 = T_1^* \cdot \tau(\lambda_{c_1}), \text{ К}$$

$$\rho_I = \frac{p_1}{RT_I}, \text{ кг/м}^3$$

20. Находится окружная составляющая относительной скорости на входе в РК:

$$\text{если } c_{1u} > 0 \quad w_{1u} = u_{1cp} - c_{1u}, \text{ м/с}$$

$$\text{если } c_{1u} < 0 \quad w_{1u} = u_{1cp} + c_{1u}, \text{ м/с}$$

21. Определяется относительная скорость на входе в РК на среднем диаметре:

$$w_I = \sqrt{w_{1u}^2 + c_{1a}^2}, \text{ м/с}$$

22. Рассчитывается угол входа потока в РК в относительном движении на среднем диаметре:

$$\beta_I = \arctg \frac{c_{1a}}{w_{1u}}, \text{ град}$$

Полученное значение сравнивается с принятым на шаге 12 и, при необходимости, расчёт корректируется.

23. Вычисляется температура потока на входе в РК, заторможенная в относительном движении:

$$T_{Iw}^* = T_I + \frac{w_I^2}{\frac{2k}{k-1}R}, \text{ К}$$

24. Оценивается величина приведённой относительной скорости на входе в РК на среднем диаметре:

$$\lambda_{w_I} = \frac{w_{Icp}}{\sqrt{\frac{2k}{k+1}RT_{Iw}^*}}$$

По этой величине с помощью таблиц ГДФ (прил. 1) находится значение функции  $\pi(\lambda_{w_j})$ .

25. Рассчитывается давление потока, заторможенного в относительной СК на входе в РК:

$$T_{Iw}^* = p_j / \pi(\lambda_{w_j}), \text{ Па}$$

## 2.2. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА НА ВХОДЕ В РК ПО ВЫСОТЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

В предлагаемой методике проектирования ступени центробежного компрессора полагается, что параметры потока по выоте РК на входе изменяются по закону постоянства циркуляции  $c_u \cdot r = const$ . Особенностью данного закона является постоянство по высоте сечения осевой скорости  $c_{1a_{cp}} = c_{1a_i} = const$ .

26. Выбирается несколько сечений, равномерно расположенных по высоте лопатки. Зная значения втулочного и периферийного диаметров  $D_{Iem}$  и  $D_{Ik}$  на входе, диаметры легко рассчитать по формуле:

$$D_{Ii} = D_{Iem} + \frac{D_{Ik} - D_{Iem}}{z - 1} (i - 1), \text{ м}$$

где  $i$  – номер сечения;

$z$  – число сечений по высоте лопатки (обычно 3...10).

27. Определяется окружная скорость на входе в РК в контрольных сечениях:

$$u_i = \frac{\pi D_{Ii} n}{60}, \text{ м/с}$$

28. Осевая проекция абсолютной скорости на входе одинакова во всех сечениях:

$$c_{1ai} = c_{1a_{cp}}, \text{ м/с}$$

29. Рассчитывается окружная составляющая абсолютной скорости на входе в РК в контрольных сечениях:

$$c_{1ui} = \frac{c_{1ucp} \cdot D_{1cp}}{D_{cpi}}, \text{ м/с}$$

30. Вычисляется абсолютная скорость на входе в РК в контрольных сечениях:

$$c_{1i} = \sqrt{c_{1ui}^2 + c_{1ai}^2}, \text{ м/с}$$

31. Находится окружная составляющая относительной скорости на входе в РК в контрольных сечениях:

если  $c_{1ui} > 0$   $w_{1ui} = u_{1cpi} - c_{1ui}, \text{ м/с}$

если  $c_{1ui} < 0$   $w_{1ui} = u_{1cpi} + c_{1ui}, \text{ м/с}$

32. Рассчитывается относительная скорость на входе в РК в контрольных сечениях:

$$w_{1i} = \sqrt{w_{1ui}^2 + c_{1ai}^2}, \text{ м/с}$$

33. Определяется температура потока, заторможенного на входе в РК в относительном движении рассматриваемых сечениях:

$$T_{1wi}^* = T_{1cp} + \frac{w_{1i}^2}{\frac{2k}{k-1}R}, \text{ К}$$

34. Рассчитывается приведённая относительная скорость потока на входе в РК в контрольных сечениях:

$$\lambda_{w_{1i}} = \frac{w_{1i}}{\sqrt{\frac{2k}{k-1}RT_{1w}^*}}$$

На периферии данная величина не должна превышать значения 1.15.

35. Рассчитывается угол входа потока в РК в относительном движении в контрольных сечениях:

$$\beta_{li} = \arctg \frac{c_{lai}}{w_{lui}}, \text{ град}$$

По технологическим причинам на периферии величина  $\beta_{li}$  не должна превышать 25°. Величина лопаточного (конструктивного) угла на входе в РК равна:

$$\beta_{1li} = \beta_{li} + i_i, \text{ град}$$

где  $i$  – угол атаки;  $i = 0 \dots 4$ .

### 2.3. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ НА ВЫХОДЕ РК

36. По величине теоретического напора находится окружная проекция абсолютной скорости на выходе из РК:

$$c_{2u} = \frac{\frac{L_z}{1 + \beta_{mp}} - c_{1ucp} u_1}{u_2}, \text{ м/с}$$

где  $\beta_{mp}$  – коэффициент, учитывающий потери дискового трения и утечки в РЗ. В первом приближении данная величина может быть выбрана из диапазона 1,01 … 1,08. В дальнейшем она будет уточнена.

37. По эмпирическим формулам оценивается величина коэффициента отставания потока:

$$\mu = 1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_{2l}}}{z_{pk}^{0.7}} \text{ (формула Виснера)}$$

Величина коэффициента отставания потока может быть оценена также по другим формулам:



$$\mu = 1 - \frac{\pi \sin \beta_{2л}}{z_{ПК}} \quad (\text{формула Стодола})$$

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \frac{\pi}{z_{ПК}} \frac{1}{1 - \left(\frac{D_{1К}}{D_2}\right)^3}}$$

$$\mu = 1 - \frac{0,63 \pi}{z_{ПК}} \quad (\text{формула Станица})$$

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{1,2 (1 + \sin \beta_{2л})}{z_{ПК} \sqrt{1 - \left(\frac{D_{1К}}{D_2}\right)^3}}$$

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{1,4 + 2,7 \frac{\beta_{2л}}{90}}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_{1К}}{D_2}\right)^3}} z_{ПК}}$$

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{\pi \sin \beta_{2л}}{2 z_{ПК} \left(1 - \frac{D_{1К}}{D_2}\right)}}$$

38. Определяется окружная проекция абсолютной скорости на выходе из РК при бесконечном числе лопаток:

$$c_{2u\infty} = \frac{c_{2u}}{\mu}, \text{ м/с}$$

39. Рассчитывается окружная проекция относительной скорости на выходе из РК при бесконечном числе лопаток:

$$w_{2u\infty} = u_2 - c_{2u\infty}, \text{ м/с}$$

40. Находится радиальная проекция скорости на выходе их РК:

$$c_{2r} = w_{2r} = w_{2u\infty} \cdot \operatorname{tg} \beta_{2л}, \text{ м/с}$$

Для достижения высокой эффективности РК ЦБК рекомендуется, чтобы величина отношения  $c_{2R}/c_{1a}$  находилась в диапазоне  $0,8 \dots 1,2$ .

41. Вычисляется угол выхода потока их РК в абсолютном движении:

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{c_{2r}}{c_{2u}}, \text{ град}$$

Рекомендуемое значение данного угла находится в диапазоне  $10...20^\circ$ .

42. Определяется реальная окружная составляющая относительной скорости на выходе из РК:

$$w_{2u} = u_2 - c_{2u}, \text{ м/с}$$

43. Рассчитывается угол выхода потока из РК в относительном движении:

$$\beta_2 = \arctg \frac{c_{2r}}{w_{2u}}, \text{ град}$$

44. Относительная и абсолютная скорости на выходе РК соответственно равны:

$$w_2 = \sqrt{w_{2u}^2 + w_{2R}^2}, \text{ м/с}$$

$$c_2 = \sqrt{c_{2u}^2 + c_{2R}^2}, \text{ м/с}$$

Для достижения высокой эффективности торможение потока в относительном движении в РК ЦБК должно находиться в диапазоне  $0,45...0,75$ .

45. Вычисляется статическая температура на выходе РК:

$$T_2 = T_1 + \frac{L_z}{\left(\frac{k}{k-1} R\right)} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{\frac{2k}{k-1} R}, \text{ К}$$

46. Находится статическое давление на выходе из РК:

$$p_2 = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1} \eta_k} \cdot p_1, \text{ Па}$$

47. Определяется плотность рабочего тела на выходе РК:

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R \cdot T_2}, \text{ кг/м}^3$$

48. Рассчитываются температуры потока на выходе РК, заторможенные в абсолютной и относительной СК:

$$T_2^* = T_2 + \frac{c_2^2}{2k \cdot R}, K$$

$$T_{2w}^* = T_2 + \frac{w_2^2}{2k \cdot R}, K;$$

49. Оцениваются приведённые абсолютные и относительные скорости потока на выходе РК:

$$\lambda_{c_2} = \frac{c_2}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} R T_2^*}}$$

$$\lambda_{w_2} = \frac{w_2}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} R T_{2w}^*}}$$

По найденным значениям находятся величины ГДФ (прил. 1)  $\pi(\lambda_{c_2})$  и  $\pi(\lambda_{w_2})$ .

50. Вычисляются давления рабочего тела заторможенного в абсолютном и относительном движениях:

$$p_2^* = p_2 / \pi(\lambda_{c_2}), \text{ Па}$$

$$p_{2w}^* = p_2 / \pi(\lambda_{w_2}), \text{ Па}$$

Тогда степень сжатия РК равна:

$$\pi_{\text{рк}}^* = \frac{p_2^*}{p_{\text{в}}^*}$$

51. Определяется площадь проходного сечения проточной части на выходе ПК:

$$F_{2a} = \frac{G_B}{c_{2R} \rho_2}, \text{ м}^2$$

52. Высота лопаток ПК на выходе с учетом загромождения тракта кромками лопаток находится следующим образом:

$$h_2 = \frac{F_{2a}}{\pi D_2 \cdot \frac{z_{pk}(t_k + t_{em})}{2 \sin \beta_{2a}}}, \text{ м}$$

С целью недопущения высоких потерь не рекомендуется делать лопатки высотой менее 5мм. Кроме того по условиям проточности лопаток относительная высота лопатки  $b_2/D_2$  не должна превышать значение 0,15.

По имеющимся на данный момент данным можно построить эскиз меридионального сечения ПК (рис. 3).

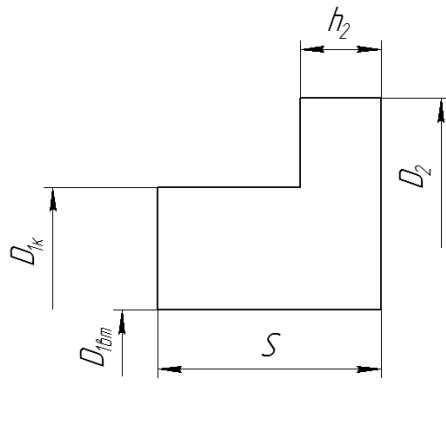


Рис. 3. Эскиз меридионального сечения ПК

53. Уточняется величина коэффициента, учитывающего дисковые потери и утечки в РЗ:

$$\Delta\beta_{mp} = \frac{0,172}{10^3 \cdot \bar{H}_z \cdot \frac{c_{uR}}{u_2} \cdot \frac{b_2}{D_2}}$$

Данная величина сравнивается с принятой в п.36 и при необходимости корректируется и расчет посторяется до их совпадения с точностью до 1%.

54. Находится степень реактивности проектируемой ступени:

$$\rho_{cm} = 1 - \frac{c_2^2 - c_1^2}{2u_2 \cdot c_{2u}}$$

55. Определяются профильные потери в РК:

$$\Delta h_{проф} = \xi_{проф} \frac{w_{1cp}^2}{2}, \text{ Дж/кг},$$

где  $\xi_{проф} = 0,1R_o^2 D_f^2$ ,

$R_o = \frac{u_2}{w_{1к}}$  - критерий Россби;

$D_f$  - фактор диффузорности канала:

$$D_f = 1 - \frac{w_2}{w_{1к}} + \frac{k_{\text{э}} \bar{H}_z R_o}{\frac{z_{PK}}{\pi} \left(1 - \frac{D_{1к}}{D_2}\right) + 2 \frac{D_{1к}}{D_2}}$$

$k_{\text{э}} = 0,6$  - для однорядного РК (обычно);

$k_{\text{э}} = 0,75$  - для РК со сплиттерами.

56. Рассчитываются потери при сходе потока с РК:

$$\Delta h_{вых} = \frac{1}{2} \left( c_{2R} - \frac{\Phi_p u_2}{4 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{b_2}{D_2}} \right)^2, \text{ Дж/кг}$$

57. Вычисляется КПД рабочего колеса ЦБК:

$$\eta_{PK} = 1 - \frac{\Delta h_{проф} + \Delta h_{вых} + (L_u \beta_{np})}{L_u (1 + \beta_{np})},$$

где  $L_u = c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1$ , Дж/кг – работа подведенная рабочим колесом к потоку.

Нормальная величина КПД РК – 93...88%.

## 2.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕЗЛОПАТОЧНОГО ДИФFUЗОРА

58. По величине  $b_2/D_2$  выбирается значение относительной высоты канала БЛД:

$$\text{если } b_2/D_2 > 0,06$$

$$h_3/h_2 = 0,77 \dots 0,8$$

$$0,04 < b_2/D_2 < 0,06$$

$$h_3/h_2 = 1$$

$$\text{если } b_2/D_2 < 0,04$$

$$h_3/h_2 = 1,1 \dots 1,25$$

Тогда абсолютная высота канала БЛД равна:

$$h_3 = b_2 \cdot (h_3/h_2), \text{ мм}$$

59. Назначается диаметр, на котором происходит изменение ширины канала (рис. 4):

$$D_2' = \left( D_2'/D_2 \right) \cdot D_2, \text{ м,}$$

где  $D_2'/D_2 = 1 \dots 1,05$ .

60. Находится наружный диаметр БЛД:

$$D_3 = \left( D_3/D_2 \right) \cdot D_2, \text{ м}$$

где величина относительной радиальной протяженности БЛД  $D_3/D_2$  выбирается из диапазона  $1,1 \dots 1,5$ .

61. Вычисляется площадь проходного сечения на выходе из БЛД:

$$F_{3r} = \pi \cdot D_3 \cdot b_3, \text{ м}^2$$

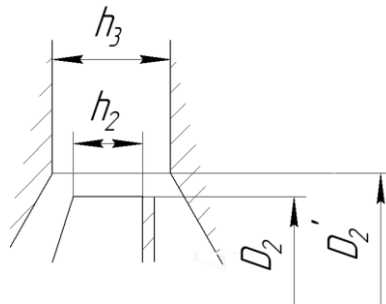


Рис. 4. Характерные размеры на входе в безлопаточный диффузор

62. Опираясь на уравнение неразрывности, находится радиальная составляющая скорости на выходе БЛД:

$$c_{3R} = c_{2R} \cdot \frac{D_2 \cdot b_2}{D_3 \cdot b_3}, \text{ м/с}$$

63. Определяется угол выхода потока из БЛД:

$$\alpha_3 = \arctg \frac{\rho_3}{b_3 \rho_2} \frac{tg \alpha_2}{b_2 \rho_2}, \text{ град}$$

В данной формуле величина  $\frac{\rho_3}{\rho_2}$  выбирается в первом приближении из диапазона 1,01...1,05. В дальнейшем эта величина будет уточнена.

64. Рассчитывается окружная составляющая скорости потока на выходе БЛД, а также величина скорости:

$$c_{3u} = \frac{c_{3R}}{tg \alpha_3}, \text{ м/с}$$

$$c_3 = \sqrt{c_{3u}^2 + c_{3R}^2}, \text{ м/с}$$

65. Полная температура на выходе из БЛД равна полной температуре на входе в него:

$$T_3^* = T_2^*, \text{ К}$$

Тогда статическая температура за БЛД равна:

$$T_3 = T_3^* - \frac{c_3^2}{2 \frac{kR}{k-1}}, \text{ К}$$

66. Вычисляется приведённая скорость потока на выходе из БЛД:

$$\lambda_{c_3} = \frac{c_3}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_3^*}}$$

По данной величине находится значение ГДФ (прил. 1)  $\pi(\lambda_{c3})$ .

67. Находится статическое давление на выходе из БЛД:

$$p_3 = p_1 \cdot \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1} \eta_k}, \text{ Па}$$

68. Определяется полное давление на выходе БЛД:

$$p_3^* = \frac{p_3}{\pi(\lambda_{c3})}, \text{ Па}$$

69. Оценивается коэффициент восстановления полного давления в БЛД:

$$\sigma_{\text{блд}} = \frac{p_3^*}{p_2^*}$$

70. Вычисляется плотность рабочего тела на выходе из БЛД:

$$\rho_3 = \frac{P_3}{RT_3}, \text{ кг/м}^3$$

71. Оцениваются потери энергии в БЛД:

$$\Delta h_{\text{блд}} = \zeta_{\text{блд}} \frac{c_2^2}{2}, \text{ Дж/кг},$$

где коэффициент потерь в БЛД оценивается по формуле:

$$\zeta_{\text{блд}} = 0,147 + 0,0046 \cdot (v_{\text{блд}} - 12)^2$$

$v_{\text{блд}} = 2 \arctg (tg v_{\text{блд}} / 2)$ , град – угол раскрытия эквивалентного диффузора.

Желательно, чтобы эта величина находилась в диапазоне 7...9°;

$$tg \frac{v_{\text{блд}}}{2} = \frac{2\sqrt{b_3/D_3}}{1 + \sqrt{D_3/D_2}} \sin \alpha_3$$



## 2.5. РАСЧЕТ ЛОПАТОЧНОГО ДИФFUЗОРА

72. Находится величина входного лопаточного угла на входе ЛД:

$$\alpha_{3л} = \frac{1}{2}(\alpha_2 + \alpha_3), \text{ град}$$

73. Назначается величина выходного лопаточного угла ЛД:

$$\alpha_{4л} = \alpha_{3л} + (9...16^\circ), \text{ град}$$

74. По эмпирической формуле оценивается величина угла отставания потока в ЛД:

$$\Delta\alpha_{4л} = \frac{0,346(\alpha_{4л} - \alpha_{3л})}{(b/t_3)}, \text{ град},$$

где  $(b/t_3)$  – густота лопаточного диффузора выбирается из диапазона 2,0...2,4.

75. Угол выхода потока из ЛД находится по следующей формуле:

$$\alpha_4 = \alpha_{4л} - \Delta\alpha_{4л}, \text{ град}$$

76. Задаваясь величиной относительной радиальной протяженности лопаточного диффузора  $\frac{D_4}{D_2}$  из диапазона 1,3...1,6, находится наружный диаметр ЛД:

$$D_4 = D_2 \left( \frac{D_4}{D_2} \right), \text{ м}$$

77. Ширина ЛД принимается одинаковой и равной ширине БЛД:

$$b_4 = b_3, \text{ м}$$

78. Площадь выходного сечения ЛД равна:

$$F_{4r} = \pi \cdot D_4 \cdot b_4, \text{ м}^2$$

79. Опираясь на уравнение неразрывности, находится радиальная составляющая скорости на выходе БЛД:

$$c_{4R} = \frac{D_2 \cdot h_2}{D_4 \cdot h_3}, \text{ м/с}$$

80. Вычисляется окружная проекция скорости на выходе из ЛД:

$$c_{4u} = \frac{c_{4R}}{\operatorname{tg} \alpha_4}, \text{ м/с}$$

81. Определяется значение скорости выхода потока из ЛД:

$$c_4 = \sqrt{c_{4u}^2 + c_{4R}^2}, \text{ м/с}$$

82. В ЛД изменения полной температуры не происходит:

$$T_4^* = T_3^*, \text{ К}$$

Тогда статическая температура на выходе ЛД равна:

$$T_4 = T_4^* \frac{c_4^2}{\frac{2k}{k-1} R T_4^*}, \text{ К}$$

83. Вычисляется приведённая скорость потока на выходе из ЛД:

$$\lambda_{c_4} = \frac{c_4}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} R T_4^*}}$$

По данной величине находится значение ГДФ (прил. 1)  $\pi(\lambda_{c_4})$ .

84. Находятся значения статического и полного давлений на выходе из ЛД:

$$p_4 = p_1 \cdot \left( \frac{T_4}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1} \eta_k}, \text{ Па}$$

$$p_4^* = \frac{p_4}{\pi(\lambda_{c4})}, \text{ Па}$$

85. Вычисляется степень сжатия ступени:

$$\pi_k = \frac{p_4^*}{p_B}$$

86. Оценивается коэффициент восстановления полного давления в ЛД:

$$\sigma = \frac{P_4^*}{P_3^*}$$

87. Вычисляется плотность рабочего тела на выходе из ЛД:

$$\rho_4 = \frac{P_4}{RT_4}, \text{ кг/м}^3$$

88. Оценивается потребное число лопаток ЛД:

$$z_{\text{ЛД}} = \left(\frac{b}{t_3}\right) \cdot \frac{2\pi \sin\left[\frac{(\alpha_3 + \alpha_4)}{2}\right]}{\ln\left(\frac{D_4}{D_3}\right)}, \text{ шт}$$

89. Рассчитываются потери энергии в ЛД:

$$\Delta h_{\text{л0}} = \zeta_{\text{л0}} \frac{c_3^2}{2}, \text{ Дж/кг},$$

где величина коэффициента потерь находится по формуле:

$$\zeta_{\text{ЛД}} = \zeta_{\text{ЛД0}} [1 + 4,3 (\lambda_{c3} - 0,8)^2]$$

В этой формуле в свою очередь базовые потери находятся как:

$$\zeta_{\text{ЛД0}} = (3,5 \dots 4,5) k_f \left(tg \frac{v_{\text{л0}}}{2}\right)^{1,25} \left(1 - \frac{1}{F_n}\right)^{1,65};$$

$$k_f = 1,7 + 0,03v_{\text{элд}};$$

$$\bar{F}_A = \frac{F_4}{F_3};$$

$$v_{\text{элд}} = 2 \arctg \sqrt{\frac{F_3}{\pi} \frac{\sqrt{F_{\text{лд}} - l}}{l_0}} - \text{эквивалентный угол диффузора}$$

где  $l_0 = \frac{D_4 - D_3}{2} \sin\left(\frac{\alpha_3 + \alpha_4}{2}\right)$  - длина диффузора.

90. Вычисляется КПД ступени ЦБК:

$$\eta_K = 1 - \frac{\Delta h_{\text{проф}} + \Delta h_{\text{выл}} + L_u \beta_{np} + \Delta h_{\text{лд}} + \Delta h_{\text{блд}}}{L_u (1 + \beta_{np})}$$

Полученное значение сравнивается с принятым в начале расчета в качестве исходных данных, если они не совпадают – расчетное значение принимается в качестве исходных данных и расчет повторяется пока различие между принятым и расчетным значение КПД не будет меньше 1%.

### **3. ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ *IOSO***

Прежде чем переходить к профилированию лопатки и оптимизации ее формы, необходимо найти такие параметры компрессора, уровни скоростей и углов поворота потока, которые потенциально позволят получить высокий КПД. В случае если уровень скоростей существенно превышает звуковой, углы поворота в венцах велики, трудно рассчитывать на то, что за счет коррекции формы лопатки удастся достигнуть высокой эффективности.

Проблема выбора параметров рабочего процесса компрессора заключается в том, что их число велико, и они влияют на конечный результат противоречиво. Выбор отягощается необходимостью удовлетворения требований прочности, технологичности и конструктивным ограничениям. По этой причине простым перебором вариантов обычному человеку трудно найти решение действительно являющееся наилучшим.

Данная проблема может быть решена путем привлечения программ оптимизации, например *IOSO*[5]. Суть данной технологии заключается в том, что производится поиск оптимизируемой величины как максимума/минимума объектной функции нескольких переменных. В качестве объектной функции обычно рассматривается изменение потерь энергии в ступени, КПД, потеря полного давления и т.п. Функция создается на основе данных серии расчетов с помощью математической модели оптимизируемого процесса разного уровня с учетом действующих ограничений, затем осуществляется поиск ее максимума/минимума. Весь

такой расчет протекает в автоматическом режиме без участия пользователя.

Такой подход реализуется, например, в программе *IOSO*[5]. Ниже приводится технология поиска оптимального сочетания параметров рабочего процесса центробежного компрессора в программе *IOSO* версии 2.1 с учетом действующих ограничений.

В основе процесса оптимизации лежит математическая модель, формализованная в виде программы. Данная программа может быть написана на любом языке программирования, но программа *IOSO* позволяет использовать математические модели, созданные и в некоторых распространенных программах, таких как *Ansys*, *Excel*, *Numeca* и др.

Выбор рациональных параметров рабочего процесса компрессора осуществляется с помощью одномерной модели рабочего процесса компрессора, в основе которой лежит методика его проектного расчета (см. главу 2). Модель базируется на теории рабочего процесса компрессора, законах термодинамики, газовой динамики, эмпирических моделях потерь в элементах компрессора и статистической информации о существующих компрессорах. Данная модель позволяет, зная значения важнейших параметров рабочего процесса компрессора, оценить ожидаемую величину его КПД, а также рассчитать основные размеры его проточной части и планы скоростей, которые необходимо реализовать для получения требуемых характеристик.

Для использования в процессе оптимизации модель рабочего процесса компрессора должна быть формализована в виде компьютерной программы, написанной на любом алгоритмическом языке. Причем исходные данные и результаты расчета должны записываться в отдельные текстовые файлы. Сама программа должна иметь возможность запускаться из командной строки и при этом автоматически считывать исходные данные из файла.

Программа *IOSO* позволяет также использовать математические модели, созданные в программе *Excel*. При этом целесообразно модель составлять таким образом, чтобы исходные (варьируемые) переменные, критерий оптимизации, ограничиваемые параметры находились на одном листе *Excel*. Варьируемые параметры должны быть независимыми, т.е.

пользователь должен вводить их значения сам. Они не должны получаться в результате каких-либо вычислений.

При выборе рациональных параметров рабочего процесса компрессора с применением технологий оптимизации в качестве критерия оптимизации обычно выбирается величина КПД.

Варьируемыми являются основные параметры рабочего процесса компрессора и ряд геометрических параметров (табл. 3.1).

**Таблица 3.1**

**Варьируемые переменные в процессе поиска оптимального сочетания параметров рабочего процесса центробежного компрессора**

Название	Обозначение	Максимальное значение	Минимальное значение
Коэффициент затраченного напора	$\bar{H}_z$	0,5	0,8
Лопаточный угол на выходе РК	$\beta_{2,l}$	60	90
Относительный периферийный диаметр на входе РК	$D_{1к}/D_2$	0,4	0,95
Относительный втулочный диаметр на входе РК	$D_{1вт}/D_2$	0,25	0,5
Относительный диаметр на выходе из безлопаточного диффузора	$D_3/D_2$	1,1	1,35
Относительный диаметр на выходе из лопаточного диффузора	$D_3/D_2$	1,3	1,6

При выборе рациональных параметров рабочего процесса компрессора используется ряд ограничений, наличие которых вызвано технологическими, прочностными и конструктивными соображениями. Рекомендуемый набор ограничений при поиске оптимального сочетания параметров рабочего процесса центробежного компрессора приведен в табл. 3.2. Они позволяют исключить из рассмотрения сочетания исходных данных, при которых компрессор не может существовать, а также области с заведомо плохими показателями газодинамической эффективности.

Ниже приводится технология поиска рациональных параметров рабочего процесса компрессора в программе *IOSO* версии 2.1 с использованием математической модели созданной в *Excel*.

**Шаг 1. Запуск программы IOSO.**

Запуск программы *IOSO* осуществляется через меню «Пуск» ОС *Windows*.

*Пуск → IOSO Optimization → IOSO NM.*

В результате выполнения команды появится окно, изображенное на рис. 3.1.

**Шаг 2. Подготовка расчетной модели в Excel**

Перед проведением процесса поиска рациональных параметров рабочего процесса компрессора, в программе *Excel* была разработана математическая модель его рабочего процесса. Она позволяет, зная значения важнейших параметров рабочего процесса компрессора, оценить ожидаемую величину его КПД, а также рассчитать основные размеры его проточной части и планы скоростей, которые необходимо реализовать для получения требуемых характеристик. Модель базируется на теории рабочего процесса компрессора, законах термодинамики, газовой динамики, эмпирических моделях потерь в элементах компрессора и статистической информации о существующих компрессорах (см. главу 2).

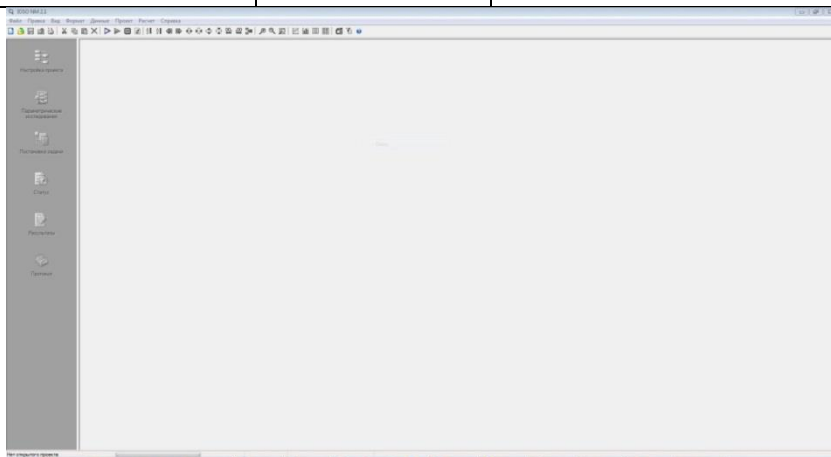
**Таблица 3.2**

**Набор ограничений при поиске оптимального сочетания параметров рабочего процесса центробежного компрессора**

Наименование	Ограничения	Пояснение
Высота лопатки на выходе из РК	$h_2 > 5\text{мм}$	Исключение из рассмотрения области с заведомо плохими гидравлическими характеристиками
Окружная скорость на выходе РК	$u_2 < 550\text{м/с}$	Ограничение по условиям прочности
Угол на входе в РК в относительном движении на периферии	$\beta_{\text{л.к}} > 25^\circ$	Технологические причины. При меньших значениях угла возникают трудности с



		изготовлением РК
Приведенная относительная скорость на входе в РК	$\lambda_{w1} < 1,15$	Отсечение области с заведомо худшими гидравлическими характеристиками
Приведенная абсолютная скорость на выходе из РК	$\lambda_{c2} < 1,15$	Отсечение области с заведомо худшими гидравлическими характеристиками
КПД компрессора	$1 > \eta_k > 0,5$	Исключаются не существующие физически решения, которые могут возникать из-за несовершенства математической модели. Исключается из рассмотрения область с чрезвычайно низкими КПД
	$(D_{1к} - D_{1вг}) > 5\text{мм}$	Исключение из рассмотрения не существующих сочетаний исходных данных, при которых втулочное сечение выше периферийного
	$\frac{(D_4 - D_3)}{D_2} > 0,15$	Исключение из рассмотрения не существующих сочетаний исходных данных



**Рис. 3.1.** Окно программы IOSONM 2.1

Данный файл имеет следующие особенности:

- исходные (варьируемые) переменные, критерий оптимизации, ограничиваемые параметры находились на одном листе *Excel*;
- варьируемые параметры должны независимыми, т.е. пользователь должен вводить их значения сам. Они не получаются в результате каких-либо вычислений.

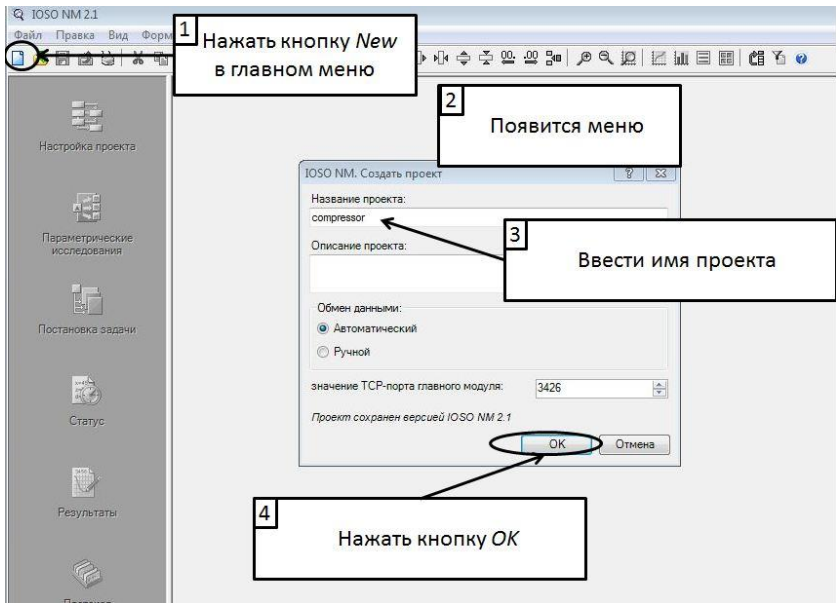
Возможный внешний вид файла *Excel* приведен на рис.3.2.

### Шаг 3. Создание нового проекта

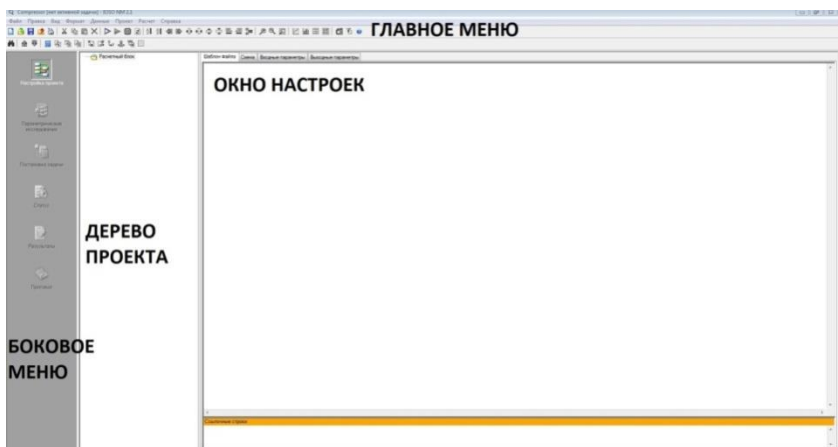
Для создания нового проекта следует щелкнуть ЛКМ на кнопке *NEW* в главном меню программы. После этого появится диалоговое окно, в котором следует ввести желаемое имя проекта, например *compressor* (рис. 3.3). После этого появится диалоговое окно, в котором уточняется желание пользователя создать новый проект, затем появится стандартное окно *OC Windows*, в котором пользователю следует выбрать размещение файлов проекта на компьютере. Внешний вид конка программы *IOSO* после проведенных манипуляций приведен на рис. 3.4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
4	Параметры рабочего процесса	288.15	1003.12	0.633	0.74	4	480050	4.00	83333.01						
5	Тем	град	Сек	К	К	ДискК									
6	К	Па	мгс	0.93	1.4	287									
7	477.86	461.247	0.93												
8	<b>ПАРАМЕТРЫ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КОМПРЕССОРА (неизменяемые)</b>														
9	Коэффициент изотермического расширения	Полн	-	0.611823	0.25-0.8										
10	Высший изотермический уклон РК	ДПД	-	30.99603	30-90	степень расширения компрессора	град	0.6882		90.00					
11	относительный перепад температуры на входе	DD/D1	-	0.47875	0.25-0.95	Температурный коэффициент	град	0.0005		20.00					
12	относительный изотермический наклон на входе	D1m/D1	-	0.284945	0.25-0.5	Ширина РК	град	28.3952		40.00					
13	Коэффициент дилатации потока на входе в РК	c1/c11	-		0.0-2			0.0202		0.0428					
14	Температура потока на входе в РК	тв	град	0.7		Коэффициент отплатки	град	0.8047		60.00					
15	Температура потока на выходе РК	тх	град	1.80		Уклон выхода потока на РК в относительных единицах	град	41.0771		50.00					
16	Наблюдается спад потока	лимитов	град	1.00				0.0001		1.1262					
17	Уклон выхода на выходе РК	тв	град	2	0-4			0.8807		30.00					
18	Уклон входа на входе РК	тв	град	-2	0-4			0.1198		10.00					
19	Коэффициент дилатации потока	Дм	-	1.02	1.01-1.08	степень сжатия РК	град	4.1297		20.00					
20	Относительная проницаемость внешнего диффузора	DD/D2	-	1.25	1.1-1.35	ХПД РК	град	0.9671		40.00					
21	Относительная проницаемость внутреннего диффузора	DD/D1	-	1.03	1-1.05	работа на окружности компрессора	град			29.85					
22	Относительная высота внешнего диффузора	h/h2	0.0000	1.05	0.77-0.8	коэффициент восстановления внешнего давления ВДД	град	0.9193		24.55					
23	Относительная проницаемость внутреннего диффузора	Dm/D2	-	1.37	1.3-1.6	коэффициент восстановления внешнего давления ДД	град	0.9405							
24	Уклон потока потока в ДД	сд/с4	град	16	5-16град	Степень сжатия ступени	град	3.7259	D1m/D1m	46.3700					
25	относительный шаг внешнего диффузора	(B-1)/d	град	2	2.0-2.4	ХПД ступени компрессора	град	0.7719	(D4-D1)/D3	0.1					
26	Средний уклон выхода потока в РК в относительных единицах	Д/1	град	30		Запрещенный наклон	град	18.2328	80						
27															
28	<b>РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА</b>														
29	тв	град	0.7	0.611823	0.25-0.8	тв									
30	тх	град	1.80	4.1297	0.9671	тх									
31	выход на РК	с1	278.98	0.74	0.8715	с1	84076.68	р1*	100112.00	д1	1.07	1			
32	выход на РК	с2	384.40	0.74	0.6977	с2	242064.91	р2*	414238.56	д2	1.99	2			
33	выход на ВДД	с3	411.43	0.74	0.6977	с3	218888.28	р3*	397114.47	д3	2.17	3			
34	выход на ДД	с4	468.66	0.74	0.6977	с4	318683.81	р4*	373749.73	д4	2.47	4			
35	вход в РК	с1	168.98	с1а	0.00	с1а	168.98	с1	305.28	с1	0.03				
36	вход на РК	с2	388.80	с2а	338.80	с2а	190.20	с2	288.88	с2	29.24				
37	вход на ВДД	с3	529.71	с3а	296.13	с3а	144.99	с3	516.63	с3	26.10				
38	вход на ДД	с4	204.92	с4а	154.83	с4а	134.25	с4	43.68	с4	40.25				
39	вход в РК	с5	118.37	с5а	118.37	с5а	23.18	с5а	0.0035	с5а	0.5440				
40	вход на РК	с6	131.92	с6а	49.1894	с6	8.84	с6а	0.0017	с6а	0.8900				
41	вход на ВДД	с7	147.97	с7а	85.1081	с7	5.29	с7а	0.0022	с7а	0.8312				
42	вход на ДД	с8	176.99	с8а	116.99	с8а	5.20	с8а	0.0022	с8а	0.4166				

Рис. 3.2. Возможный внешний вид файла *Excel* с математической моделью рабочего процесса компрессора



**Рис. 3.3. Задание имя проекта**



**Рис. 3.4. Вид окна программы IOSO после создания нового проекта**

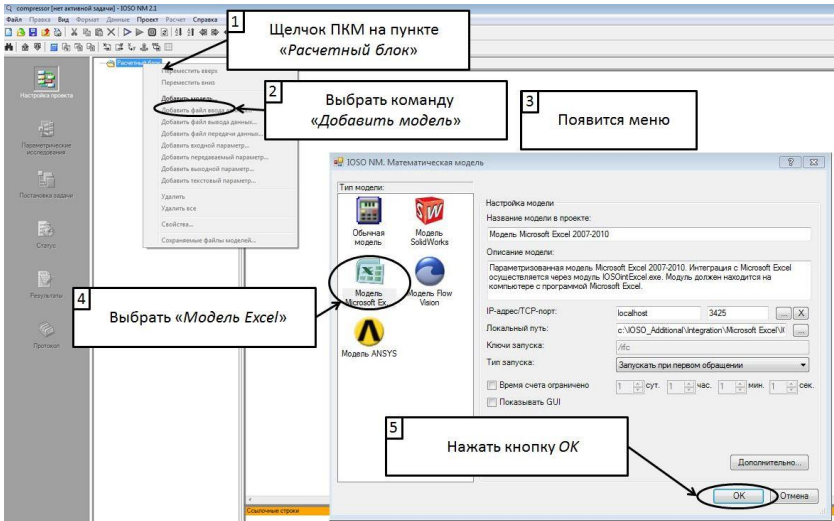
Как видно из рисунка окно программы состоит из:

- главного меню, расположенного в его верхней части экрана, и содержащего все важнейшие команды программы;
- бокового меню, в котором приведены основные команды управления этапами работы над проектом;
- деверева проекта;
- окна настроек.

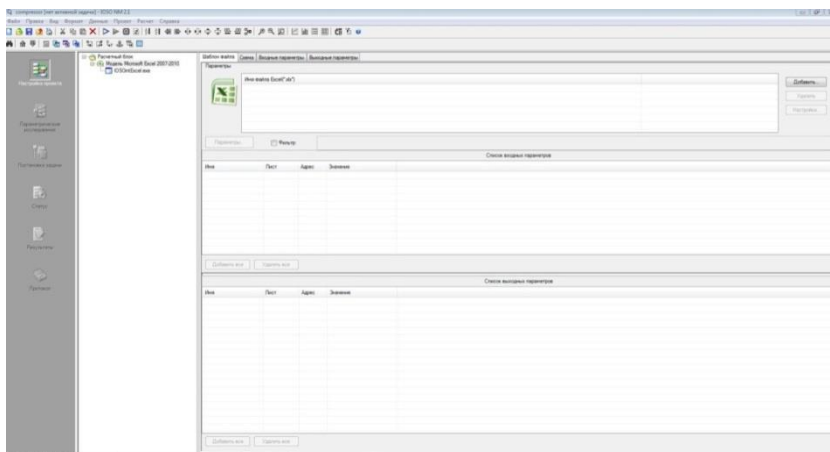
**Шаг 4. Указание того, что используемая математическая модель создана в программе Excel**

На следующем шаге в проект следует добавить математическую модель, с помощью которой будет вычисляться значение оптимизируемой переменной соответствующее принятому сочетанию исходных данных. В случае если модель создана в программе *MSExcel*, еедобавление производится следующим образом.

Необходимо щелкнуть ПКМ на элементе «Расчётный блок» дерева проекта, и в появившемся списке команд выбрать команду «Добавить модель». В результате появится меню. В нем, в списке «Тип модели», необходимо выбрать иконку «Модель Microsoft Excel». Так будет указано, что математическая модель, с помощью которой будет устанавливаться связь исходных данных с оптимизируемым параметром, создана в *Excel*(рис. 3.5). Внешний вид окна программы после выполнения данной команды показан на рис. 3.6.



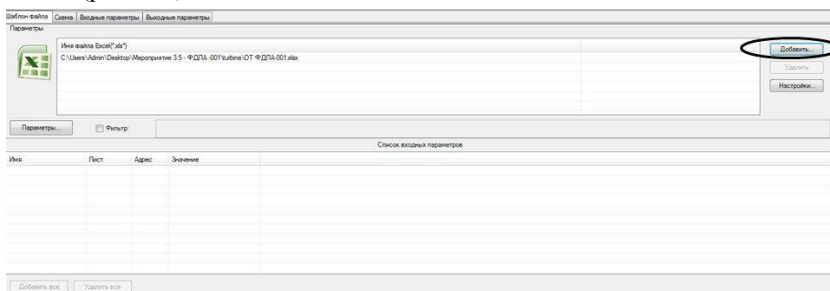
**Рис. 3.5.** Указание того, что используемая математическая модель создана в программе *Excel*



**Рис. 3.6.** Внешний вид программы *IOSO* после выполнения шага 4

### **Шаг 5. Добавление математической модели в проект**

Для добавления файла *Excel* содержащим математическую модель необходимо щелкнуть ЛКМ на кнопке «Добавить» находящейся в верхней правой части окна настроек и в появившемся окне выбрать файл модели (рис. 3.7).



**Рис. 3.7.** Добавление математической модели

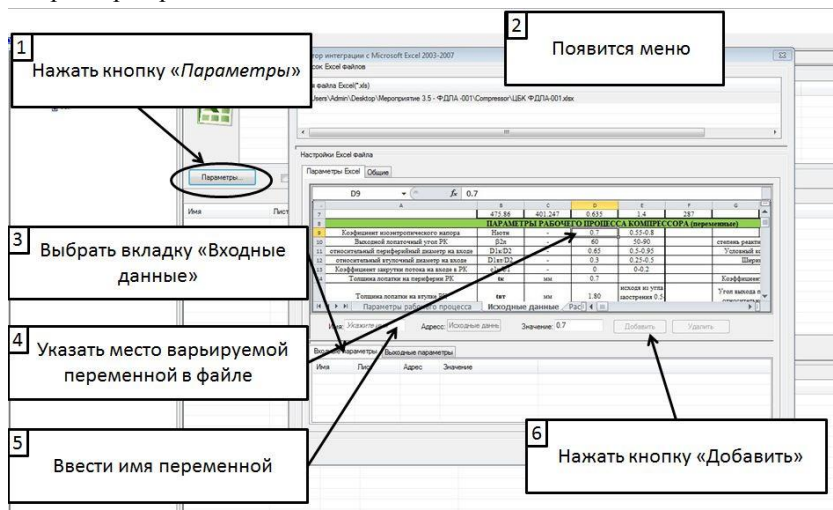
### **Шаг 6. Выбор варьируемых переменных**

Для того чтобы выбрать переменные которые будут варьироваться в процессе оптимизации необходимо в верхней части окна настроек

программы IOSO нажать кнопку «*Параметры*». В результате появится окно «*Редактор интеграции с Microsoft Excel*». В его средней части будет загружен *Excel* файл, который был указан в качестве математической модели на предыдущем шаге.

В окне «*Редактор интеграции с Microsoft Excel*» необходимо убедиться, что в верхней части нижнего списка выбрана вкладка «*Входные параметры*». После этого в *Excel* файле нужно найти ту переменную, которую пользователь хочет принять в качестве варьируемой, и поставить курсор на ту ячейку, где указано ее числовое значение. Затем в поле «*Имя*», находящемся ниже, вводится имя переменной. Желательно чтобы оно было кратким, отражало сущность переменной, и было набрано латинскими буквами. После этого следует нажать кнопку «*Добавить*», находящуюся правее. В результате в списке «*Входные переменные*» появится созданная переменная (рис. 3.8).

Аналогичным образом добавляются остальные варьируемые переменные. Рекомендуемый список варьируемых переменных при поиске рационально сочетания параметров рабочего процесса компрессора приведен в табл. 3.1.



**Рис. 3.8.** Добавление варьируемых переменных

## **Шаг 7. Выбор выходных данных**

В программе *IOSO* под термином выходные данные подразумеваются параметры, которые оптимизируются, переменные значения которых ограничиваются по каким либо причинам, и величины, изменение которых в процессе оптимизации желает отслеживать пользователь.

Для добавления выходных данных следует перейти на вкладку «Выходные параметры» в нижней части окна «Редактор интеграции с *Microsoft Excel*». Выходные переменные следует поочередно найти в файле *Excel*, присвоить им имя и добавить к проекту подобно тому, как это делалось с варьируемыми переменными (входными параметрами) на предыдущем шаге (рис. 3.8).

Наиболее важными параметрами рабочего процесса ЦБК, которые следует добавить в список выходных параметров, являются следующие (табл. 3.1 и 3.2):

Оптимизируемый параметр:

- КПД компрессора  $\eta_k$

Ограничиваемые параметры:

- высота лопатки на выходе из РК,  $h_2$ ;
- окружная скорость на выходе РК,  $u_2$ ;
- приведенная относительная скорость на входе в РК
- приведенная абсолютная скорость на выходе из РК
- $(D_{1к} - D_{1вт})$ ;
- $\frac{(D_4 - D_3)}{D_2}$ ;

Параметры, значения которых необходимо отслеживать в процессе оптимизации.

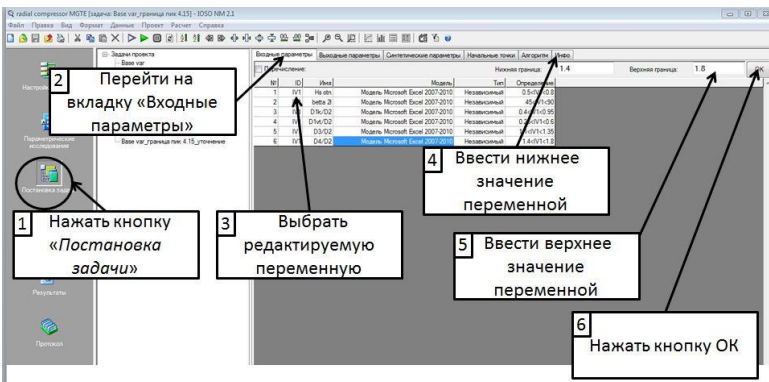
- КПД РК,  $\eta_{рк}$ ;
- степень сжатия РК,  $\pi_{рк}^*$ ;
- степень сжатия ступени ЦБК,  $\pi_k^*$ ;
- коэффициент отставания потока,  $\mu$ ;
- торможение потока в относительном движении,  $w_2/w_1$ ;
- меридиональное ускорение потока в РК,  $c_{2r}/c_{1a}$ ;

- относительная высота лопатки на выходе из РК,  $b_2/D_2$ .

### **Шаг 8. Указание диапазонов варьирования исходных данных**

Для указания диапазонов, в которых будут изменяться варьируемые переменные необходимо выполнить следующие действия (рис. 3.9):

- нажать кнопку «Постановка задачи» в боковом меню окна программы *IOSO*;
- перейти во вкладку «Входные параметры» в верхней части окна настроек;
- найти в списке, расположенном ниже, имя варьируемой переменной;
- в полях находящиеся выше и правее списка переменных ввести максимальное («Нижняя граница») и минимальное («Верхняя граница») значение переменной;
- подтвердить введенные данные нажатием кнопки ОК правее;
- подобным образом указать диапазоны изменения всех варьируемых переменных. Рекомендуемые диапазоны варьирования важнейших параметров рабочего процесса ЦБК приведены в табл. 3.1.



**Рис. 3.9.** Указание диапазонов варьирования исходных данных

### **Шаг 9. Выбор оптимизируемого параметра**

Поскольку ставится задача поиска конфигурации компрессора обеспечивающего получение максимальной газодинамической эффективности, то в качестве оптимизируемого параметра следует



принять КПД компрессора. В шаге 7, переменная КПД была добавлена в список выходных данных (в программе *IOSO* оптимизируемые параметры выбираются из этого списка). Для того, чтобы указать, что данная переменная будет оптимизироваться и указать каким именно образом, следует перейти во вкладку «*Выходные параметры*» в верхней части окна настроек.

В списке выходных параметров необходимо найти КПД (и/или другой оптимизируемый параметр, если это необходимо) и дважды щелкнуть ЛКМ в столбце «*Критерии*» напротив него. В результате в этом поле появится список, в котором следует выбрать пункт «*Максимизировать*» (рис. 3.10). В случае если пользователь желает найти минимум функции, то там нужно выбрать пункт «*Минимизировать*». Так будет указано, что в процессе оптимизации будет искаться максимум данной функции. При необходимости подобным образом можно добавить другой оптимизируемый параметр, например степень сжатия, сделав таким образом процесс оптимизации многокритериальным.

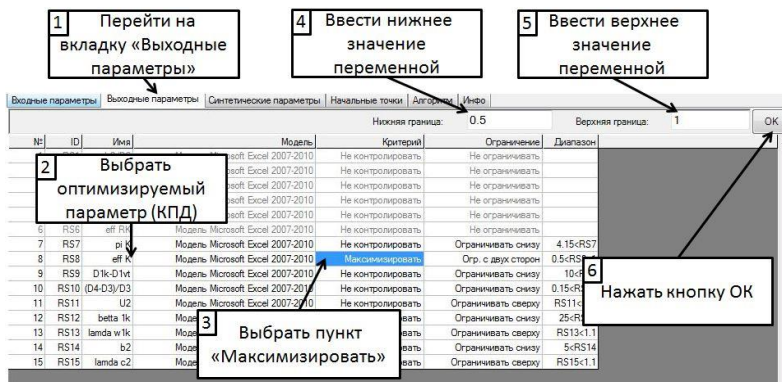


Рис. 3.10. Выбор оптимизируемого параметра

После этого рекомендуется в полях находящихся выше и правее списка переменных ввести максимальное («*Нижняя граница*») и минимальное («*Верхняя граница*») значение оптимизируемого параметра. Данное действие не является обязательным, однако таким образом можно исключить из процесса оптимизации такие сочетания переменных, которые приводят к появлению заведомо не существующих либо не интересующих пользователя результатов. Появление не реальных

значений функции связано с несовершенством используемой математической модели. Для величины КПД рекомендуется установить диапазон варьирования  $0,5 \dots 1$  (см. табл. 3.2).

У остальных выходных переменных в столбце «Критерии» должен быть выбран пункт «не контролировать».

#### **Шаг 10. Установка ограничений на величины выходных переменных**

Любые выходные могут быть превращены в ограничения. С их помощью могут быть отсеяны решения, которые не могут существовать по разным причинам, либо находятся в области рассмотрения не интересующей пользователя.

Список ограничений, которые рекомендуется использовать при поиске рациональных параметров рабочего процесса компрессора для исключения вариантов с заведомо худшей эффективностью и тех которые не могут быть реализованы по прочностным, технологическим и конструктивным ограничениям приведены в табл. 3.2. При необходимости число ограничений может быть сокращено, либо дополнено. В частности можно ограничить нижнее значение степени сжатия, чтобы отсеять варианты, которые хотя и обладают высокой эффективностью, но не позволяют достигнуть требуемой степени сжатия.

Для установки ограничения на некоторый выходной параметр необходимо выполнить следующие действия (рис. 3.11):

- нажать кнопку «Постановка задачи» в боковом меню окна программы IOSO;
- перейти во вкладку «Выходные параметры» в верхней части окна настроек;
- найти в списке, расположенном ниже, имя ограничиваемой переменной;
- напротив имени переменной в столбце «Ограничения» следует выбрать каким именно образом осуществляется ограничения: сверху (из рассмотрения исключаются значения больше заданного), снизу (из рассмотрения исключаются значения меньше заданного), с двух сторон (указывается диапазон существования переменной);

- в полях находящиеся выше и правее списка переменных ввести максимальное («Нижняя граница») и минимальное («Верхняя граница») значение переменной (в зависимости от принятого ранее типа ограничения);
- подтвердить введенные данные нажатием кнопки ОК правее.

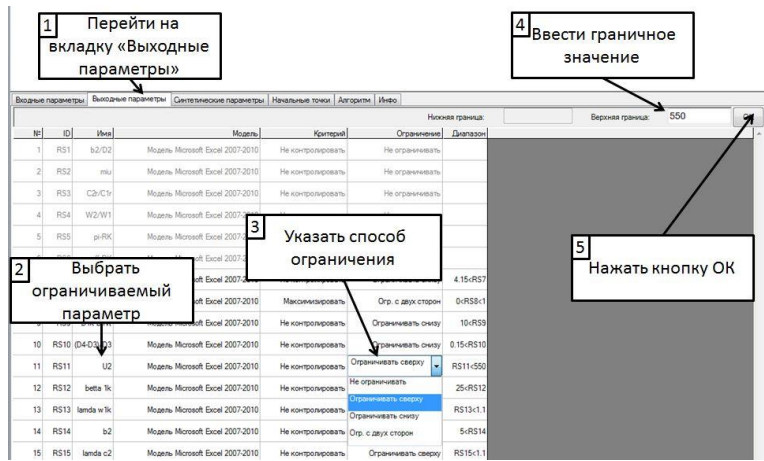


Рис. 3.11. Установка ограничений на величины выходных переменных

Подобным образом следует наложить все ограничения, рекомендуемые в табл. 3.2.

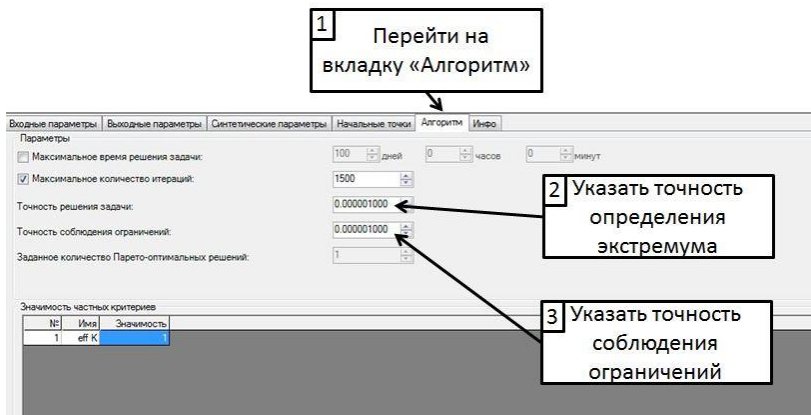
### Шаг 11. Настройка параметров процесса решения

На следующем этапе необходимо настроить некоторые параметры процесса решения.

1. Следует указать, с какой точностью определять оптимального значения искомого параметра и точность соблюдения ограничений. Чем меньше точность, тем точнее будет найден экстремум, но тем дольше будет проходить процесс расчета.

Для того, чтобы задать точность определения экстремума следует, находясь в меню «Постановка задачи» (переход туда осуществляется в боковом меню) перейти во вкладку «Алгоритм». Там в полях «Точность решения задачи» и «Точность соблюдения ограничений» необходимо ввести желаемое значение точности (рис. 3.12). По умолчанию эти величины равны и составляют  $0.0001$ . Целесообразно уменьшить данное значение на два порядка.


2. Указать максимальное число обращений к математической модели. При достижении данного числа обращений расчет прекращается автоматически. В ряде случаев расчет может быть закончен автоматически досрочно, если программе не удастся найти значение искомого параметра лучше, чем обнаруженные в предыдущих итерациях.

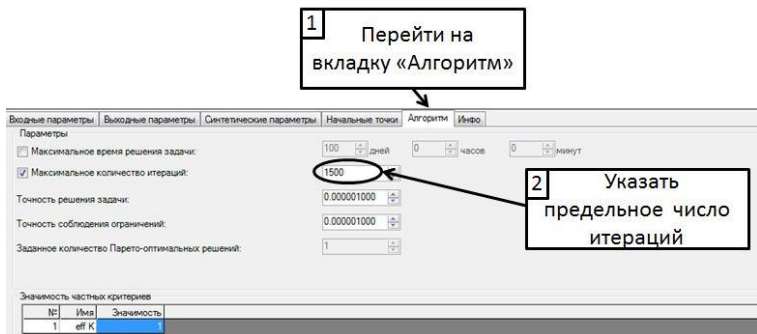


**Рис. 3.12. Указание точности определения оптимального значения искомого параметра и точность соблюдения ограничений**

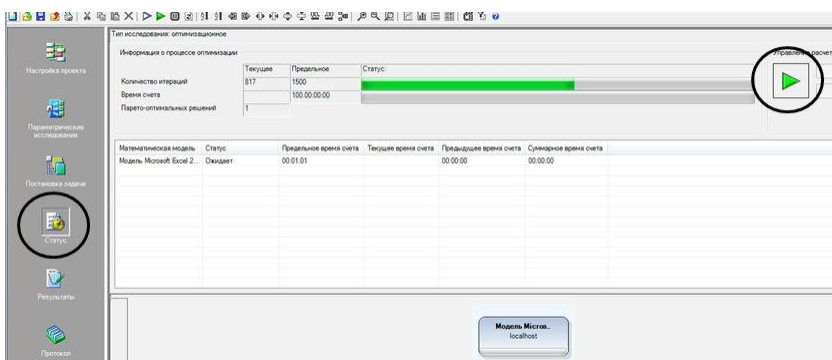
Указание числа обращений осуществляется во вкладке «Алгоритм» в поле «Максимальное число итераций». В этой же вкладке можно задать предельное время ожидания ответа от математической модели, после истечения которого оптимизатор перейдет к следующему обращению (рис. 3.13).

### **Шаг 12. Запуск процесса оптимизации**

Для запуска процесса оптимизации следует нажать кнопку , находящуюся в главном меню, либо активировать команду «Статус» в боковом меню и нажать на ту же кнопку в появившемся экране (рисунок 11.14).



**Рис. 3.13.** Указание предельного числа обращений к математической модели



**Рис. 3.14.** Запуск процесса оптимизации

### **Шаг 13. Наблюдение за процессом расчета**

После выполнения шага 12 запустится процесс оптимизации. Первые несколько десятков обращений к модели оптимизатор проводит серию расчета для случайной комбинации варьируемых параметров примерно равномерно распределенных в рассматриваемой области их изменения. На основе полученной информации программа *IOSO* формирует первоначальную приближенную функциональную зависимость оптимизируемого параметра от варьируемых переменных. С ее помощью определяется примерное положение экстремума и его значение выводится в процессе решения. Так находится точка - кандидат – такое сочетание, где программа предполагает наличие оптимума.

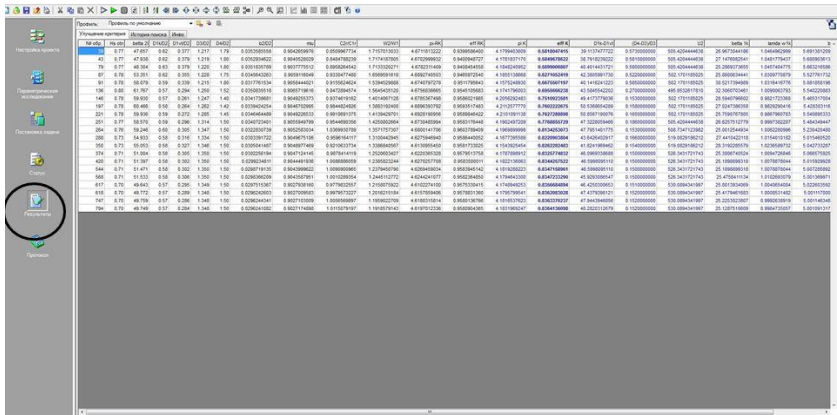
Точное число обращений к математической модели до получения первой точки – кандидата зависит от принятых ограничений. Иногда, когда по прошествии нескольких сотен обращений, программа не может определить ни одной точки – кандидата. В этом случае следует расширить область ограничений, либо снять их вовсе.

Найдя область предполагаемого нахождения оптимума, программа *IOSO* проводит несколько расчетов со значениями варьируемых переменных находящихся в этой области. Опираясь на полученные отклики математической модели, уточняется функциональная зависимость и находится новое возможное положение оптимума, которое отображается в окне программы. Затем этот процесс повторяется до достижения глобального оптимума, либо остановки расчета пользователем.



В начале процесса разница между значениями оптимизируемого параметра одной точки – кандидата и последующей достаточно существенная. Однако в дальнейшем эта разница сокращается и стремится к нулю. В таком случае можно говорить о достижении глобального оптимума.

Для того, чтобы увидеть точки – кандидаты во время расчета необходимо перейти на экран «*Результаты*», нажав соответствующую кнопку в боковом меню. На этом экране под вкладкой улучшения критерия в табличной форме будут печататься величины всех входных и выходных параметров точек – кандидатов в порядке улучшения оптимизируемого критерия в процессе оптимизации (рис. 3.15).

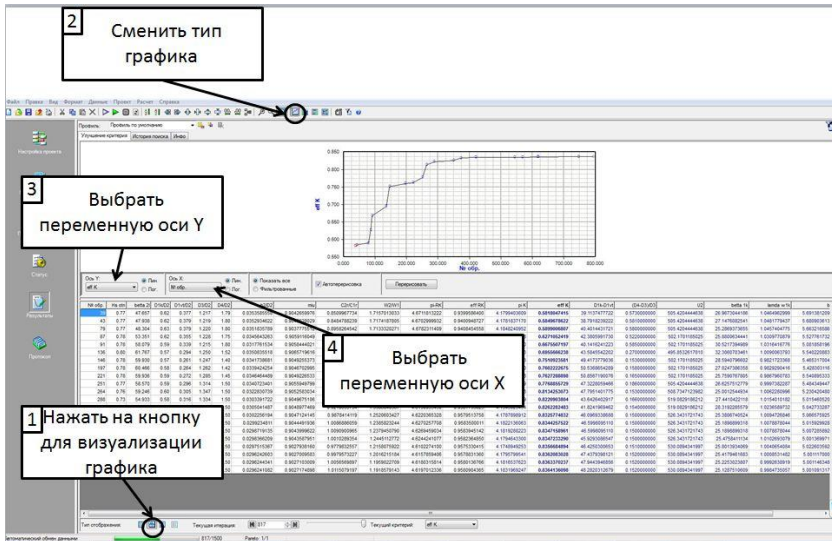
Очевидно, что, несмотря на представление информации о результатах в легком для восприятия табличном виде, гораздо нагляднее судить об изменении параметров по графикам. Программа *IOSO* позволяет построить графики изменения в процессе оптимизации двух любых входных или выходных параметров друг от друга или номера обращения в любых сочетаниях.



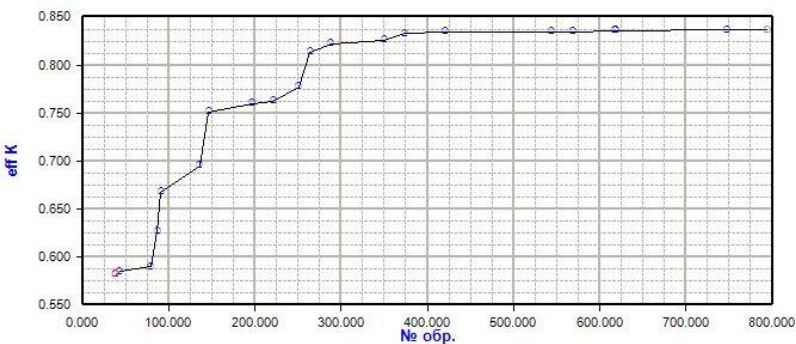
**Рис. 3.15. Отображение улучшения оптимизируемого параметра на экране «Результаты»**

Наиболее употребим график изменения оптимизируемого параметра в зависимости от номера обращения к математической модели. Для того, чтобы его визуализировать необходимо нажать на кнопку  , находящуюся в нижней части окна программы. В результате экран «Результаты» разделится на две части: в верхней части будет изображаться график (по умолчанию – гистограмма), в нижней таблица с данными точек - кандидатов. Затем, нажатием кнопки  в главное меню необходимо сменить тип графика на линейную зависимость двух переменных. Ниже графика появятся два списка «Ось X» и «Ось Y», в которых содержатся имена (заданные на шагах 6 и 7) всех входных и выходных параметров, выбирая которые в произвольных сочетаниях можно получить зависимость изменения одного параметра от любого другого. Для оси Y целесообразно выбрать оптимизируемую функцию (обычно КПД компрессора), а для оси X – номер обращения (рис. 3.16).

Обычный вид графика изменения оптимизируемого параметра в процессе оптимизации приведен на рис. 3.17. Видно, что оптимизируемая функция асимптотически стремится к некому значению. В случае если изменение этой величины не происходит в течение большого числа обращений к математической модели, процесс оптимизации можно остановить.



**Рис. 3.16.** Отображение графика изменения переменных в процессе оптимизации




**Рис. 3.17.** Обычный вид графика изменения оптимизируемого параметра в процессе оптимизации

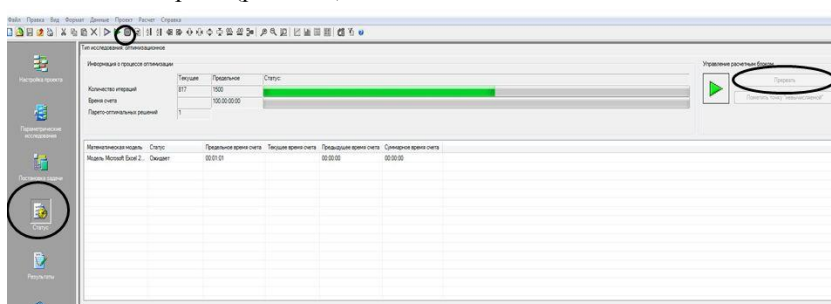
### Шаг 14. Остановка процесса решения

После того как программа выполнит заданное число обращений к математической модели она остановит процесс оптимизации автоматически. То же самое произойдет в том случае, если значение



оптимизируемого параметра не меняется в течение большого количества обращений.

Пользователь имеет возможность остановить процесс оптимизации в любой момент. Для остановки процесса решения следует нажать кнопку  , находящуюся в главном меню, либо активировать команду «Статус» в боковом меню и нажать на кнопку «Прервать» в появившемся экране (рис.3.18).



**Рис. 3.18. Остановка процесса оптимизации**

### ***Шаг 15. Запись истории поиска в файл Excel***

Таблица изменения всех переменных в процессе оптимизации, находящаяся на экране «Результаты» может быть сохранена в формате *Excel*.

Для этого нужно щелкнуть на таблице ПКМ, и в появившемся окне выбрать пункт «Экспорт». После этого появится диалоговое окно, в котором следует выбрать место, куда файл будет записан, а также указать тип файла *\*.xls*.

Полученные для оптимального компрессора исходные варьируемые параметры вводятся в файл математической модели, и таким образом получается подробный расчет компрессора для выбранного варианта.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белоусов, А.Н. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст]/А.Н. Белоусов, Н.Ф. Мусаткин, В.М. Радько. - Самара: ФГУП "Издательство Самарский Дом печати", 2003. – 336с.
2. Холщевников, К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст]/К.В. Холщевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин.– М.: Машиностроение, 1986. – 432с.
3. Материалы сети Интернет.
4. Смагоринский, А. М. Методика определения газодинамических, конструктивных параметров и эффективности осерадиальных рабочих колёс промышленных центробежных компрессоров: диссертация кандидата технических наук: 05.04.06 [Текст]/ Смагоринский А. М.; Санкт-Петербург, 2010.- 281 с.: ил.
5. Сигма Технология. Примеры задач оптимизации [Электронный ресурс].– Электронные данные. – Сигма Технология, 2013– Режим доступа: <http://www.iosotech.com>.
6. Кампти Н. Аэродинамика компрессоров. Москва: Мир, 2000. — 688 с.
7. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины. –М. – Л.:Машиностроение. 1981.
8. Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б. Центробежные компрессоры. – Л.:Машиностроение. 1982.
9. ШнеппВ.Б. Конструкция и расчет центробежных компрессорных машин. –М. – Л.: Машиностроение. 1991.
10. Галеркин Ю.Б., Солдатова К.В., ТитенскийВ.И. Теория, расчет и конструирование компрессорных машин динамического действия. Турбокомпрессоры. СПбГПУ, Санкт-Петербург, 2007.
11. ВаняшовА.Д. Теория, расчет и конструирование компрессорных машин динамического действия: конспект лекций / А.Д. Ваняшов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – 288 с.

### ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Газодинамические функции представляют собой безразмерные функции приведенной скорости  $\lambda$  или числа Маха  $M$ , равные отношениям важнейших параметров, характеризующих одномерный поток в различных его сечениях, к значениям этих параметров в критических сечениях или к значениям параметров заторможенного потока.

Под приведенной скоростью  $\lambda$  понимается отношение скорости газа к критической скорости:

$$\lambda = \frac{c}{c_{кр}} = \frac{c}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} RT^*}}, \text{ где}$$

$T^*$  - температура торможения, К;

$k = \frac{c_p}{c_v}$  - показатель изэнтропии;

$R$  – газовая постоянная.

Приведенная скорость может изменяться в диапазоне от  $0$  до  $\lambda_{\max} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}}$ .

Число Маха представляет собой отношение скорости газа к местной скорости звука:

$$M = \frac{c}{a} = \frac{c}{\sqrt{kRT}}$$

где  $T$  – статическая температура газа.

Число Маха может принимать любые положительные значения.

Приведенная скорость  $\lambda$  и число Маха  $M$  связаны между собой следующими соотношениями:

$$\lambda^2 = \frac{\frac{k+1}{2} M^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2}; \quad M^2 = \frac{\frac{2}{k+1} \lambda^2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2}.$$

Наиболее часто используются следующие газодинамические функции:  
функция  $\tau(\lambda)$ , равная отношению статической температуры потока  $T$  к температуре заторможенного потока  $T^*$  в том же сечении:

$$\tau(\lambda) = \frac{T}{T^*} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2;$$

функция  $\pi(\lambda)$ , равная отношению статического давления потока  $p$  к давлению заторможенного потока  $p^*$  в том же сечении:

$$\pi(\lambda) = \frac{p}{p^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}};$$

функция  $\varepsilon(\lambda)$ , равная отношению статической плотности потока  $\rho$  к плотности заторможенного потока  $\rho^*$  в том же сечении:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\rho}{\rho^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}};$$

функция  $q(\lambda)$  - приведенная плотность тока, равная отношению плотности тока в произвольном сечении к плотности тока в критическом сечении:

$$q(\lambda) = \frac{F}{F_{\text{кр}}} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda.$$

### ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ДЛЯ ВОЗДУХА (κ=1,4)

$\lambda$	$M$	$\tau(\lambda)$	$\pi(\lambda)$	$\varepsilon(\lambda)$	$q(\lambda)$	$f(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
0,00	0	1	1	1	0	1	0	-
0,01	0,0001	1,0000	0,9999	1,0000	0,0158	1,0001	0,0158	50,005
0,02	0,0003	0,9999	0,9998	0,9998	0,0315	1,0002	0,0316	25,010
0,03	0,0008	0,9999	0,9995	0,9996	0,0473	1,0005	0,0473	16,681
0,04	0,0013	0,9997	0,9991	0,9993	0,0631	1,0009	0,0631	12,520
0,05	0,0021	0,9996	0,9985	0,9990	0,0788	1,0015	0,0789	10,025
0,06	0,0030	0,9994	0,9979	0,9985	0,0945	1,0021	0,0947	8,3633
0,07	0,0041	0,9992	0,9971	0,9980	0,1102	1,0028	0,1105	7,1779
0,08	0,0053	0,9989	0,9963	0,9973	0,1259	1,0037	0,1263	6,2900
0,09	0,0068	0,9987	0,9953	0,9966	0,1415	1,0047	0,1422	5,6006
0,10	0,0083	0,9983	0,9942	0,9958	0,1571	1,0058	0,1580	5,0500
0,11	0,0101	0,9980	0,9930	0,9950	0,1726	1,0070	0,1739	4,6005
0,12	0,0120	0,9976	0,9916	0,9940	0,1882	1,0083	0,1897	4,2267
0,13	0,0141	0,9972	0,9902	0,9930	0,2036	1,0098	0,2056	3,9112
0,14	0,0164	0,9967	0,9886	0,9919	0,2190	1,0113	0,2216	3,6414
0,15	0,0188	0,9963	0,9869	0,9907	0,2344	1,0129	0,2375	3,4083
0,16	0,0214	0,9957	0,9851	0,9894	0,2497	1,0147	0,2535	3,2050
0,17	0,0242	0,9952	0,9832	0,9880	0,2649	1,0166	0,2695	3,0262
0,18	0,0271	0,9946	0,9812	0,9866	0,2801	1,0185	0,2855	2,8678
0,19	0,0303	0,9940	0,9791	0,9850	0,2952	1,0206	0,3015	2,7266
0,20	0,0336	0,9933	0,9769	0,9834	0,3103	1,0228	0,3176	2,6000
0,21	0,0370	0,9927	0,9745	0,9817	0,3252	1,0250	0,3337	2,4860
0,22	0,0407	0,9919	0,9721	0,9800	0,3401	1,0274	0,3499	2,3827
0,23	0,0445	0,9912	0,9695	0,9781	0,3549	1,0298	0,3660	2,2889
0,24	0,0485	0,9904	0,9668	0,9762	0,3696	1,0324	0,3823	2,2033
0,25	0,0526	0,9896	0,9640	0,9742	0,3842	1,0350	0,3985	2,1250
0,26	0,0570	0,9887	0,9611	0,9721	0,3987	1,0378	0,4148	2,0531
0,27	0,0615	0,9879	0,9581	0,9699	0,4131	1,0406	0,4311	1,9869
0,28	0,0662	0,9869	0,9550	0,9677	0,4274	1,0435	0,4475	1,9257
0,29	0,0711	0,9860	0,9518	0,9653	0,4416	1,0465	0,4640	1,8691
0,30	0,0761	0,9850	0,9485	0,9629	0,4557	1,0496	0,4804	1,8167
0,31	0,0814	0,9840	0,9451	0,9604	0,4697	1,0527	0,4970	1,7679

**Газодинамические функции для воздуха (k=1,4)**

$\lambda$	$M$	$\tau(\lambda)$	$\pi(\lambda)$	$\varepsilon(\lambda)$	$q(\lambda)$	$f(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
0,32	0,0868	0,9829	0,9415	0,9579	0,4835	1,0560	0,5135	1,7225
0,33	0,0924	0,9819	0,9379	0,9552	0,4973	1,0593	0,5302	1,6802
0,34	0,0982	0,9807	0,9342	0,9525	0,5109	1,0626	0,5469	1,6406
0,35	0,1042	0,9796	0,9303	0,9497	0,5244	1,0661	0,5636	1,6036
0,36	0,1104	0,9784	0,9264	0,9469	0,5377	1,0696	0,5804	1,5689
0,37	0,1167	0,9772	0,9224	0,9439	0,5509	1,0732	0,5973	1,5364
0,38	0,1233	0,9759	0,9183	0,9409	0,5640	1,0768	0,6142	1,5058
0,39	0,1300	0,9747	0,9141	0,9378	0,5770	1,0805	0,6312	1,4771
0,40	0,1370	0,9733	0,9097	0,9347	0,5897	1,0842	0,6483	1,4500
0,41	0,1441	0,9720	0,9053	0,9314	0,6024	1,0880	0,6654	1,4245
0,42	0,1515	0,9706	0,9008	0,9281	0,6149	1,0918	0,6826	1,4005
0,43	0,1590	0,9692	0,8962	0,9247	0,6272	1,0957	0,6999	1,3778
0,44	0,1667	0,9677	0,8915	0,9213	0,6394	1,0996	0,7172	1,3564
0,45	0,1746	0,9663	0,8868	0,9177	0,6515	1,1036	0,7346	1,3361
0,46	0,1828	0,9647	0,8819	0,9142	0,6633	1,1076	0,7521	1,3170
0,47	0,1911	0,9632	0,8770	0,9105	0,6750	1,1116	0,7697	1,2988
0,48	0,1997	0,9616	0,8719	0,9067	0,6866	1,1157	0,7874	1,2817
0,49	0,2084	0,9600	0,8668	0,9029	0,6979	1,1197	0,8052	1,2654
0,50	0,2174	0,9583	0,8616	0,8991	0,7091	1,1238	0,8230	1,2500
0,51	0,2266	0,9567	0,8563	0,8951	0,7201	1,1279	0,8410	1,2354
0,52	0,2360	0,9549	0,8510	0,8911	0,7310	1,1321	0,8590	1,2215
0,53	0,2456	0,9532	0,8455	0,8870	0,7416	1,1362	0,8771	1,2084
0,54	0,2554	0,9514	0,8400	0,8829	0,7521	1,1403	0,8953	1,1959
0,55	0,2655	0,9496	0,8344	0,8787	0,7623	1,1445	0,9137	1,1841
0,56	0,2757	0,9477	0,8287	0,8744	0,7724	1,1486	0,9321	1,1729
0,57	0,2863	0,9459	0,8230	0,8701	0,7823	1,1528	0,9506	1,1622
0,58	0,2970	0,9439	0,8171	0,8657	0,7920	1,1569	0,9693	1,1521
0,59	0,3079	0,9420	0,8112	0,8612	0,8015	1,1610	0,9880	1,1425
0,60	0,3191	0,9400	0,8053	0,8567	0,8108	1,1651	1,0069	1,1333
0,61	0,3306	0,9380	0,7993	0,8521	0,8199	1,1692	1,0259	1,1247
0,62	0,3423	0,9359	0,7932	0,8474	0,8288	1,1732	1,0450	1,1165
0,63	0,3542	0,9339	0,7870	0,8427	0,8375	1,1772	1,0642	1,1087

**Газодинамические функции для воздуха (к=1,4)**

$\lambda$	$M$	$\tau(\lambda)$	$\pi(\lambda)$	$\varepsilon(\lambda)$	$q(\lambda)$	$f(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
0,64	0,3663	0,9317	0,7808	0,8380	0,8460	1,1812	1,0835	1,1013
0,65	0,3788	0,9296	0,7745	0,8331	0,8543	1,1851	1,1030	1,0942
0,66	0,3914	0,9274	0,7681	0,8283	0,8623	1,1891	1,1226	1,0876
0,67	0,4043	0,9252	0,7617	0,8233	0,8702	1,1929	1,1424	1,0813
0,68	0,4175	0,9229	0,7553	0,8183	0,8778	1,1967	1,1622	1,0753
0,69	0,4309	0,9207	0,7487	0,8133	0,8852	1,2005	1,1822	1,0696
0,70	0,4446	0,9183	0,7422	0,8082	0,8924	1,2042	1,2024	1,0643
0,71	0,4586	0,9160	0,7355	0,8030	0,8994	1,2078	1,2227	1,0592
0,72	0,4729	0,9136	0,7289	0,7978	0,9061	1,2114	1,2432	1,0544
0,73	0,4874	0,9112	0,7221	0,7925	0,9126	1,2149	1,2638	1,0499
0,74	0,5022	0,9087	0,7154	0,7872	0,9189	1,2183	1,2845	1,0457
0,75	0,5172	0,9063	0,7085	0,7818	0,9250	1,2216	1,3055	1,0417
0,76	0,5326	0,9037	0,7017	0,7764	0,9308	1,2249	1,3266	1,0379
0,77	0,5483	0,9012	0,6948	0,7710	0,9364	1,2281	1,3478	1,0344
0,78	0,5642	0,8986	0,6878	0,7654	0,9418	1,2311	1,3692	1,0310
0,79	0,5805	0,8960	0,6808	0,7599	0,9470	1,2341	1,3908	1,0279
0,80	0,5970	0,8933	0,6738	0,7543	0,9519	1,2370	1,4126	1,0250
0,81	0,6139	0,8907	0,6668	0,7486	0,9565	1,2398	1,4346	1,0223
0,82	0,6311	0,8879	0,6597	0,7429	0,9610	1,2425	1,4568	1,0198
0,83	0,6485	0,8852	0,6526	0,7372	0,9652	1,2451	1,4791	1,0174
0,84	0,6664	0,8824	0,6454	0,7314	0,9692	1,2475	1,5016	1,0152
0,85	0,6845	0,8796	0,6382	0,7256	0,9729	1,2498	1,5244	1,0132
0,86	0,7030	0,8767	0,6310	0,7197	0,9764	1,2520	1,5473	1,0114
0,87	0,7218	0,8739	0,6238	0,7138	0,9796	1,2541	1,5705	1,0097
0,88	0,7410	0,8709	0,6165	0,7079	0,9826	1,2561	1,5939	1,0082
0,89	0,7605	0,8680	0,6092	0,7019	0,9854	1,2579	1,6175	1,0068
0,90	0,7803	0,8650	0,6019	0,6959	0,9880	1,2596	1,6413	1,0056
0,91	0,8006	0,8620	0,5946	0,6898	0,9902	1,2611	1,6653	1,0045
0,92	0,8212	0,8589	0,5873	0,6838	0,9923	1,2625	1,6896	1,0035
0,93	0,8421	0,8559	0,5800	0,6776	0,9941	1,2637	1,7141	1,0026
0,94	0,8635	0,8527	0,5726	0,6715	0,9957	1,2648	1,7389	1,0019
0,95	0,8852	0,8496	0,5652	0,6653	0,9970	1,2657	1,7639	1,0013

**Газодинамические функции для воздуха (k=1,4)**

$\lambda$	$M$	$\tau(\lambda)$	$\pi(\lambda)$	$\varepsilon(\lambda)$	$q(\lambda)$	$f(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
0,96	0,9074	0,8464	0,5578	0,6591	0,9981	1,2665	1,7892	1,0008
0,97	0,9299	0,8432	0,5505	0,6528	0,9989	1,2671	1,8147	1,0005
0,98	0,9529	0,8399	0,5431	0,6466	0,9995	1,2675	1,8405	1,0002
0,99	0,9762	0,8367	0,5357	0,6403	0,9999	1,2678	1,8666	1,0001
1,00	1,0000	0,8333	0,5283	0,6339	1,0000	1,2679	1,8929	1,0000
1,01	1,0242	0,8300	0,5209	0,6276	0,9999	1,2678	1,9196	1,0000
1,02	1,0489	0,8266	0,5135	0,6212	0,9995	1,2675	1,9465	1,0002
1,03	1,0740	0,8232	0,5061	0,6148	0,9989	1,2671	1,9738	1,0004
1,04	1,0995	0,8197	0,4987	0,6084	0,9981	1,2664	2,0013	1,0008
1,05	1,1256	0,8163	0,4913	0,6019	0,9970	1,2656	2,0292	1,0012
1,06	1,1521	0,8127	0,4840	0,5955	0,9957	1,2646	2,0574	1,0017
1,07	1,1791	0,8092	0,4766	0,5890	0,9942	1,2634	2,0859	1,0023
1,08	1,2066	0,8056	0,4693	0,5825	0,9924	1,2619	2,1147	1,0030
1,09	1,2345	0,8020	0,4619	0,5760	0,9904	1,2603	2,1439	1,0037
1,10	1,2630	0,7983	0,4546	0,5695	0,9881	1,2585	2,1735	1,0045
1,11	1,2921	0,7947	0,4473	0,5629	0,9856	1,2565	2,2034	1,0055
1,12	1,3216	0,7909	0,4400	0,5564	0,9829	1,2542	2,2337	1,0064
1,13	1,3518	0,7872	0,4328	0,5498	0,9800	1,2518	2,2644	1,0075
1,14	1,3824	0,7834	0,4255	0,5432	0,9768	1,2491	2,2955	1,0086
1,15	1,4137	0,7796	0,4183	0,5366	0,9734	1,2463	2,3270	1,0098
1,16	1,4455	0,7757	0,4111	0,5300	0,9698	1,2432	2,3588	1,0110
1,17	1,4779	0,7719	0,4040	0,5234	0,9660	1,2399	2,3911	1,0124
1,18	1,5110	0,7679	0,3969	0,5168	0,9619	1,2364	2,4239	1,0137
1,19	1,5446	0,7640	0,3898	0,5102	0,9577	1,2326	2,4571	1,0152
1,20	1,5789	0,7600	0,3827	0,5035	0,9532	1,2286	2,4907	1,0167
1,21	1,6139	0,7560	0,3757	0,4969	0,9485	1,2244	2,5248	1,0182
1,22	1,6495	0,7519	0,3687	0,4903	0,9435	1,2200	2,5594	1,0198
1,23	1,6858	0,7479	0,3617	0,4837	0,9384	1,2154	2,5944	1,0215
1,24	1,7228	0,7437	0,3548	0,4770	0,9331	1,2105	2,6300	1,0232
1,25	1,7606	0,7396	0,3479	0,4704	0,9275	1,2054	2,6661	1,0250
1,26	1,7990	0,7354	0,3411	0,4638	0,9218	1,2001	2,7027	1,0268
1,27	1,8382	0,7312	0,3343	0,4572	0,9158	1,1945	2,7399	1,0287



**Газодинамические функции для воздуха (k=1,4)**

$\lambda$	$M$	$\tau(\lambda)$	$\pi(\lambda)$	$\varepsilon(\lambda)$	$q(\lambda)$	$f(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
1,28	1,8782	0,7269	0,3275	0,4505	0,9097	1,1887	2,7776	1,0306
1,29	1,9190	0,7227	0,3208	0,4439	0,9034	1,1827	2,8159	1,0326
1,30	1,9606	0,7183	0,3142	0,4373	0,8968	1,1764	2,8548	1,0346
1,31	2,0030	0,7140	0,3075	0,4307	0,8901	1,1699	2,8943	1,0367
1,32	2,0462	0,7096	0,3010	0,4242	0,8832	1,1632	2,9344	1,0388
1,33	2,0904	0,7052	0,2945	0,4176	0,8761	1,1563	2,9751	1,0409
1,34	2,1354	0,7007	0,2880	0,4110	0,8688	1,1491	3,0165	1,0431
1,35	2,1813	0,6963	0,2816	0,4045	0,8614	1,1417	3,0586	1,0454
1,36	2,2282	0,6917	0,2753	0,3980	0,8538	1,1340	3,1014	1,0476
1,37	2,2761	0,6872	0,2690	0,3915	0,8460	1,1262	3,1449	1,0500
1,38	2,3249	0,6826	0,2628	0,3850	0,8380	1,1181	3,1891	1,0523
1,39	2,3748	0,6780	0,2566	0,3785	0,8299	1,1098	3,2341	1,0547
1,40	2,4257	0,6733	0,2505	0,3720	0,8216	1,1012	3,2798	1,0571
1,41	2,4778	0,6687	0,2445	0,3656	0,8131	1,0924	3,3264	1,0596
1,42	2,5309	0,6639	0,2385	0,3592	0,8045	1,0834	3,3738	1,0621
1,43	2,5851	0,6592	0,2326	0,3528	0,7958	1,0742	3,4220	1,0647
1,44	2,6406	0,6544	0,2267	0,3464	0,7869	1,0648	3,4711	1,0672
1,45	2,6972	0,6496	0,2209	0,3401	0,7779	1,0551	3,5212	1,0698
1,46	2,7551	0,6447	0,2152	0,3338	0,7687	1,0452	3,5721	1,0725
1,47	2,8143	0,6399	0,2095	0,3275	0,7594	1,0352	3,6240	1,0751
1,48	2,8748	0,6349	0,2040	0,3212	0,7500	1,0249	3,6769	1,0778
1,49	2,9367	0,6300	0,1985	0,3150	0,7404	1,0144	3,7309	1,0806
1,50	3,0000	0,6250	0,1930	0,3088	0,7307	1,0037	3,7859	1,0833
1,51	3,0647	0,6200	0,1876	0,3027	0,7209	0,9927	3,8419	1,0861
1,52	3,1310	0,6149	0,1823	0,2965	0,7110	0,9816	3,8991	1,0889
1,53	3,1987	0,6099	0,1771	0,2904	0,7010	0,9703	3,9575	1,0918
1,54	3,2681	0,6047	0,1720	0,2844	0,6908	0,9588	4,0171	1,0947
1,55	3,3391	0,5996	0,1669	0,2784	0,6806	0,9472	4,0779	1,0976
1,56	3,4118	0,5944	0,1619	0,2724	0,6703	0,9353	4,1400	1,1005
1,57	3,4863	0,5892	0,1570	0,2665	0,6599	0,9232	4,2034	1,1035
1,58	3,5626	0,5839	0,1521	0,2606	0,6494	0,9110	4,2682	1,1065
1,59	3,6408	0,5786	0,1474	0,2547	0,6388	0,8986	4,3345	1,1095

