

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»
(Самарский университет)

Институт двигателей и энергетических установок
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов

Методическое пособие

Методика формирования модели упрощенного проектного
термогазодинамического расчета ГТД СТ в программном пакете АСТРА»

Студент группы 2305-240502D:

Рызыванов И.П.

Преподаватель: к.т.н., доцент кафедры

ТДЛА

Ткаченко А.Ю.

Дата:

Упрощенный термогазодинамический расчет газотурбинного двигателя со свободной турбиной

Газотурбинный двигатель со свободной турбиной (ГТД СТ) представляет собой газотурбинный двигатель, основная цель которого, является отбор энергии от потока в выходном устройстве и подвода данной энергии в виде механической работы к винту вертолета.

Рассмотрим схему ГТД СТ с одновальным газогенератором (рис. 1).

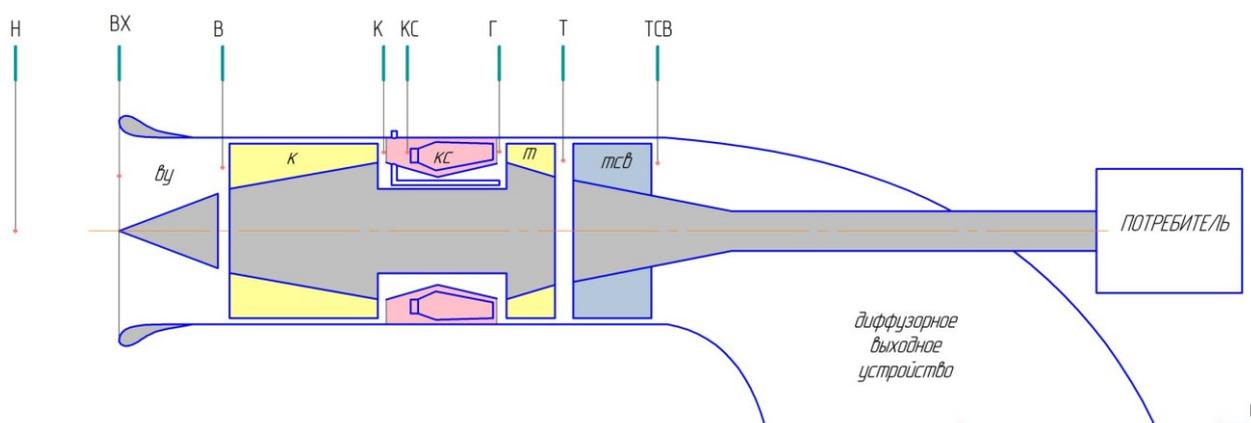


Рисунок 1 Расчетная схема ГТД СТ

Из этой схемы видно, что ГТД СТ состоит из:

- Входное устройство (ВУ)
- Компрессор (К)
- Камера сгорания (КС)
- Турбина (Т)
- Свободная турбины (ТСВ)
- Диффузное выходное устройство

Соответственно в этих узлах и потребуется произвести расчет.

Для начала оговорим допущения принимаемые при упрощенном термогазодинамическом расчете:

1. Теплоемкость, показатель изоэнтропы воздуха и продуктов сгорания остается постоянной (не изменяется от температуры)
2. Не учитывается влажность воздуха, и значения параметров состояния берутся без учета отклонений от МСА
3. Расчет проводится с помощью упрощенной модели

Расчет в программе АСТРА 7.20

Исходя из схемы изображенной на рисунке 1, добавим элементы упрощенного проектного расчета в основное поле программы (Рис. 2). Добавление осуществляется при однократном нажатии левой кнопкой мыши на элемент.

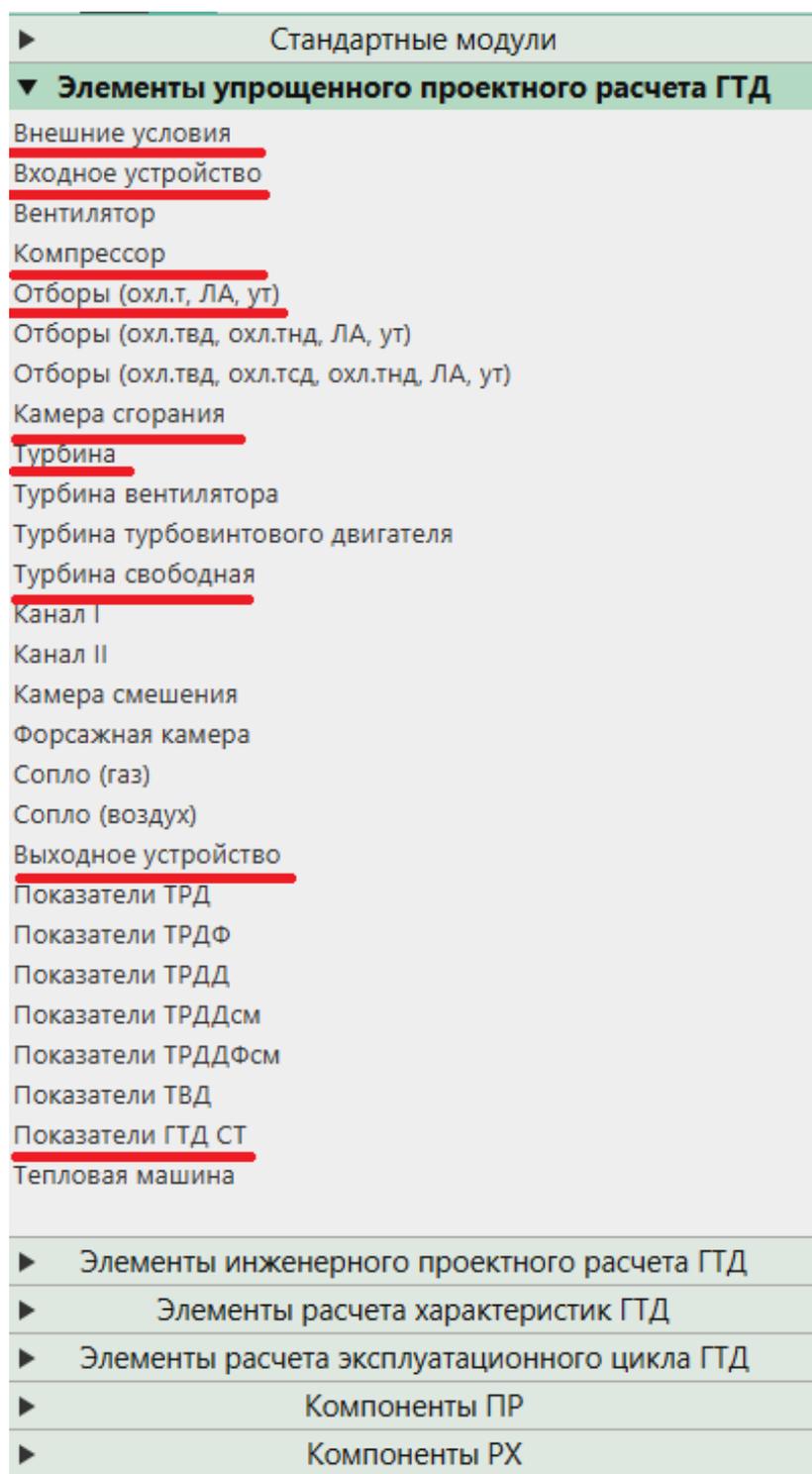


Рисунок 2 Элементы расчета ГТД СТ

Посмотрим, что мы получили (рис. 3)

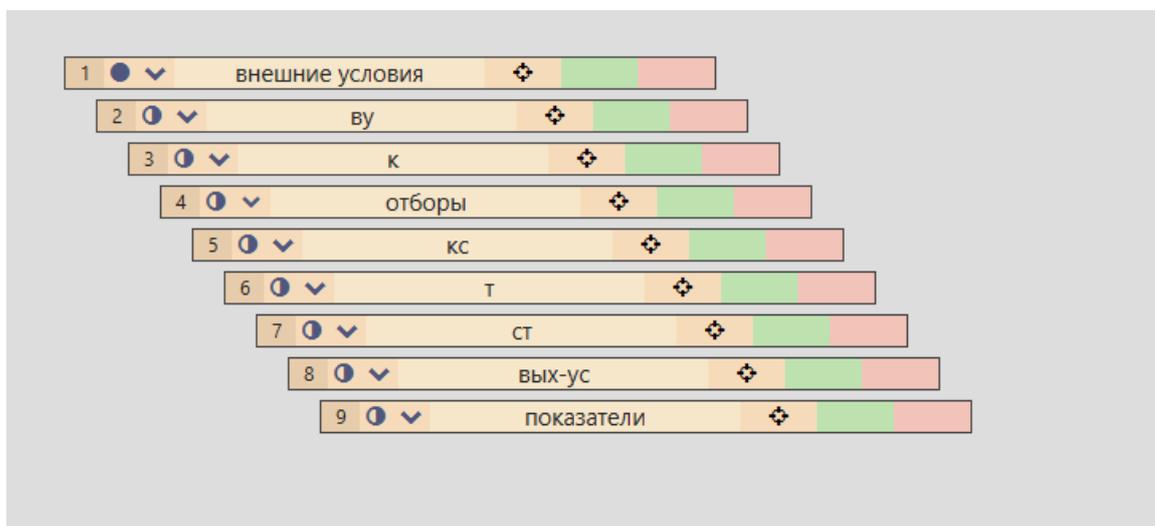


Рисунок 3 Основное поле программы после добавление элементов

Компонент можно удалить, нажав на красный прямоугольник (рис. 4). Кроме этого, можно указать каким по порядку будет данный элемент, для этого следует нажать на порядковый номер, удалить его и ввести желаемый порядковый номер элемента (рис. 5).

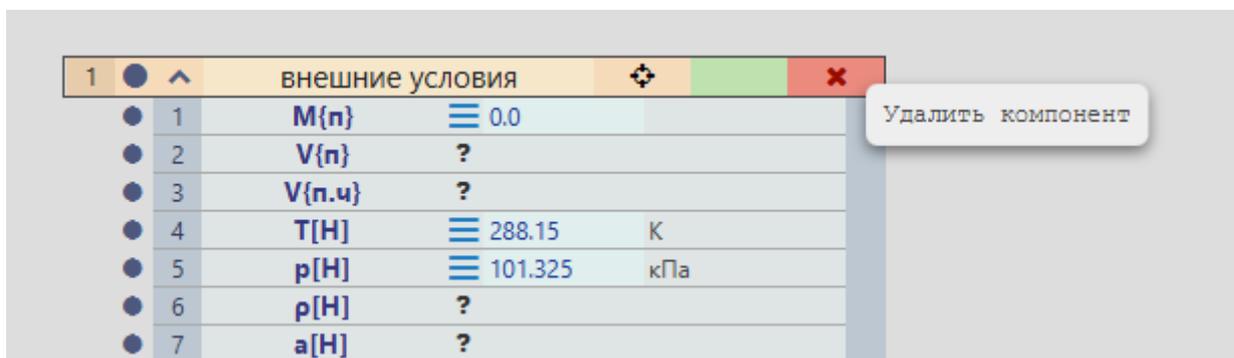


Рисунок 4 Удаление элемента из основного поля программы

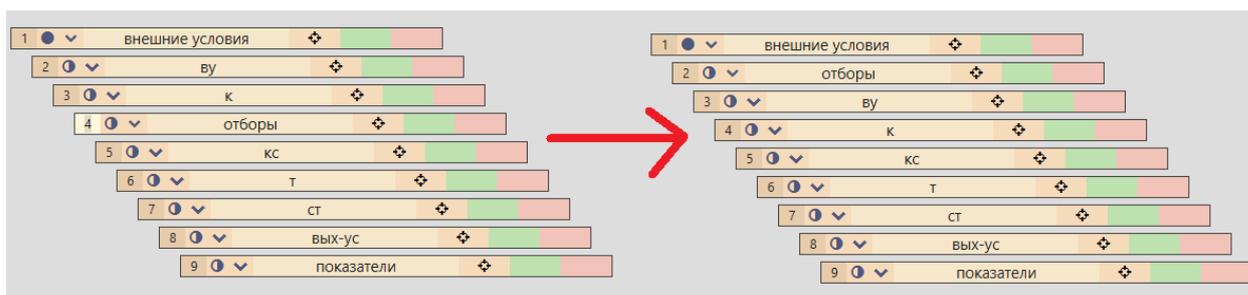


Рисунок 5 Изменение порядка элемента

Обратим внимание на маркеры около строк параметров. При выбранном (заполненном маркере) значение параметра будет выводиться в результат расчета, при не выбранном (пустом маркере) параметр не будет выводиться в результат расчета (рис. 6).

№	Параметр	Значение	Единица
1	M(n)	0.0	
2	V(n)	?	
3	V(п.ч)	?	
4	T(H)	288.15	К
5	p(H)	101.325	кПа
6	ρ(H)	?	
7	a(H)	?	

внешние условия			
p [H]	кПа		101,325
ρ [H]	кг/ (м ³)		1,2252
a [H]	м/с		340,26

Рисунок 6 Вывод параметров в результат расчета

Далее рассмотрим расчет на примере двигателя RTM 322. Входные параметры при упрощенном термогазодинамическом расчете ГТД СТ представлены ниже, в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные

Параметр	Значение	Описание
1	2	3
Внешние условия		
π	205	Число Маха скорости полета
T_H, K	281,15	Температура атмосферного воздуха
p_H, kPa	89,872	Давление атмосферного воздуха
Входное устройство		
$\sigma_{вх}$		Коэффициент восстановления полного давления во входном устройстве
Компрессор		
π_K^*		Степень повышения давления в компрессоре
η_K^*		КПД компрессора
Отборы		

Продолжение таблицы 1

1	2	3
охл.са.т		Относительная величина отбора воздуха на охлаждение соплового аппарата турбины
охл.рк.т		Относительная величина отбора воздуха на охлаждение рабочих колёс турбины
отб.ЛА		Относительная величина отбора воздуха на нужды летательного аппарата
ут		Относительная величина утечек воздуха
Камера сгорания		
$\sigma_{кс}$		Коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания
$\eta_{г}$		Коэффициент полноты сгорания топлива в камере сгорания
Γ^*, K		Полная температура газа в сечении на выходе
Турбина газогенератора		
η_m		Коэффициент механических потерь в трансмиссии
$\eta_{г}^*$		КПД турбины
Свободная турбина		
$\pi_{к}^*$		Коэффициент восстановления полного давления в канале
Выходное устройство		
φ_c		Коэффициент скорости
Показатели		
$N_e, кВт$		Эффективная мощность двигателя

Для удобства обозначим исходные параметры в АСТРА, как входные (рис. 7). Обратим внимание, что слева от основного поля программы появились эти параметры. Проставив требуемые связи между параметрами далее, нам будет удобнее изменять какой-то из входных параметров в левой части программы, чем искать среди элементов двигателя нужный параметр.

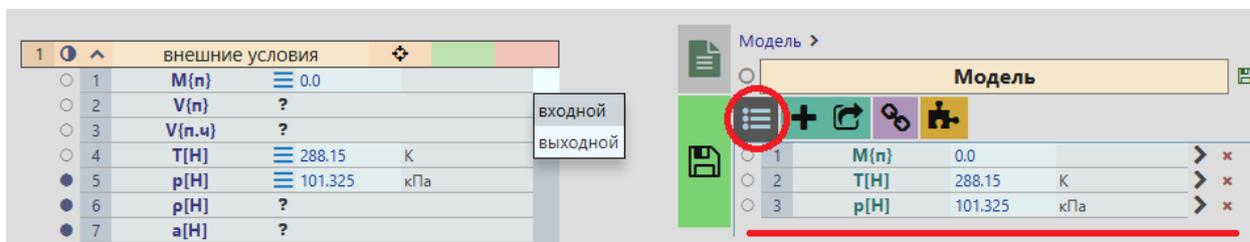


Рисунок 7 Обозначение исходных параметров

Зададим наши исходные параметры (рис. 8).

№	Параметр	Значение	Единица	Тип
1	M(n)	0.205		?
2	T(H)	281.5	К	?
3	p(H)	89.872	кПа	?
4	$\sigma\{вх\}$	0.95		?
5	$\pi^*\{к\}$	14.0		?
6	$\eta^*\{к\}$	0.82		?
7	$g\{охл.са.т\}$	0.01		?
8	$g\{охл.рк.т\}$	0.015		?
9	$g\{отб.ЛА\}$	0.02		?
10	$g\{ут\}$	0.01		?
11	$\sigma\{кс\}$	0.935		?
12	$\eta\{r\}$	0.98		?
13	T*(Г)	1400.0	К	?
14	$\eta\{m\}$	0.98		?
15	$\eta^*\{т\}$	0.88		?
16	$\pi\{ср\}$	1.05		?
17	$\eta\{m.св\}$	0.97		?
18	$\eta^*\{тсв\}$	0.9		?

Рисунок 8 Задание исходных параметров

Далее нам нужно связать параметры рабочего тела, исходя из схемы изображенной на рисунке 1. Из входного устройства воздух попадает в

компрессор, следовательно на входе в компрессор параметры рабочего тела равны параметрам рабочего тела на выходе из входного устройства, и так далее (рис. 9...16).

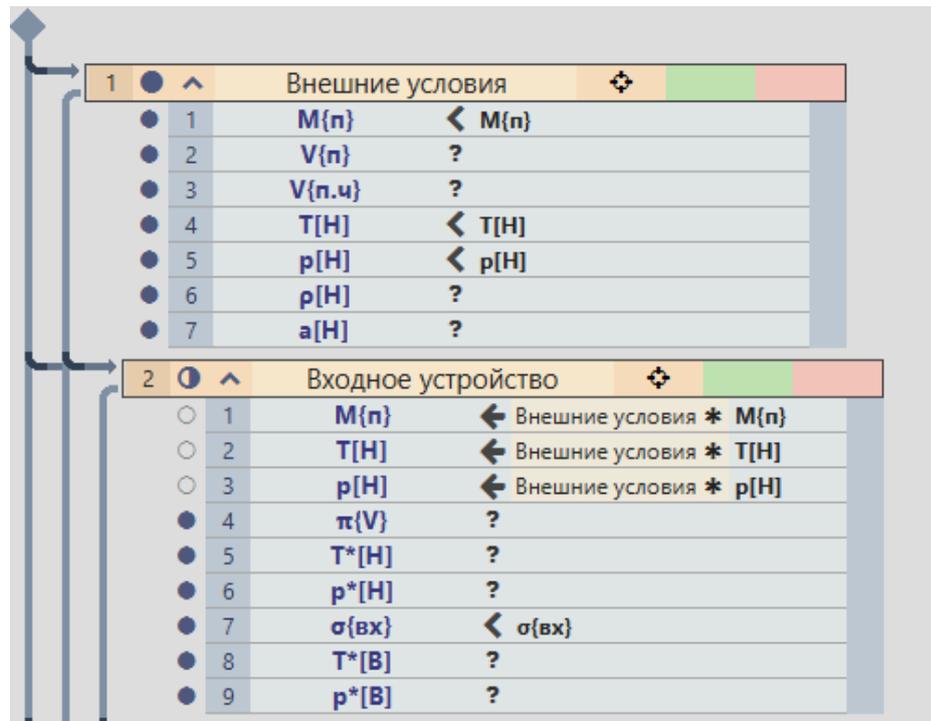


Рисунок 9 Связь параметров между внеш. усл. и вх. уст-вом

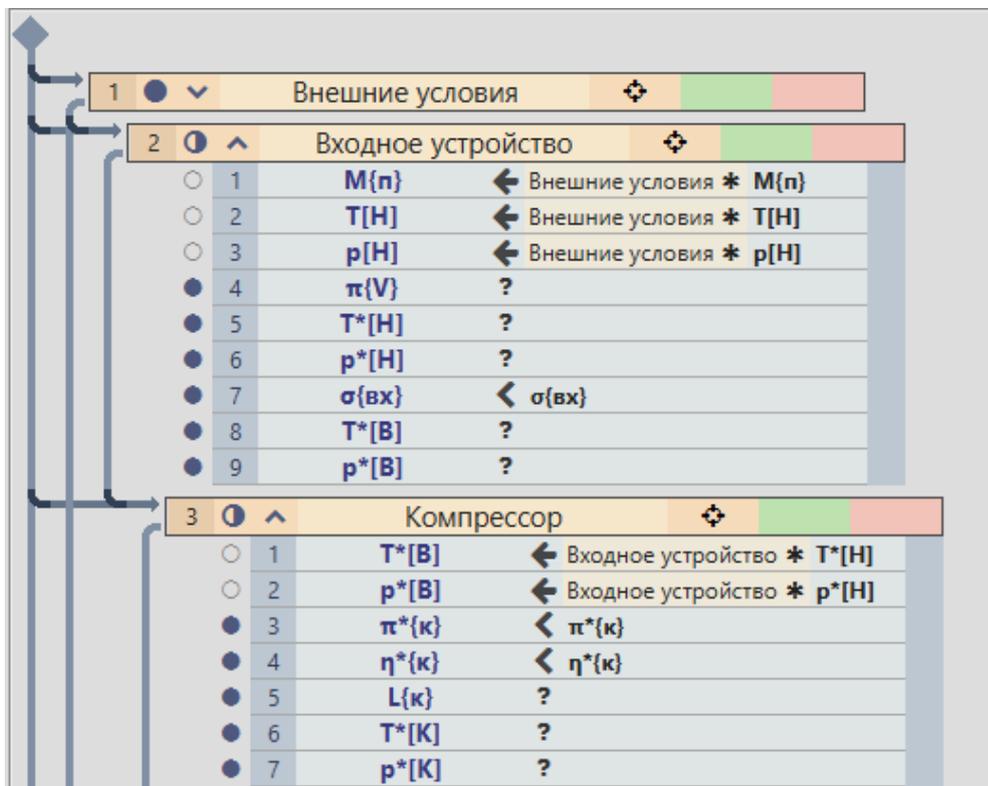


Рисунок 10 Связь параметров между входным устройством и компрессором

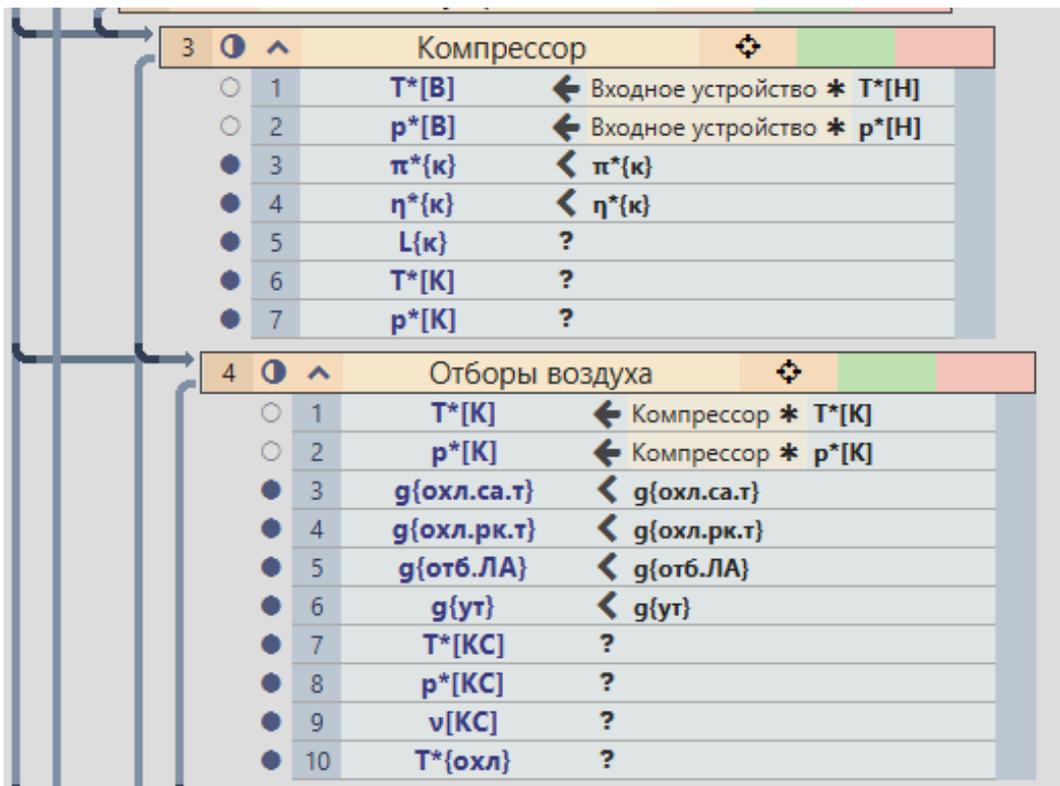


Рисунок 11 Связь параметров между компрессором и элементом, учитывающим отборы воздуха

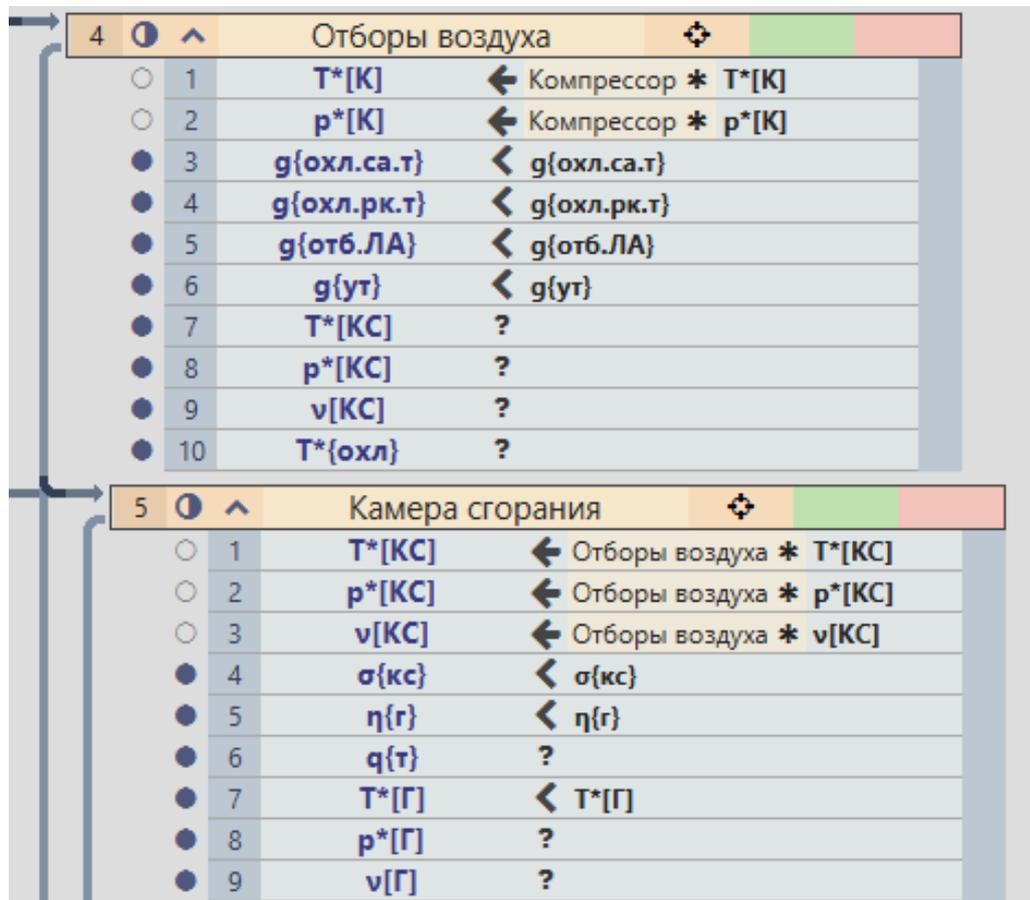


Рисунок 12 Связь параметров между отб. воздуха и КС

5 Камера сгорания		
○ 1	$T^*[KC]$	← Отборы воздуха * $T^*[KC]$
○ 2	$p^*[KC]$	← Отборы воздуха * $p^*[KC]$
○ 3	$v[KC]$	← Отборы воздуха * $v[KC]$
● 4	$\sigma\{kc\}$	← $\sigma\{kc\}$
● 5	$\eta\{r\}$	← $\eta\{r\}$
● 6	$q\{r\}$?
● 7	$T^*[\Gamma]$	← $T^*[\Gamma]$
● 8	$p^*[\Gamma]$?
● 9	$v[\Gamma]$?

6 Турбина компрессора		
○ 1	$T^*[\Gamma]$	← Камера сгорания * $T^*[\Gamma]$
○ 2	$p^*[\Gamma]$	← Камера сгорания * $p^*[\Gamma]$
○ 3	$v[\Gamma]$	← Камера сгорания * $v[\Gamma]$
○ 4	$T^*\{охл\}$	← Компрессор * $T^*[K]$
○ 5	$g\{охл.са.т\}$	← Отборы воздуха * $g\{охл.са.т\}$
○ 6	$g\{охл.рк.т\}$	← Отборы воздуха * $g\{охл.рк.т\}$
○ 7	$L\{к\}$	← Компрессор * $L\{к\}$
● 8	$\eta\{m\}$	← $\eta\{m\}$
● 9	$\eta^*\{r\}$	← $\eta^*\{r\}$
● 10	$\pi^*\{r\}$?
● 11	$L\{r\}$?
● 12	$T^*\{CA.т\}$?
● 13	$T^*\{PK.т\}$?
● 14	$T^*\{T\}$?
● 15	$p^*\{T\}$?
● 16	$v\{T\}$?

Рисунок 13 Связь параметров между КС и ТК

6 Турбина компрессора		
○ 1	$T^*[\Gamma]$	← Камера сгорания * $T^*[\Gamma]$
○ 2	$p^*[\Gamma]$	← Камера сгорания * $p^*[\Gamma]$
○ 3	$v[\Gamma]$	← Камера сгорания * $v[\Gamma]$
○ 4	$T^*\{охл\}$	← Компрессор * $T^*[K]$
○ 5	$g\{охл.са.т\}$	← Отборы воздуха * $g\{охл.са.т\}$
○ 6	$g\{охл.рк.т\}$	← Отборы воздуха * $g\{охл.рк.т\}$
○ 7	$L\{к\}$	← Компрессор * $L\{к\}$
● 8	$\eta\{m\}$	← $\eta\{m\}$
● 9	$\eta^*\{r\}$	← $\eta^*\{r\}$
● 10	$\pi^*\{r\}$?
● 11	$L\{r\}$?
● 12	$T^*\{CA.т\}$?
● 13	$T^*\{PK.т\}$?
● 14	$T^*\{T\}$?
● 15	$p^*\{T\}$?
● 16	$v\{T\}$?

7 Свободная турбина		
○ 1	$T^*\{T\}$	← Турбина компрессора * $T^*\{T\}$
○ 2	$p^*\{T\}$	← Турбина компрессора * $p^*\{T\}$
○ 3	$v\{T\}$	← Турбина компрессора * $v\{T\}$
○ 4	$\pi\{ср\}$	≡ 1.05
○ 5	$p\{H\}$	← Внешние условия * $p\{H\}$
● 6	$\eta\{m.св\}$	← $\eta\{m.св\}$
● 7	$\eta^*\{тсв\}$	← $\eta^*\{тсв\}$
● 8	$\pi^*\{тсв\}$?
● 9	$L\{тсв\}$?
● 10	$N\{е.уд\}$?
● 11	$T^*\{TCB\}$?
● 12	$p^*\{TCB\}$?
● 13	$v\{TCB\}$?

Рисунок 14 Связь параметров между ТК и СТ

7			Свободная турбина	
<input type="radio"/>	1	$T^*[T]$	←	Турбина компрессора * $T^*[T]$
<input type="radio"/>	2	$p^*[T]$	←	Турбина компрессора * $p^*[T]$
<input type="radio"/>	3	$v[T]$	←	Турбина компрессора * $v[T]$
<input type="radio"/>	4	$\pi\{cp\}$	≡	1.05
<input type="radio"/>	5	$p[H]$	←	Внешние условия * $p[H]$
<input checked="" type="radio"/>	6	$\eta\{m.cb\}$	←	$\eta\{m.cb\}$
<input checked="" type="radio"/>	7	$\eta^*\{tcb\}$	←	$\eta^*\{tcb\}$
<input checked="" type="radio"/>	8	$\pi^*\{tcb\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	9	$L\{tcb\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	10	$N\{e.уд\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	11	$T^*\{TCB\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	12	$p^*\{TCB\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	13	$v\{TCB\}$?	

8			Выходное устройство	
<input type="radio"/>	1	$T^*\{TCB\}$	←	Свободная турбина * $T^*\{TCB\}$
<input type="radio"/>	2	$v\{TCB\}$	←	Свободная турбина * $v\{TCB\}$
<input checked="" type="radio"/>	3	$\varphi\{c\}$	≡	0.9
<input checked="" type="radio"/>	4	$\pi\{cp\}$	←	Свободная турбина * $\pi\{cp\}$
<input checked="" type="radio"/>	5	$c\{C\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	6	$T\{C\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	7	$v\{C\}$?	

Рисунок 15 Связь параметров между СТ и вых. уст-вом

8			Выходное устройство	
<input type="radio"/>	1	$T^*\{TCB\}$	←	Свободная турбина * $T^*\{TCB\}$
<input type="radio"/>	2	$v\{TCB\}$	←	Свободная турбина * $v\{TCB\}$
<input checked="" type="radio"/>	3	$\varphi\{c\}$	≡	0.9
<input checked="" type="radio"/>	4	$\pi\{cp\}$	←	Свободная турбина * $\pi\{cp\}$
<input checked="" type="radio"/>	5	$c\{C\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	6	$T\{C\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	7	$v\{C\}$?	

9			Показатели двигателя	
<input type="radio"/>	1	$q\{t\}$	←	Камера сгорания * $q\{t\}$
<input type="radio"/>	2	$v\{KC\}$	←	Камера сгорания * $v\{KC\}$
<input checked="" type="radio"/>	3	$N\{e\}$	≡	882.0 кВт
<input checked="" type="radio"/>	4	$N\{e.уд\}$	←	Свободная турбина * $N\{e.уд\}$
<input checked="" type="radio"/>	5	$G\{в\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	6	$G\{т.ч\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	7	$C\{e\}$?	
<input checked="" type="radio"/>	8	$\eta\{e\}$?	

Рисунок 16 Связь параметров между выходным устройством и показателями двигателя

Расставив требуемые связи, можем запустить расчет (рис. 17).



Рисунок 17 — Кнопка запуска расчета

Запустив расчет, откроем результаты расчета, с помощью кнопки, находящейся под кнопкой запуска расчета. Результаты расчета представляются в виде таблицы (рис. 18), которые можно перенести в электронные таблицы, но об этом позже.

Показатели двигателя				
$N\{e\}$	кВт		882,0	Эффективная мощность двигателя
$N\{e.уд\}$	кВт*с/кг		299,969	Удельная эффективная мощность двигателя
$G\{в\}$	кг/с		2,94	Расход воздуха через двигатель
$G\{т.ч\}$	кг/ч		239,8	Часовой расход топлива в камере сгорания
$C\{e\}$	кг/(кВт*ч)		0,2719	Эффективный удельный расход топлива
$\eta\{e\}$	-		0,3087	Эффективный КПД двигателя

Рисунок 18 — Результаты расчета

Предположим, что у нас нету эффективной мощности, но есть расход воздуха, тогда нужно в меню параметра эффективной мощности выбрать «рассчитывать», а в меню расхода воздуха «задавать» (рис. 19).

Показатели двигателя				
1	$q\{т\}$	←	Камера сгорания * $q\{т\}$	
2	$v\{КС\}$	←	Камера сгорания * $v\{КС\}$	
3	$N\{e\}$	882.0	кВт	
4	$N\{e.уд\}$		урбина * $N\{e.уд\}$	<ul style="list-style-type: none"> задавать рассчитывать
5	$G\{в\}$			
6	$G\{т.ч\}$			
7	$C\{e\}$?		
8	$\eta\{e\}$?		

Рисунок 19 — Изменение задаваемых параметров

Обратим внимание на меню согласования (рис. 20), появился параметр, который будет изменяться итерационно, для поиска значения, при котором будет разрешено уравнение (в меню «Уравнения»). Здесь стоит сказать, что значение варьируемых параметров должно совпадать с числом уравнений иначе, расчет не будет произведен.

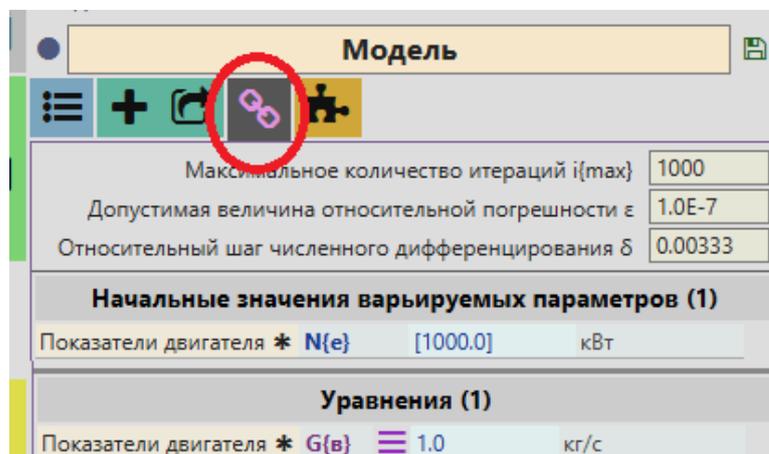


Рисунок 20 — Меню согласования параметров

Табуляция параметров

Для табуляции включим данный режим расчета в АСТРА (рис. 21).

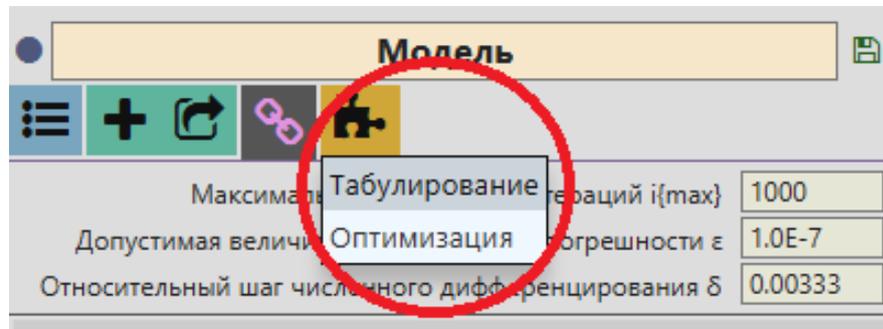


Рисунок 21 — Включение табуляции

Будем табулировать значение степени повышения давления в компрессоре (рис. 22).

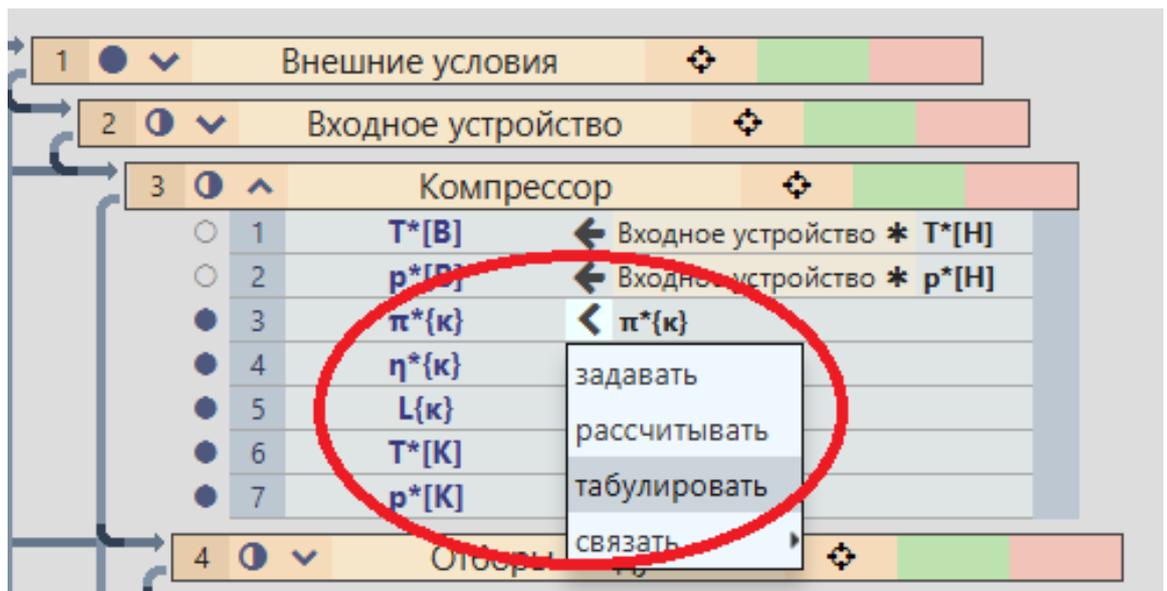


Рисунок 22— Выбор табулируемого параметра

Далее перейдем в меню табулирования и зададимся начальным значением переменной $\pi_k^* = 5$, и добавим конечную точку 20, с значением $\pi_k^* = 20$ (либо можно добавлять значение параметра по очереди), представлено на рисунке 23. Запустим расчет и обратим внимание, что теперь имеем результаты 20-ти расчетом с варьируемым π_k^* (рис. 24). Скопировав все данные их можно занести в таблицу Excel.

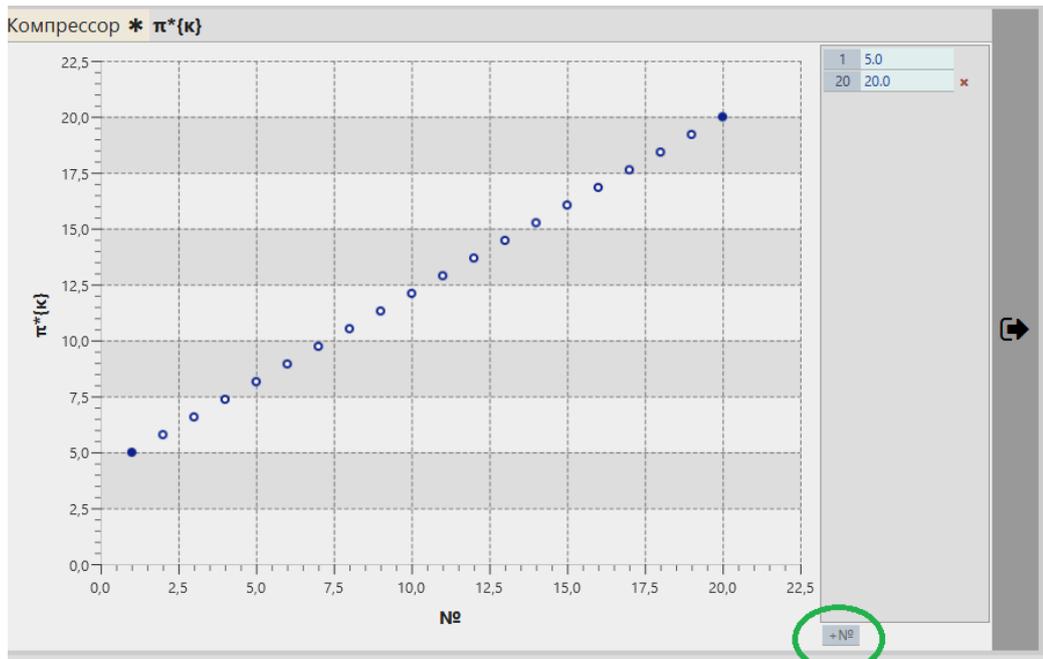


Рисунок 23 — Задание диапазона варьирования параметра

Показатели двигателя

N(e)	кВт	882,0	882,0
N(e.уд)	кВт*с/кп	253,322	266,305
G(v)	кп/с	3,482	3,312
G(т.ч)	кп/ч	332,2	310,2
C(e)	кп/(кВт*ч)	0,3766	0,3517
$\eta(e)$	-	0,2228	0,2386

Рисунок 24 — Результат расчета

Для нашего удобства, нужно данные отформатировать. Для этого зайдём в меню «Данные» и воспользуемся функцией «Текст по столбцам» (рис. 25)

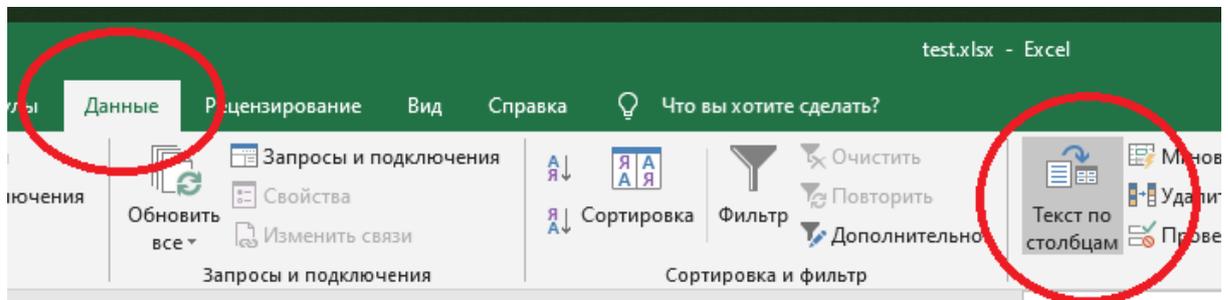


Рисунок 25 — Форматирование данных

Далее откроется меню, в котором выберем символ разделитель, в нашем случае это прямая «|». И нажмем готово (рис. 26). Результат форматирования представлен на рисунке 27.

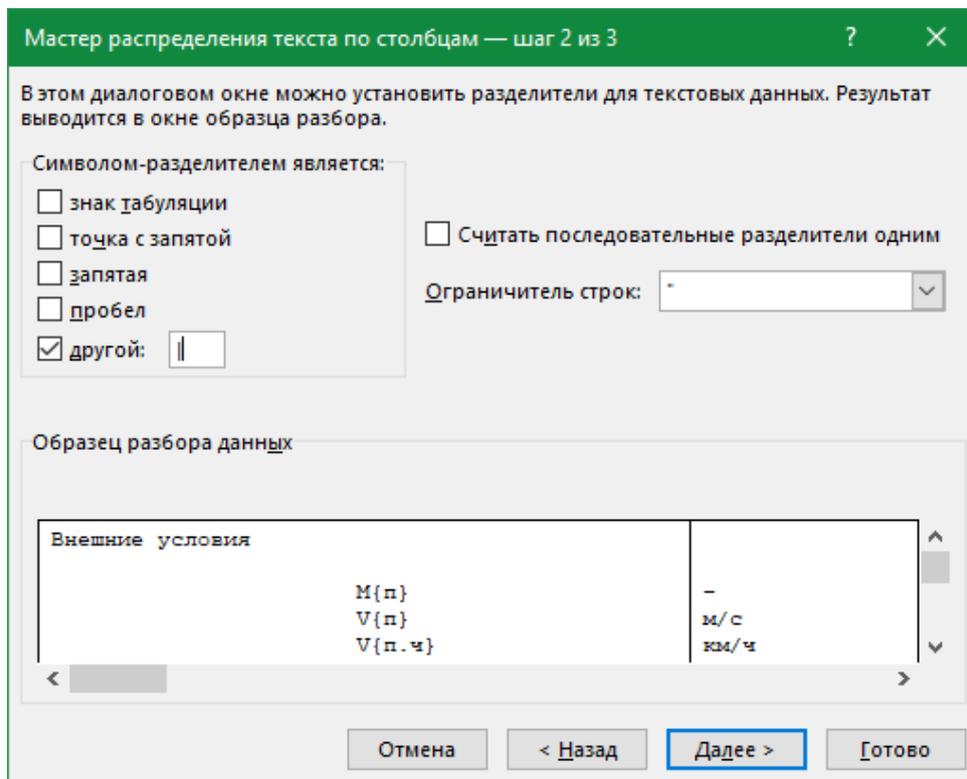


Рисунок 26 — Меню форматирования

Внешние условия																				
-	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205
m/c	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71	65,71
км/ч	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54	236,54
K	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68	255,68
кПа	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048	54,048
кг/(м³)	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365	0,7365
м/с	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52	320,52
Входное устройство																				
-	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297	1,0297
K	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83
кПа	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655	55,655
-	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
K	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83	257,83
кПа	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089	50,089
Компрессор																				
-	5	5,7895	6,5789	7,3684	8,1579	8,9474	9,7368	10,5263	11,3158	12,1053	12,8947	13,6842	14,4737	15,2632	16,0526	16,8421	17,6316	18,4211	19,2105	20
-	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
кДж/кг	184,49	205,89	225,31	243,12	259,62	275,02	289,47	303,11	316,03	328,33	340,06	351,3	362,08	372,45	382,44	392,08	401,41	410,45	419,21	427,72
K	441,4	462,7	482,02	499,74	516,16	531,48	545,86	559,43	572,29	584,52	596,2	607,38	618,11	628,42	638,36	647,96	657,24	666,23	674,95	683,42
кПа	278,274	322,212	366,15	410,087	454,025	497,963	541,901	585,839	629,777	673,715	717,653	761,591	805,529	849,467	893,405	937,343	981,281	1025,219	1069,157	1113,095

Рисунок 27 — Полученный формат данных

По полученным данным можем построить график зависимости эффективного КПД η_e от π_k^* (рис. 28).

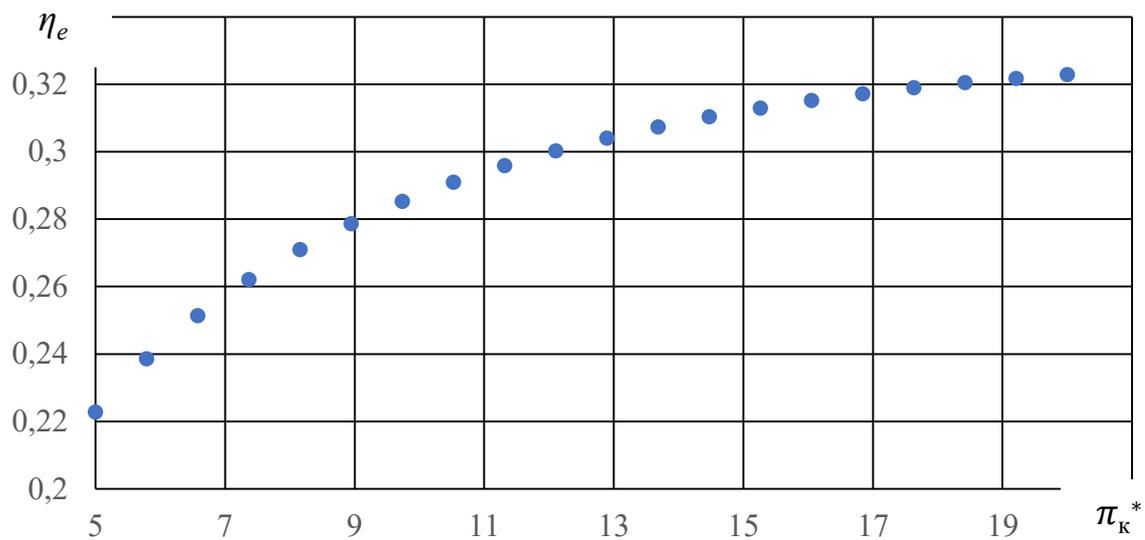


Рисунок 28 — График зависимости η_e от π_k^*