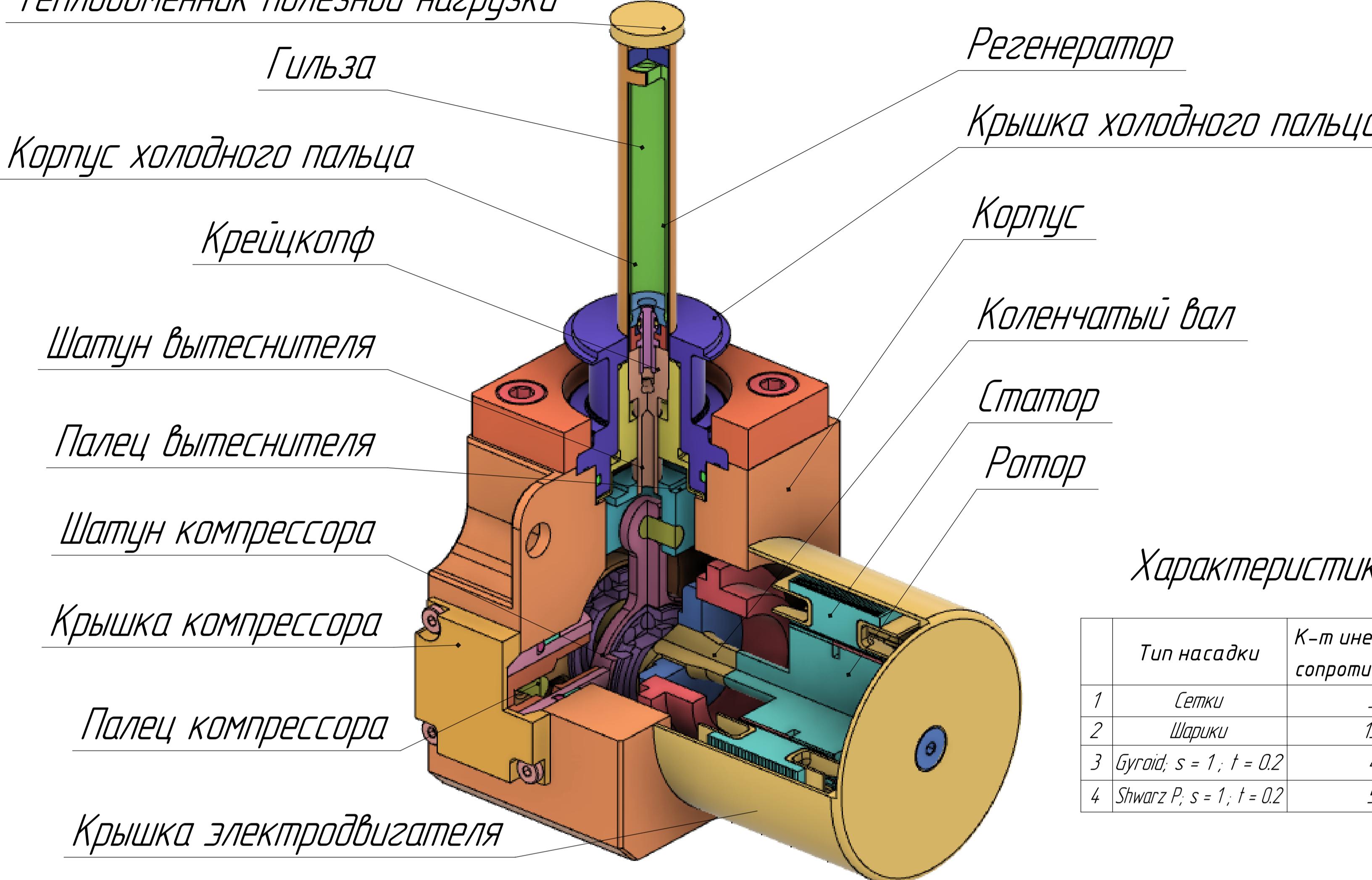


Микрокриогенная газовая машина

Теплообменник полезной нагрузки

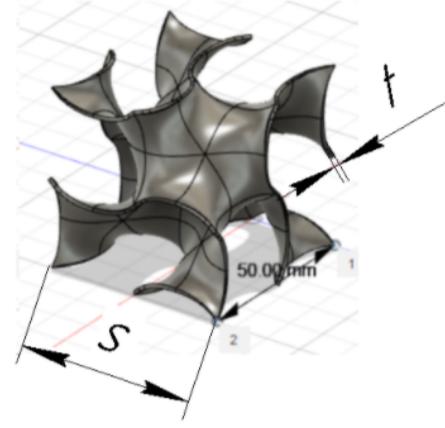


Технические характеристики

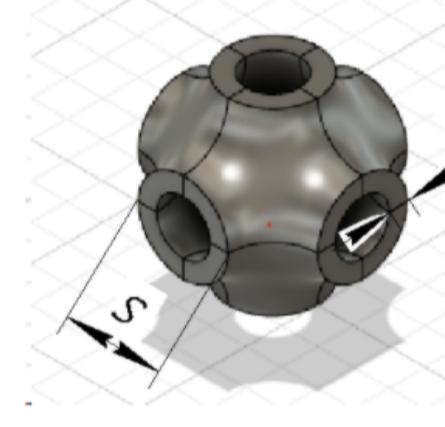
Температура криостатирования	77К
Температура окружающей среды	293К
Рабочее вещество	гелий
Холодопроизводительность	0,5 Вт
Пусковой режим	0,25 Вт
Стационарный режим	
Потребляемая мощность	
Пусковой режим	5 Вт
Стационарный режим	3,3 Вт
Частота вращения коленчатого вала	1600 об/мин
Пусковой режим	1050 об/мин
Стационарный режим	3,2 МПа
Давление заправки	1,247
Степень сжатия	10,5%
Холодильный коэффициент	0,29
Степень т/д совершенства	18-28 Вт
Входная мощность ($l=const$)	5 мин
Время выхода на режим	-40...+85С
Ресурс	>10 000 час
Масса охладителя	450 г

Таблицы пористостей при варьировании шага и толщины стенки примитивов

$s, \text{мм}$	25	50	75	100
1	0.874	0.936	0.97	0.968
2.5	0.7	0.844	0.927	0.921
5	-	0.7	0.858	0.844
10	-	-	-	0.7



$t, \text{мм}$	25	50	75	100
1	0.9067	0.9531	0.9687	0.9765
2.5	0.7738	0.8837	0.9221	0.9414
5	-	0.7737	0.846	0.8837
10	-	-	0.707	0.7737



Характеристики для различных видов насадок:

	Тип насадки	К-т инерциального сопротивления $\alpha, \text{м}^{-2}$	К-т вязкостного сопротивления $\beta, \text{м}^{-1}$	К-т проницаемости k	ε_0
1	Сетки	3705.1	192,477	$2,699 \cdot 10^{-4}$	0,658
2	Шарики	13792.2	80,697	$7,25 \cdot 10^{-5}$	0,380
3	Gyroid, $s = 1; t = 0.2$	4171,2	17859	$1,314 \cdot 10^{-4}$	0,936
4	Shwarz P, $s = 1; t = 0.2$	5991,7	16568	$1,093 \cdot 10^{-3}$	0,9531

Суммарные потери в регенераторе

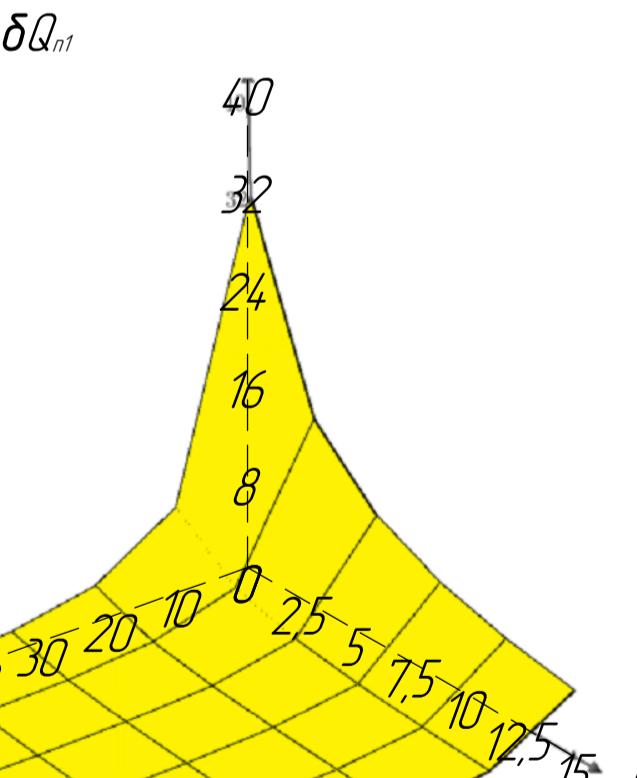
Поверхности тепловых потерь при варьировании длины и диаметра насадки регенератора

Потери от несовершенства теплообмена между газом и насадкой

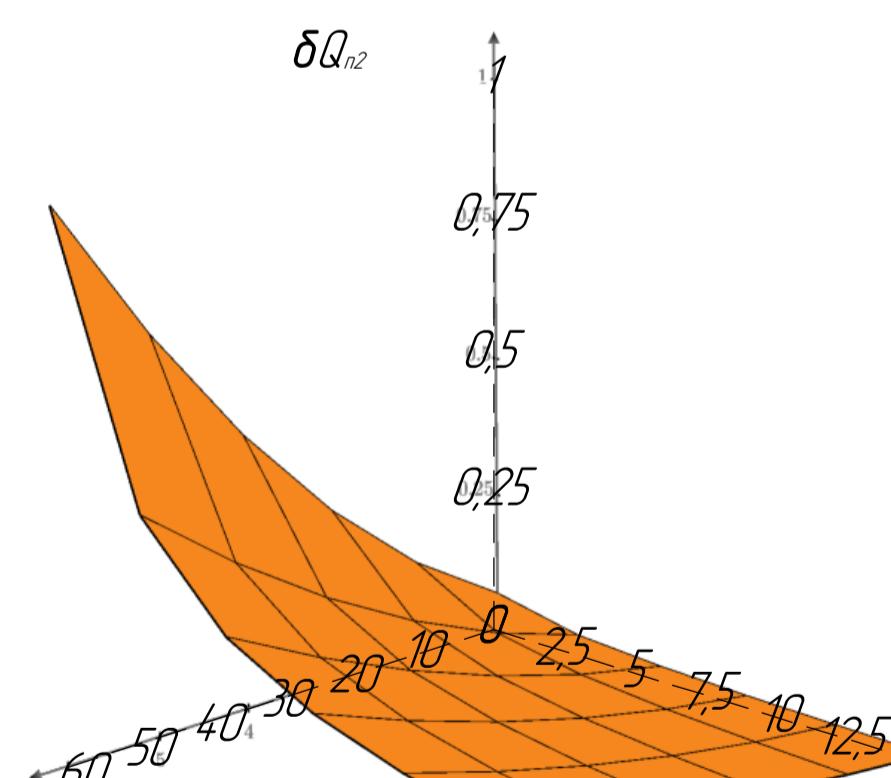
Потери, вызванные осевыми теплопритоками по насадке и стенкам регенератора

Потери, обусловленные теплообменом газа со стенками регенератора

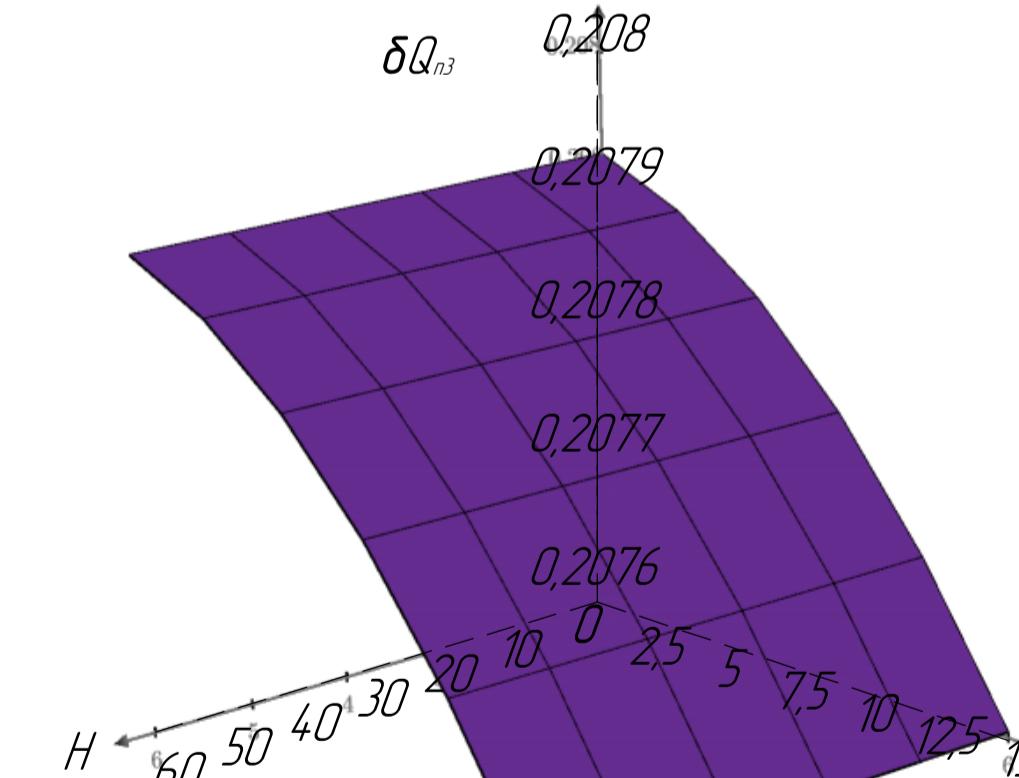
Гидравлические потери в регенераторе



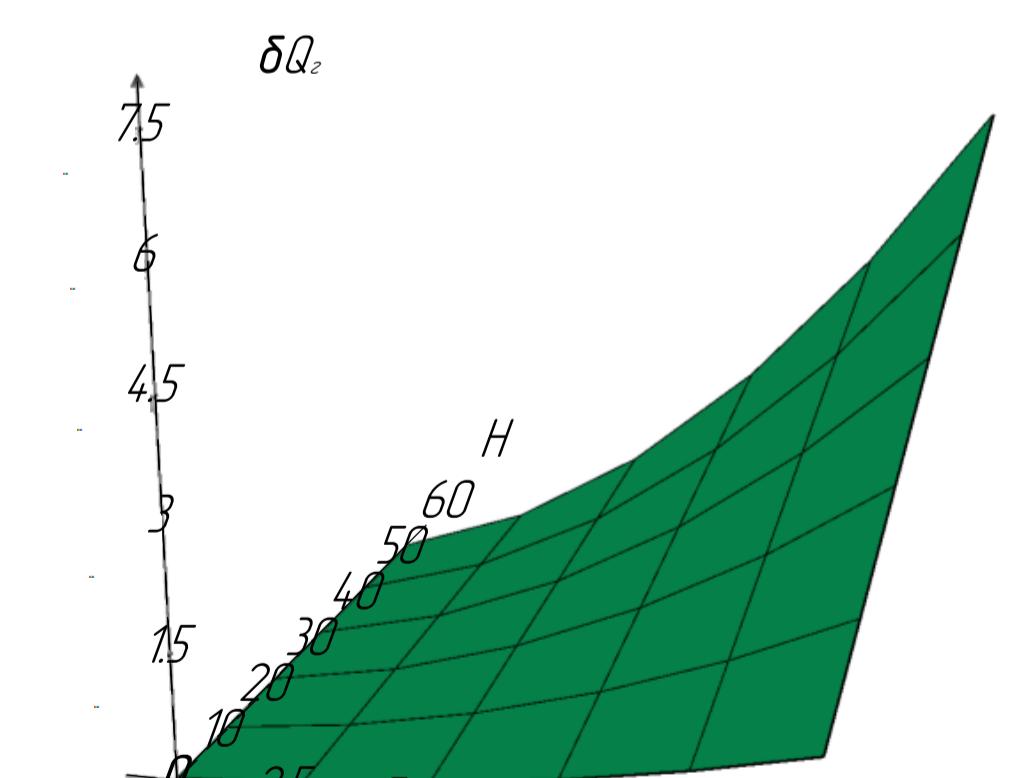
$$\delta Q_{n1} = \begin{bmatrix} 32.978 & 16.489 & 10.993 & 8.244 & 6.596 & 5.496 \\ 8.244 & 4.122 & 2.748 & 2.061 & 1.649 & 1.374 \\ 3.664 & 1.832 & 1.221 & 0.916 & 0.733 & 0.611 \\ 2.061 & 1.031 & 0.687 & 0.515 & 0.412 & 0.344 \\ 1.319 & 0.66 & 0.44 & 0.33 & 0.264 & 0.22 \\ 0.916 & 0.458 & 0.305 & 0.229 & 0.183 & 0.153 \end{bmatrix}$$



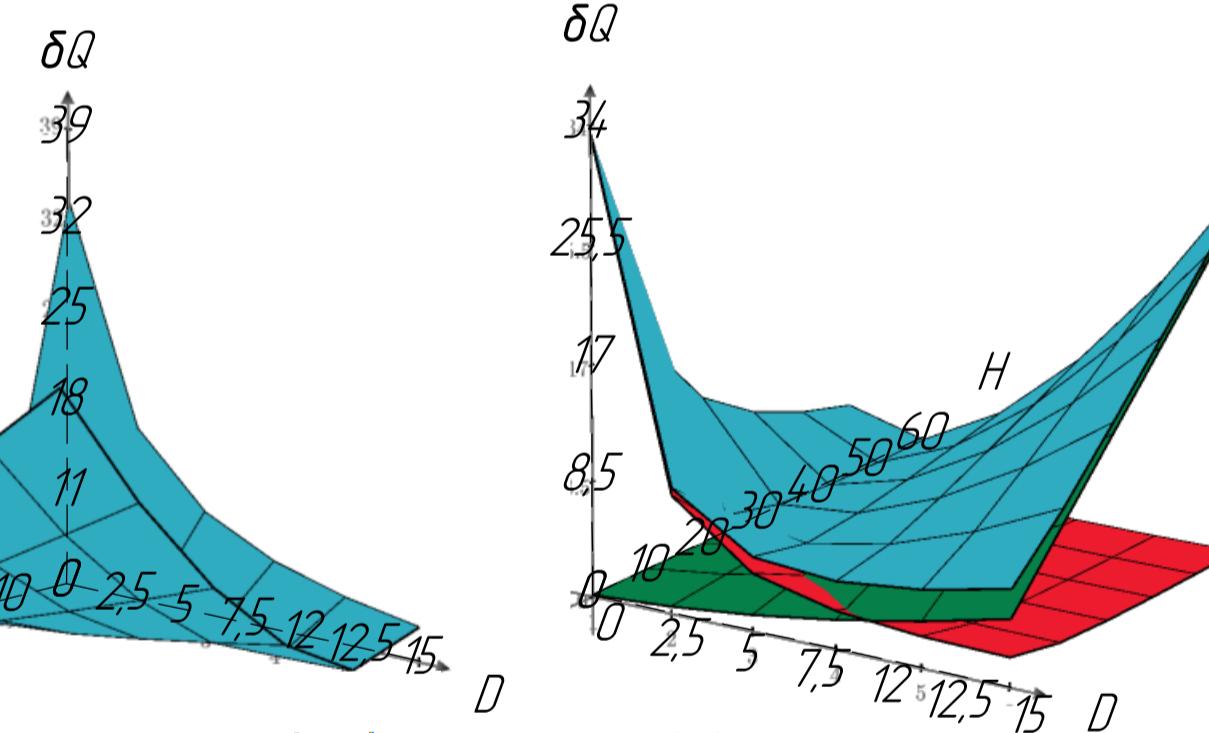
$$\delta Q_{n2} = \begin{bmatrix} 0.066 & 0.033 & 0.022 & 0.016 & 0.013 & 0.011 \\ 0.168 & 0.084 & 0.056 & 0.042 & 0.034 & 0.028 \\ 0.308 & 0.154 & 0.103 & 0.077 & 0.062 & 0.051 \\ 0.484 & 0.242 & 0.161 & 0.121 & 0.097 & 0.081 \\ 0.696 & 0.348 & 0.232 & 0.174 & 0.139 & 0.116 \\ 0.945 & 0.473 & 0.315 & 0.236 & 0.189 & 0.158 \end{bmatrix}$$



$$\delta Q_{n3} = \begin{bmatrix} 0.2081 & 0.2081 & 0.208 & 0.2079 & 0.2078 & 0.2077 \\ 0.2081 & 0.2081 & 0.208 & 0.2079 & 0.2078 & 0.2077 \\ 0.2081 & 0.2081 & 0.208 & 0.2079 & 0.2078 & 0.2077 \\ 0.2081 & 0.2081 & 0.208 & 0.2079 & 0.2078 & 0.2077 \\ 0.2081 & 0.2081 & 0.208 & 0.2079 & 0.2078 & 0.2077 \\ 0.2081 & 0.2081 & 0.208 & 0.2079 & 0.2078 & 0.2077 \end{bmatrix}$$



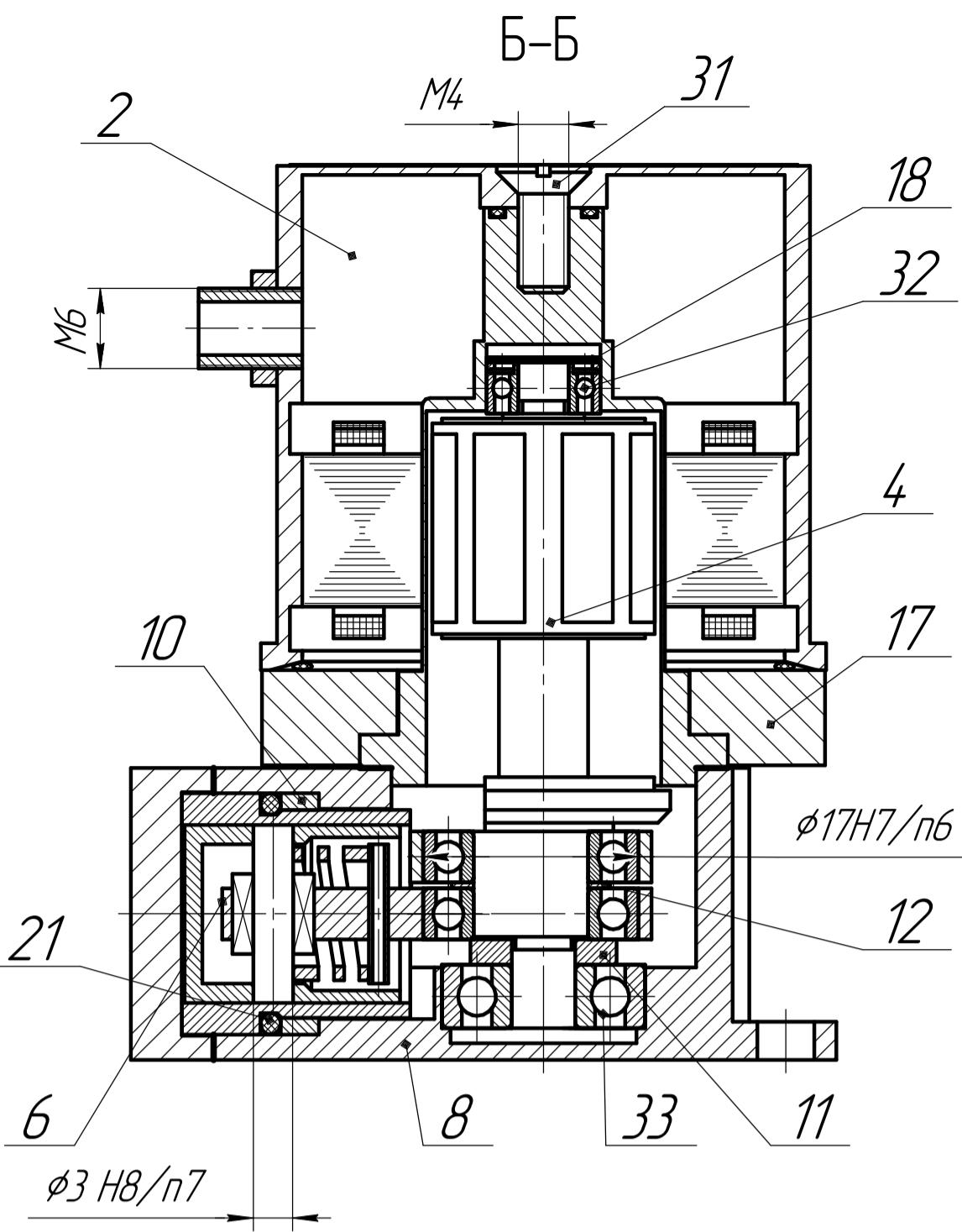
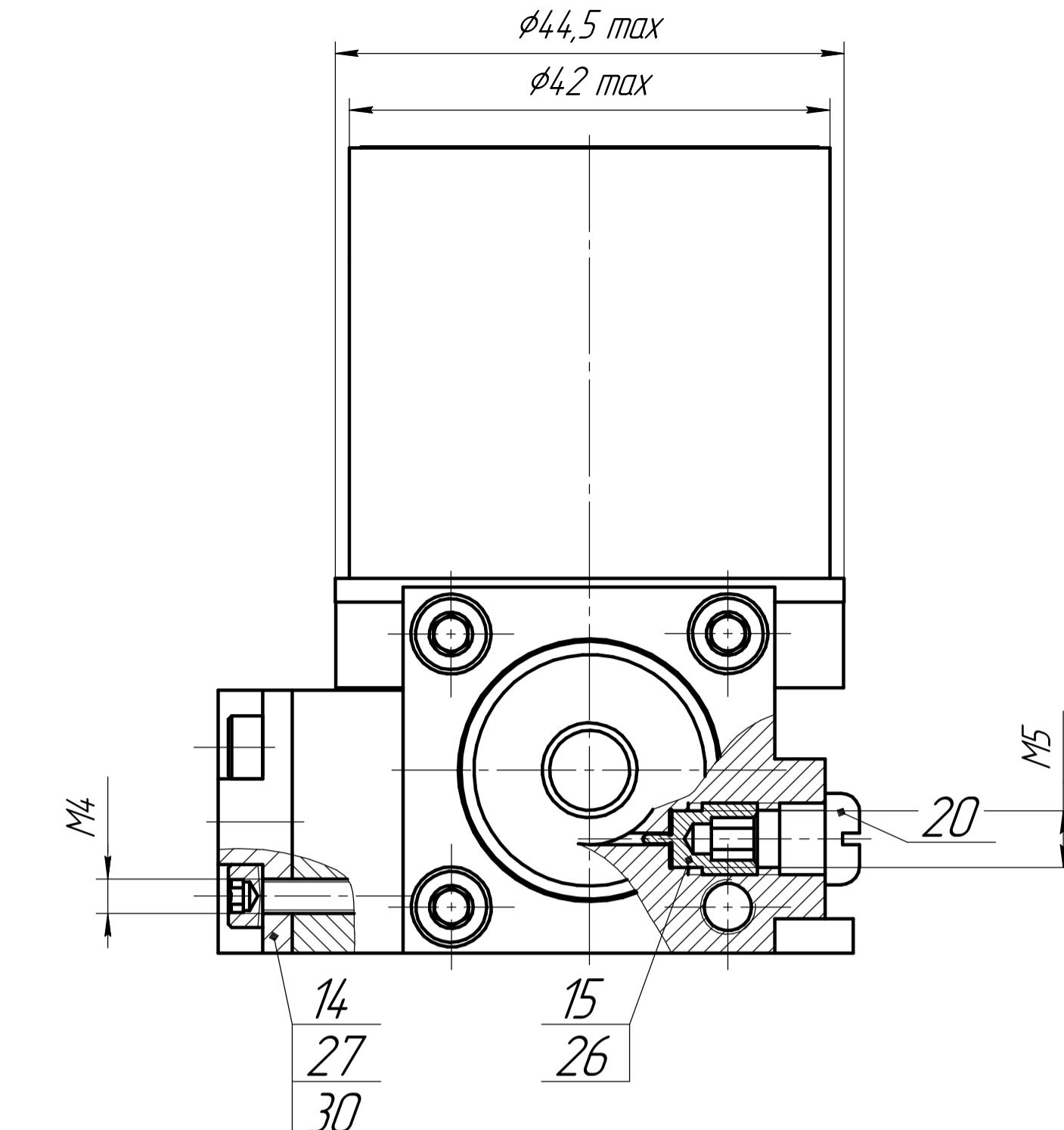
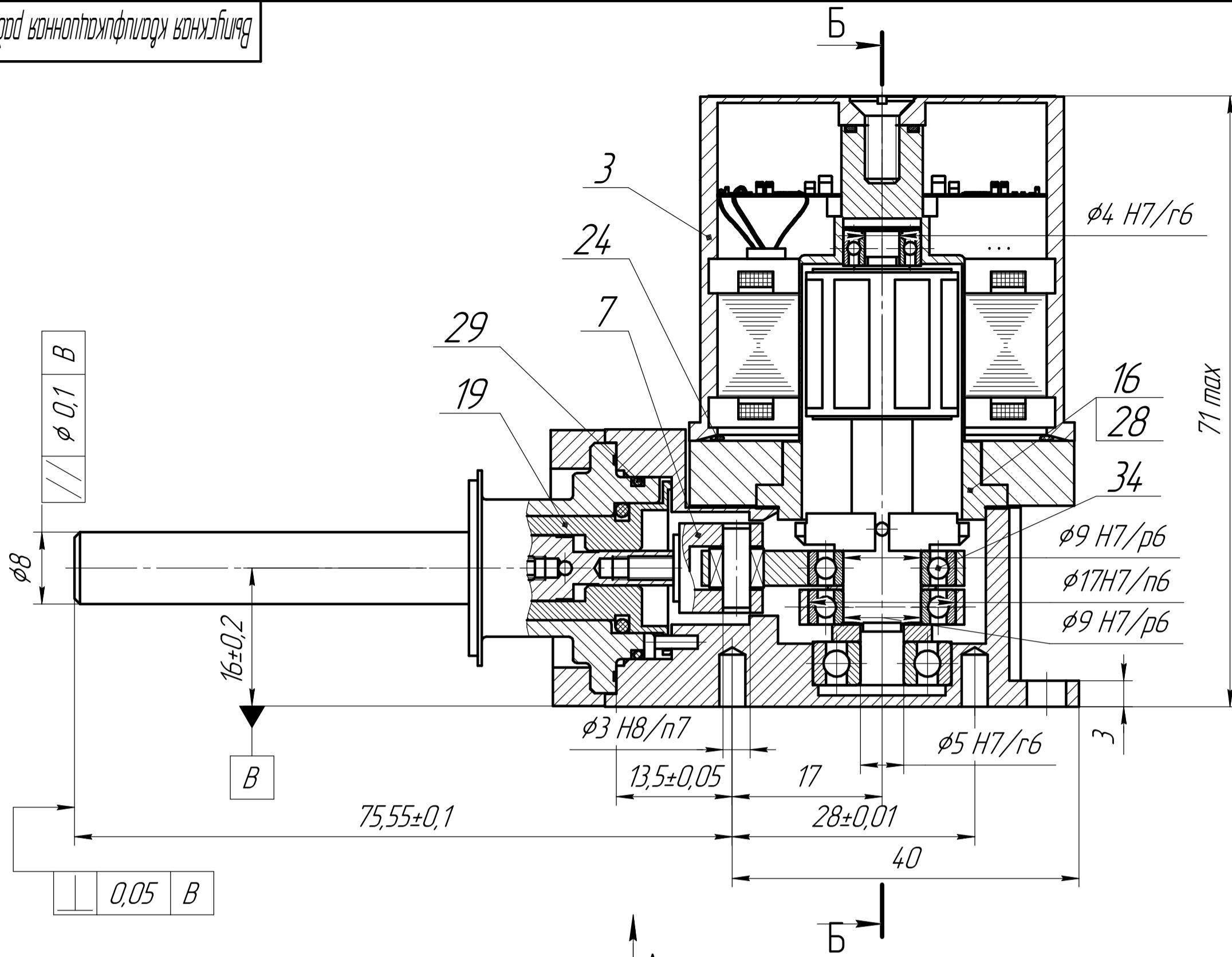
$$\delta Q_g = \begin{bmatrix} 0.025 & 0.05 & 0.075 & 0.101 & 0.126 & 0.151 \\ 0.101 & 0.201 & 0.302 & 0.403 & 0.503 & 0.604 \\ 0.226 & 0.453 & 0.679 & 0.906 & 1.132 & 1.359 \\ 0.403 & 0.805 & 1.208 & 1.611 & 2.013 & 2.416 \\ 0.629 & 1.258 & 1.887 & 2.517 & 3.146 & 3.775 \\ 0.906 & 1.812 & 2.718 & 3.624 & 4.53 & 5.436 \end{bmatrix}$$



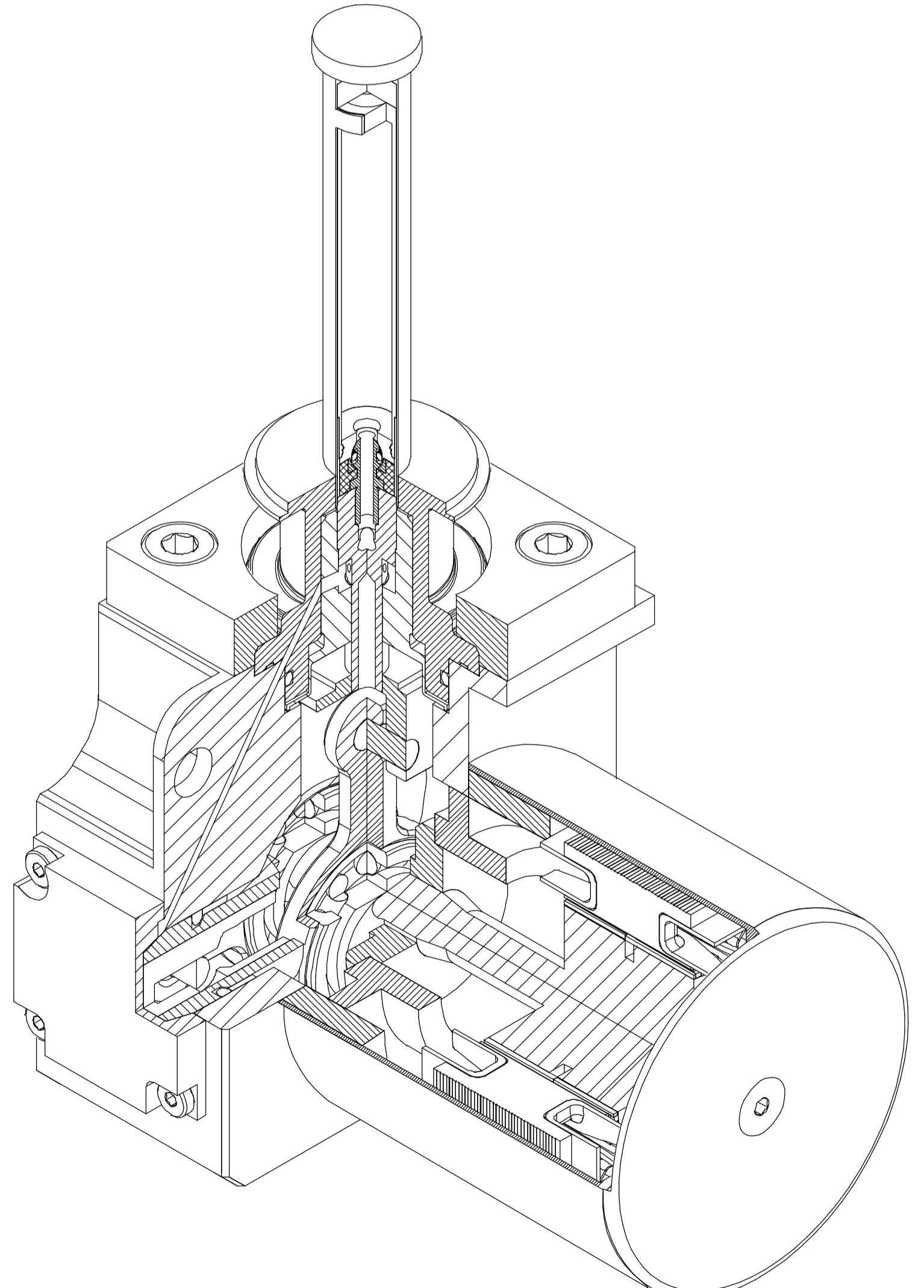
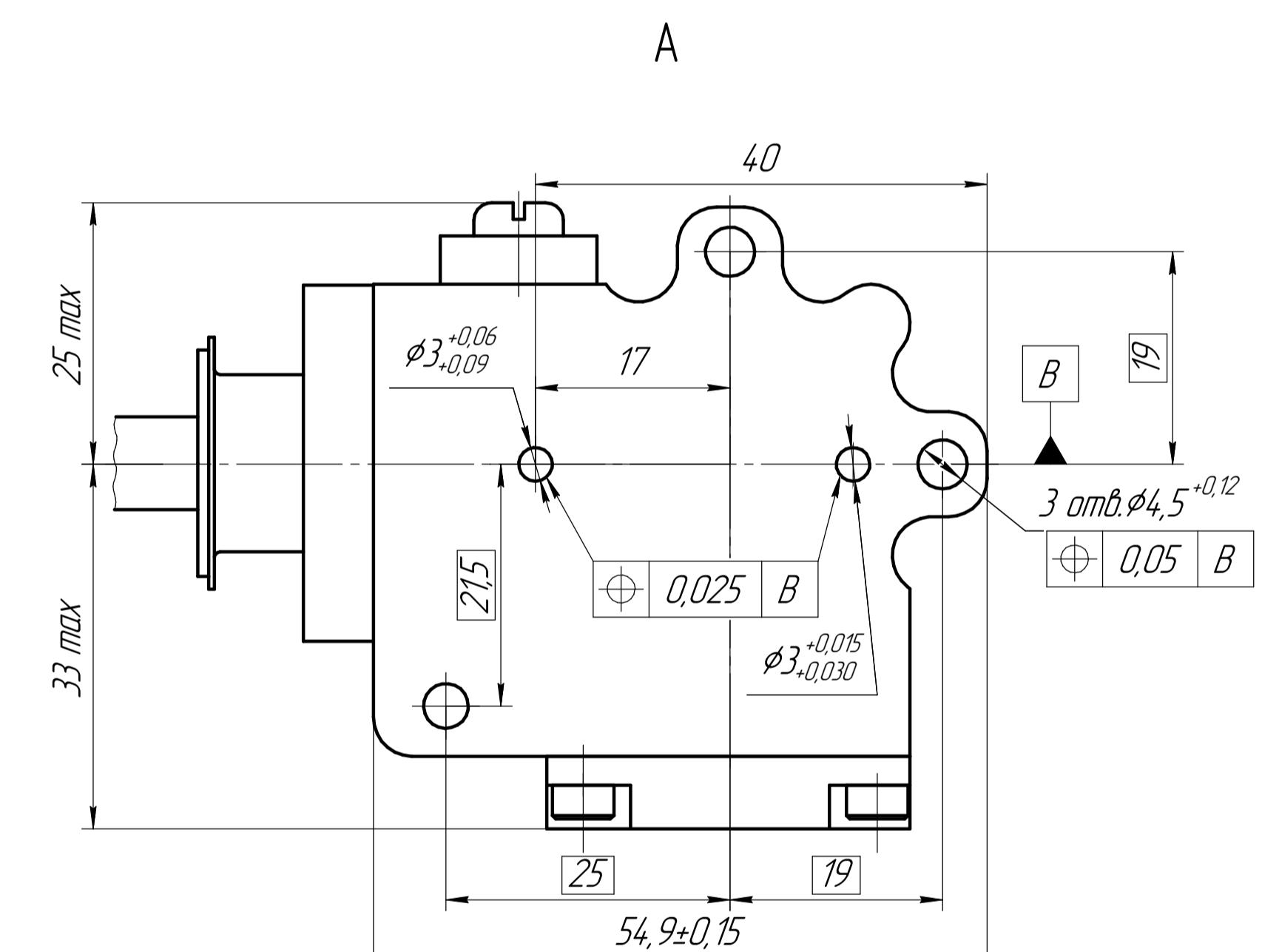
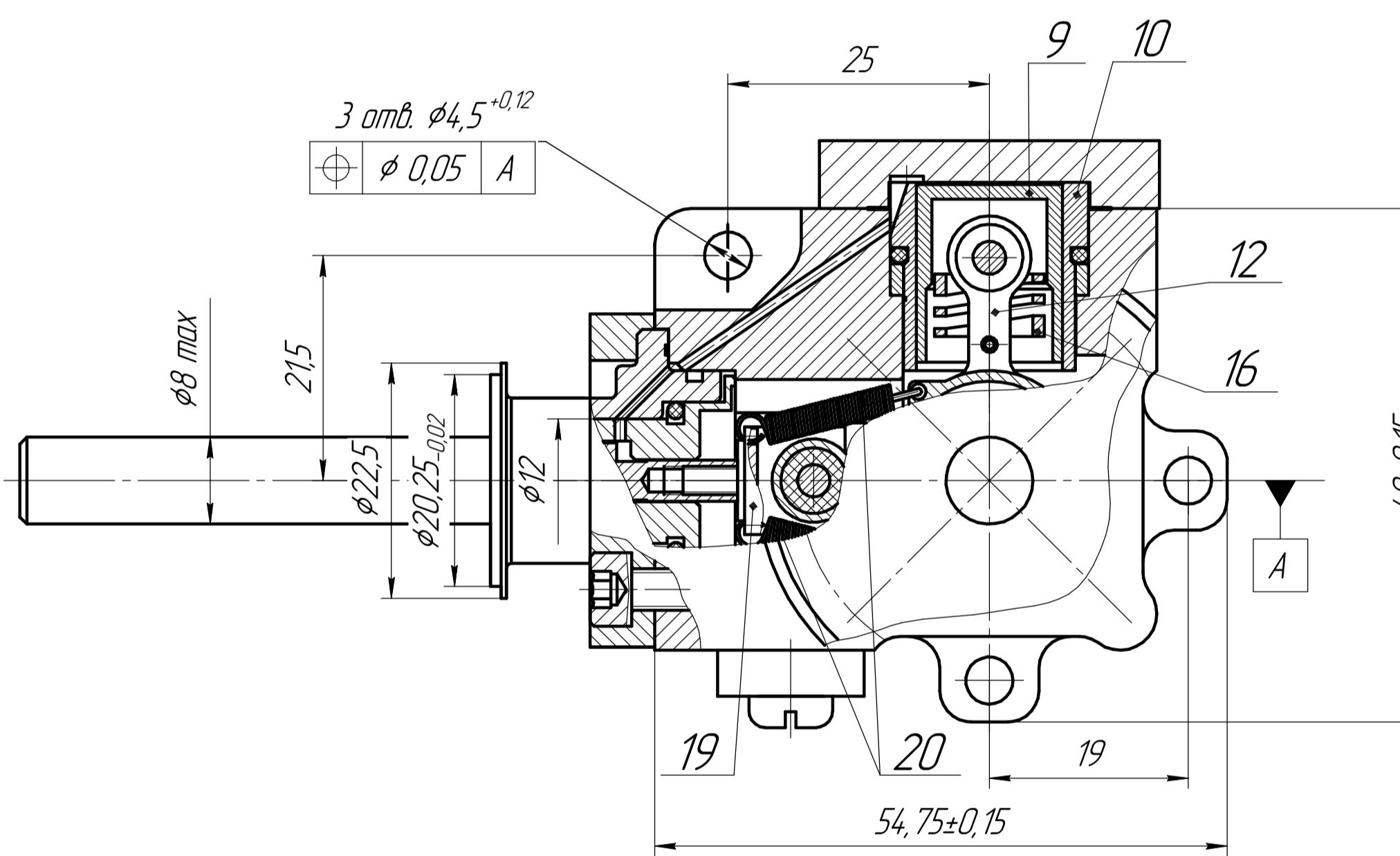
$$\delta Q_r := \delta Q_g + \delta Q_n = \begin{bmatrix} 33.277 & 16.78 & 11.298 & 8.569 & 6.942 & 5.866 \\ 8.722 & 4.616 & 3.314 & 2.714 & 2.394 & 2.214 \\ 4.406 & 2.647 & 2.211 & 2.107 & 2.135 & 2.229 \\ 3.155 & 2.286 & 2.264 & 2.455 & 2.73 & 3.048 \\ 2.852 & 2.474 & 2.767 & 3.228 & 3.757 & 4.318 \\ 2.976 & 2.951 & 3.546 & 4.297 & 5.11 & 5.954 \end{bmatrix}$$

Выпускная квалификационная работа	Лист	Масса	Масштаб
Описание МКГМ	Лист	Лист	Лист
Изм. лист	№ докум.	Лист	Лист
Рисунок	Ходячий лист	Лист	Лист
Проб.	Надасардян	Лист	Лист
Г. конспр.		Лист	Лист
Н. конспр.		Лист	Лист
Утв.		Лист	Лист

Bprügckha ა გაუსტაჲიონხა დამა



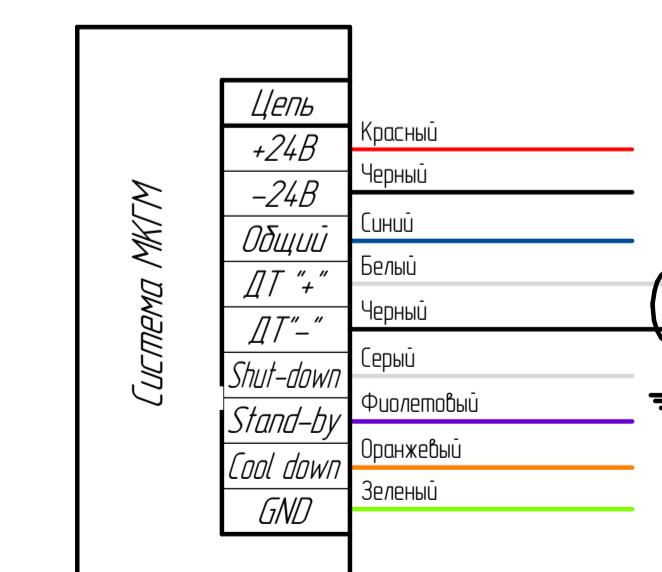
Аксонометрический вид (поз. 13, 38, 41 не показаны)



Технические характеристики

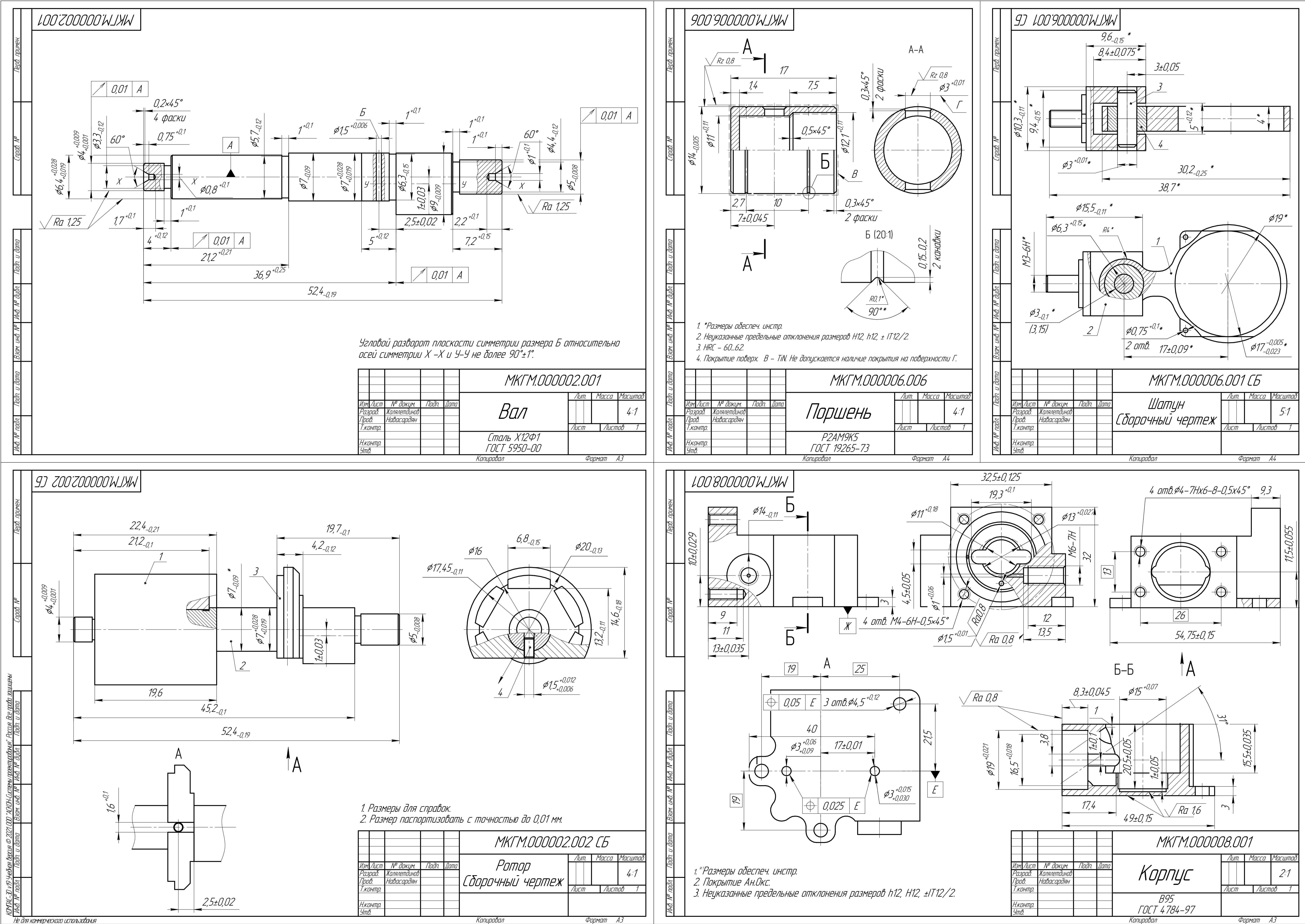
Температура криостатирования
Температура окружающей среды
Рабочее вещество
Холодопроизводительность
Пусковой режим
Стационарный режим
Потребляемая мощность
Пусковой режим
Стационарный режим
Частота вращения коленчатого вала
Пусковой режим
Стационарный режим
Давление заправки
Степень сжатия
Холодильный коэффициент
Степень т/д совершенства
Входная мощность ($I=const$)
Время выхода на режим
Рабочий диапазон температур окр. среды
Ресурс
Масса охладителя

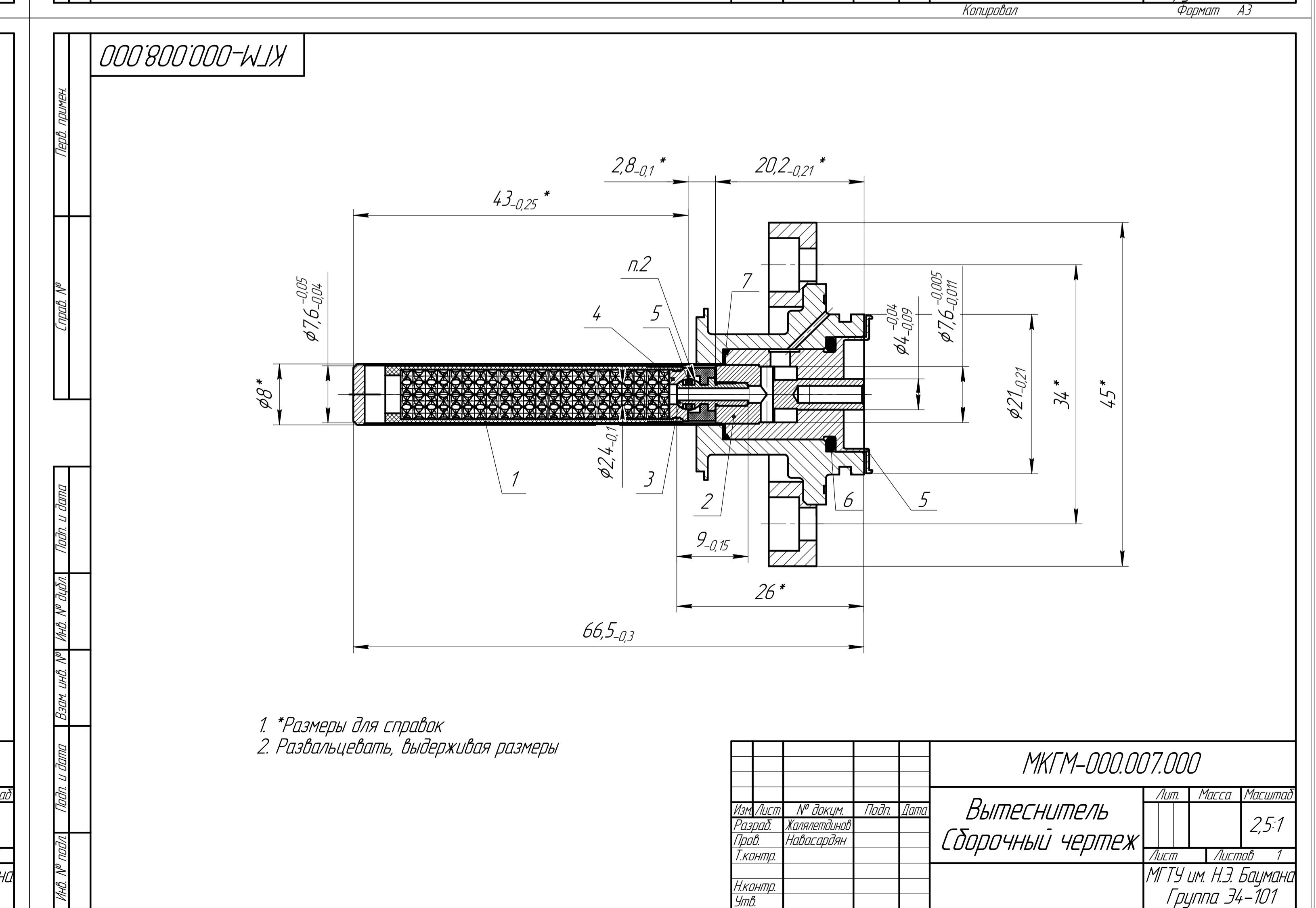
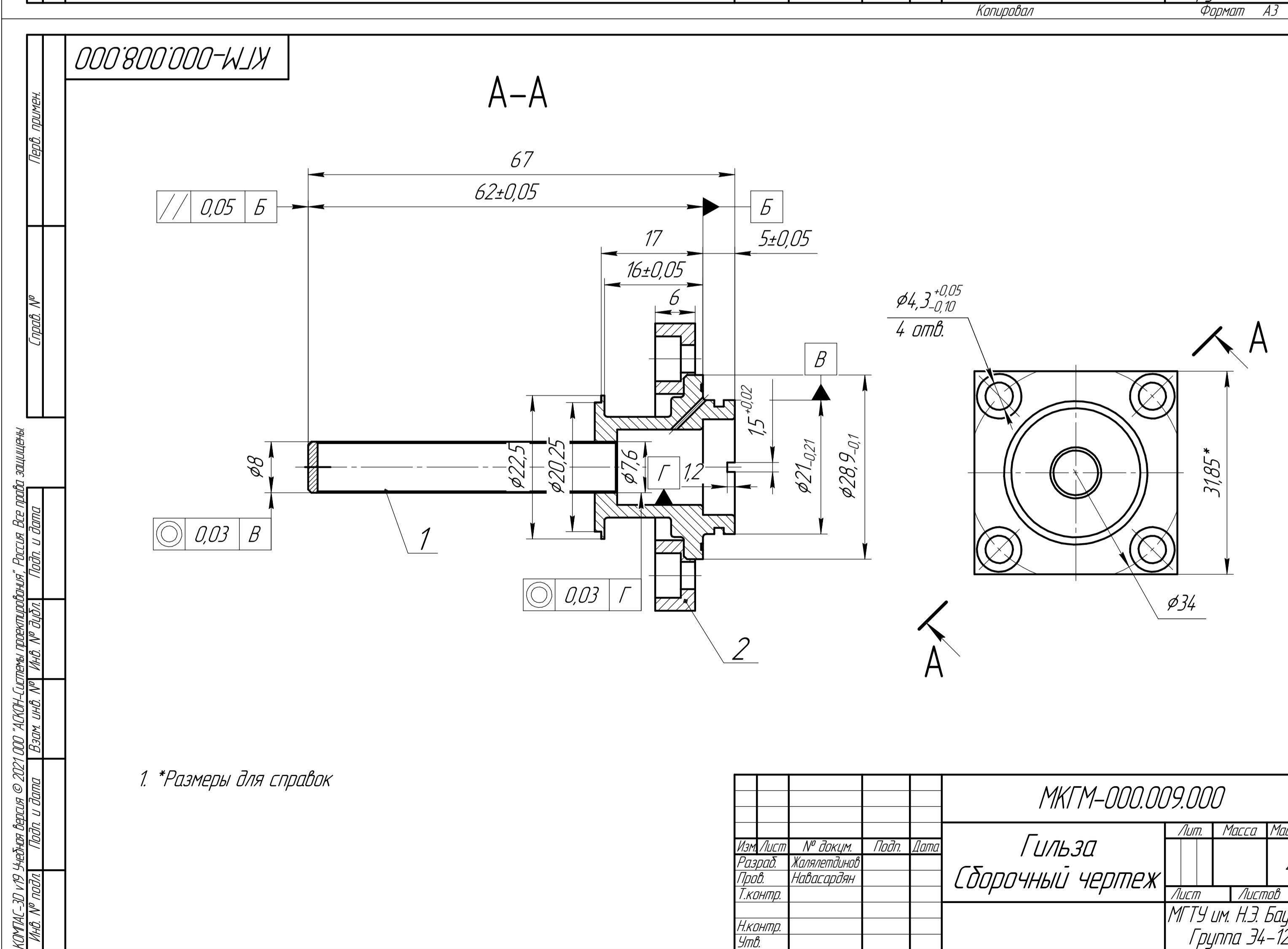
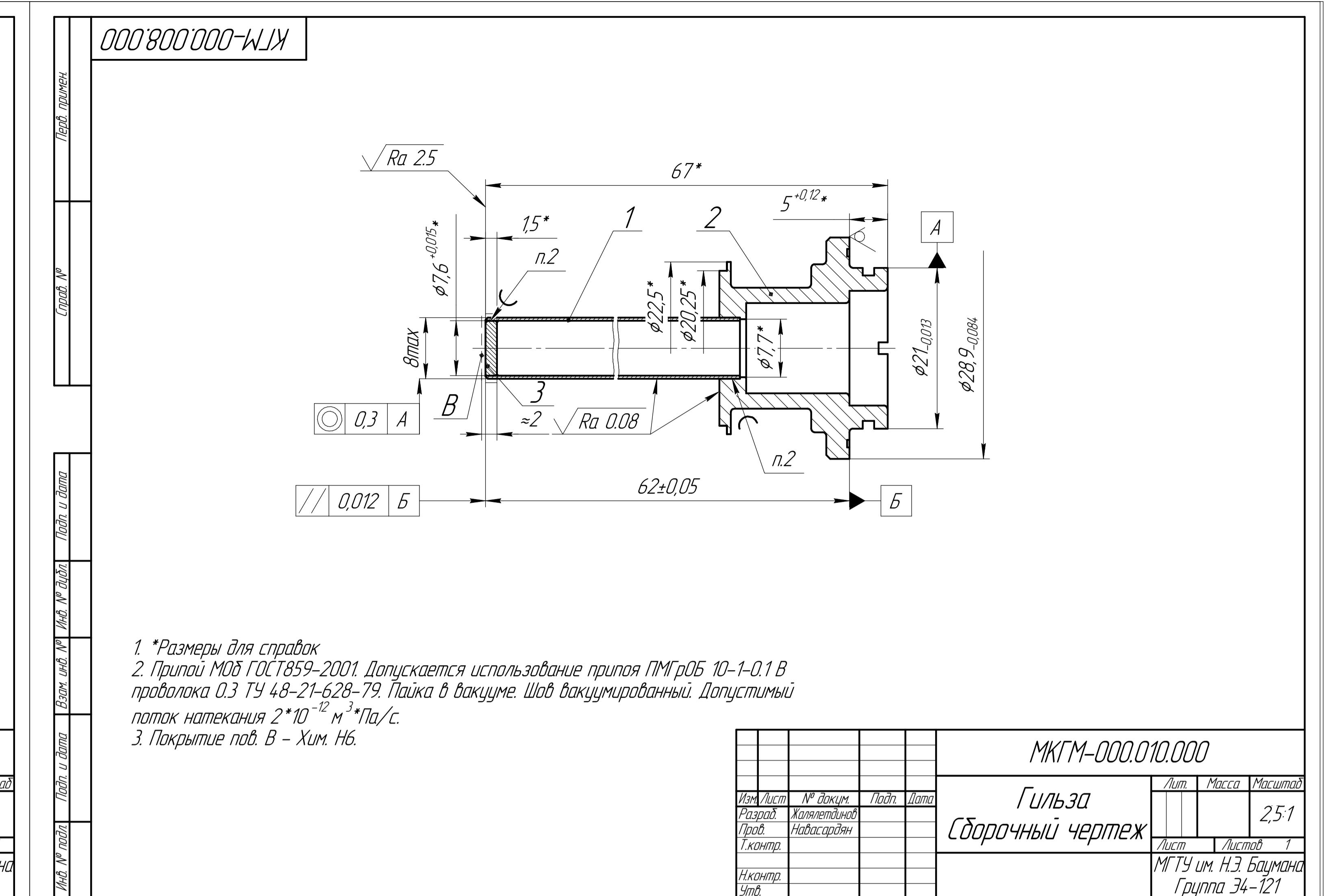
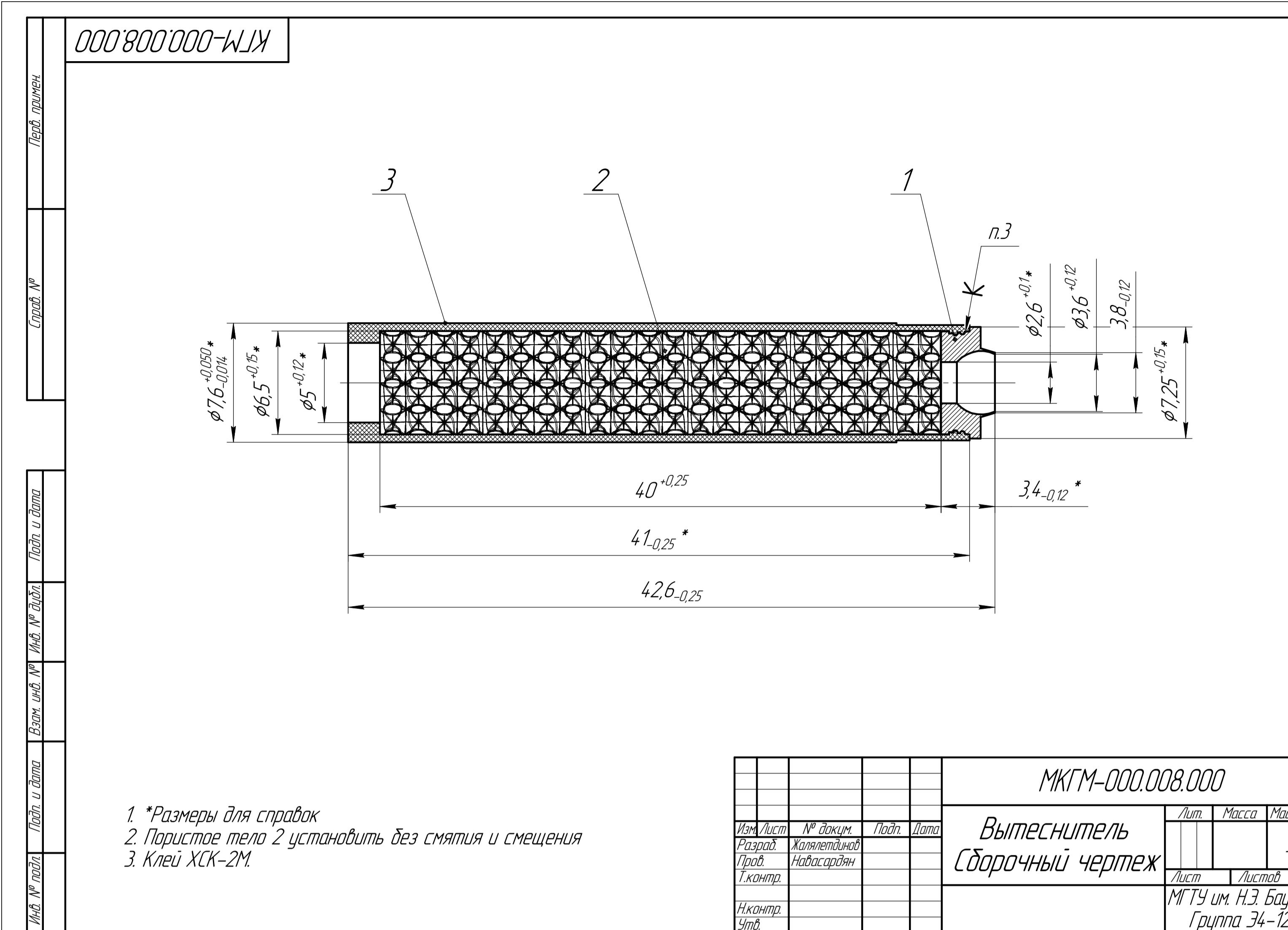
Схема электрическая подключения (Modbus)

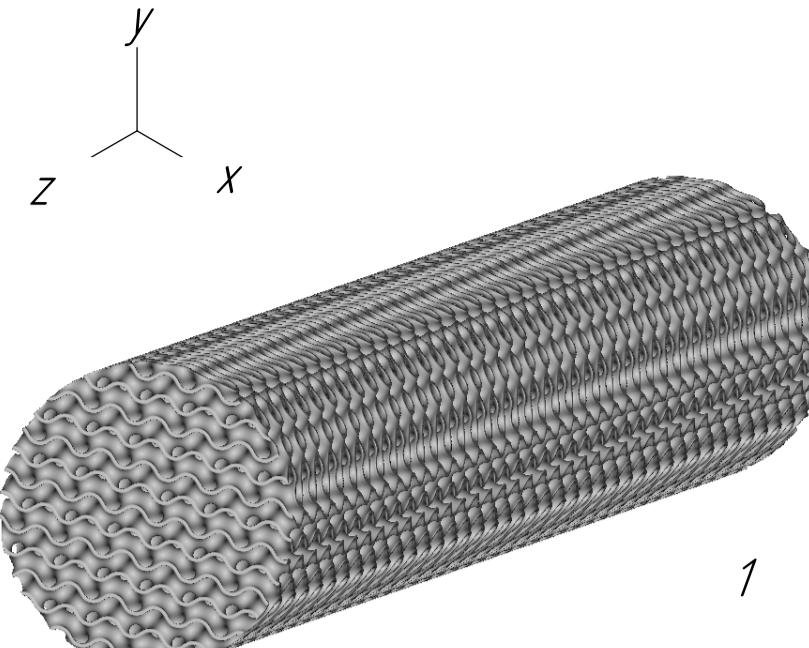


1. Все подвижные детали перемещаются плавно, без рыбков и заеданий.
 2. При установке ротора поз. 4 в корпус поз. 16 обеспечивается осевое напряжение в подшипниках поз. 32 и поз. 33 от 0,01 до 0,015 мм.
 3. Установочная поверхность аппаратуры должна обеспечивать отвод теплового потока не менее 8 Вт от поверхности Г во всех условиях эксплуатации при максимальной температуре окружающей среды не более 60°C.
 4. Испытать на прочность давлением 3,5 МПа сухим инертным газом в удаленному взрывоустойчивом помещении. Утечки и визуальный контроль, определяющий пузырчатую сыпь не допускается.
 5. Испытать на герметичность давлением 3,3 МПа сухим инертным газом с выдержкой под давлением 18 ч с контролем давления каждые час

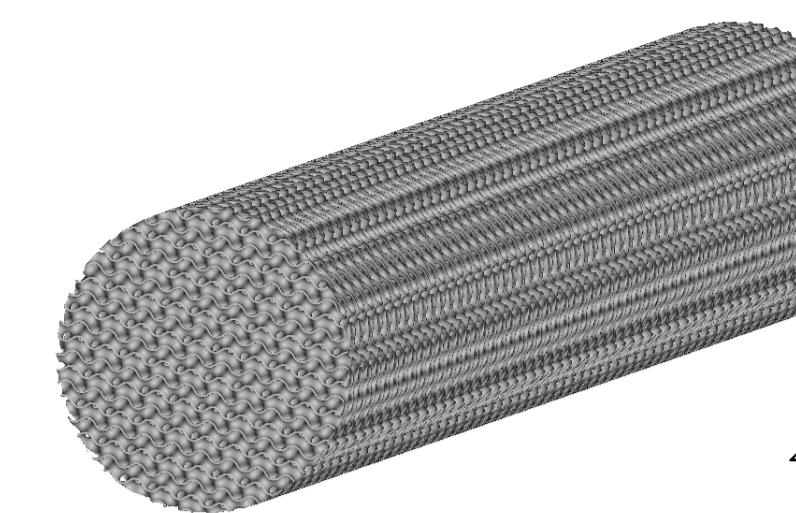
				Выпускная квалификационная работа		
1. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Микрокриогенная газовая машина		
зрад.	Жалилетдинов					
об.	Навасардян					2:1
онтр.				Лист	Листов	1
онтр.				МГТУ им. Н.Э. Баумана		
об.				Группа Э4-121		



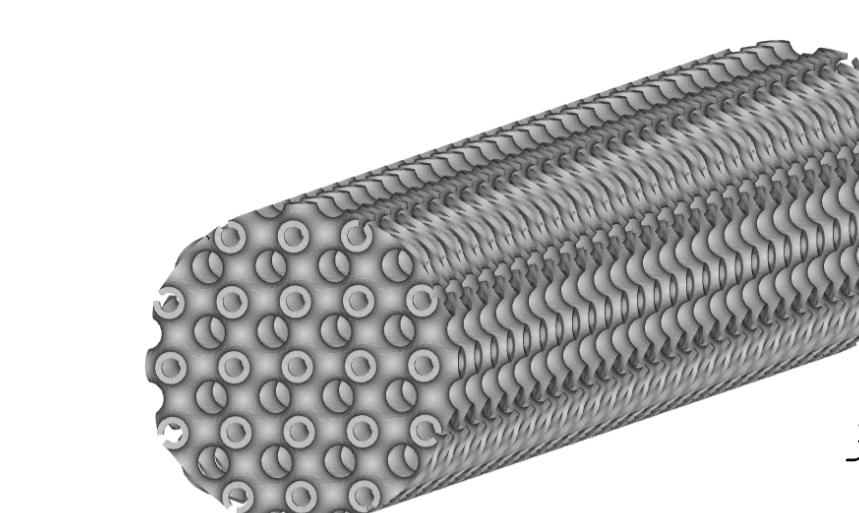


Длина и диаметр насадок принят одинаковыми: $D = 8 \text{ мм}$; $H = 40 \text{ мм}$ 

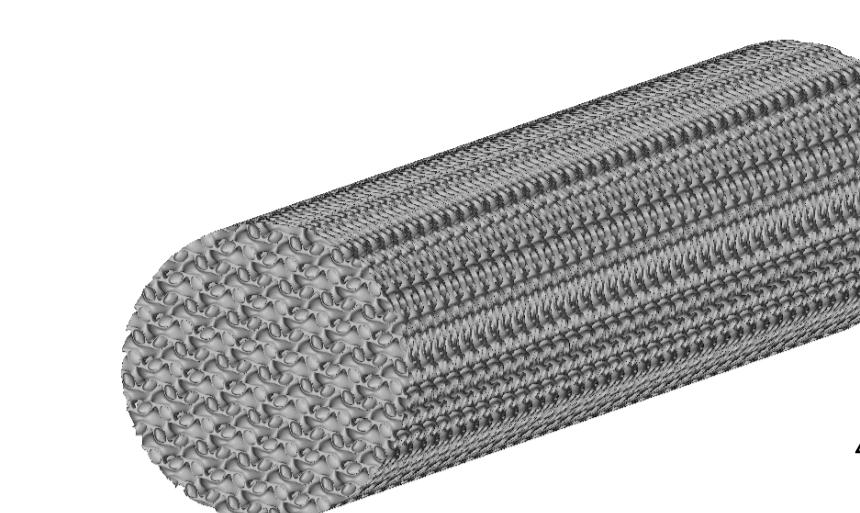
1



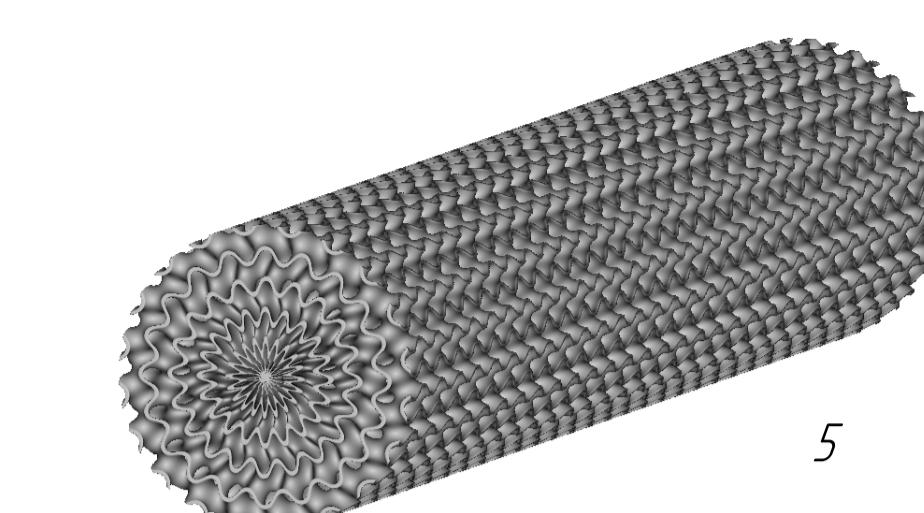
2



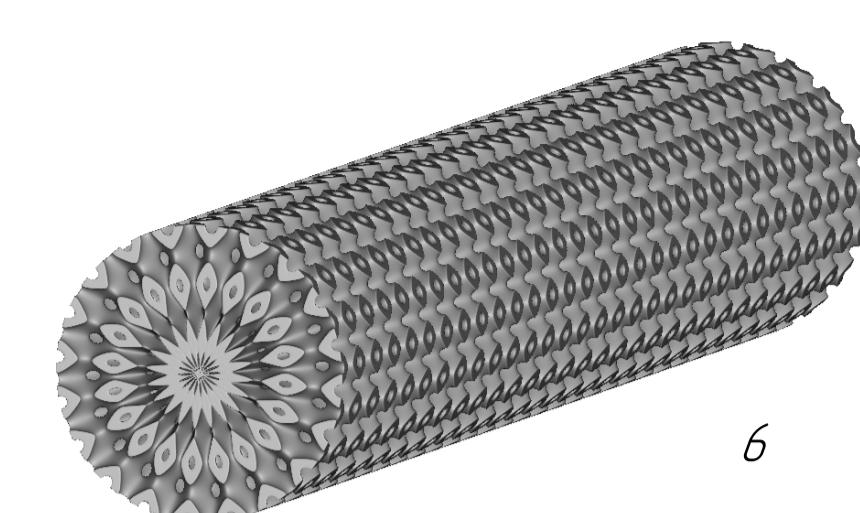
3



4



5



6

Параметр	Значение	Размерность
Тело	Gyroid	-
Габариты ячейки $[x, y, z]$	15 15 15	мм
Толщина стенки	0.2	мм
К-т инерционного сопротивления	253,53	м^{-2}
К-т вязкостного сопротивления	1377,6	м^{-1}
Изображение ячейки		-
Площадь поб.	19312,68	мм^2
Объем поб.	1218,96	мм^3
Пористость	0,741	-
Коэффициент	4,88	-

Параметр	Значение	Размерность
Тело	Gyroid	-
Габариты ячейки $[x, y, z]$	1 1 1	мм
Толщина стенки	0.12	мм
К-т инерционного сопротивления	4171,2	м^{-2}
К-т вязкостного сопротивления	17859	м^{-1}
Изображение ячейки		-
Площадь поб.	30373,88	мм^2
Объем поб.	1094,79	мм^3
Пористость	0,768	-
Коэффициент	126,6858	-

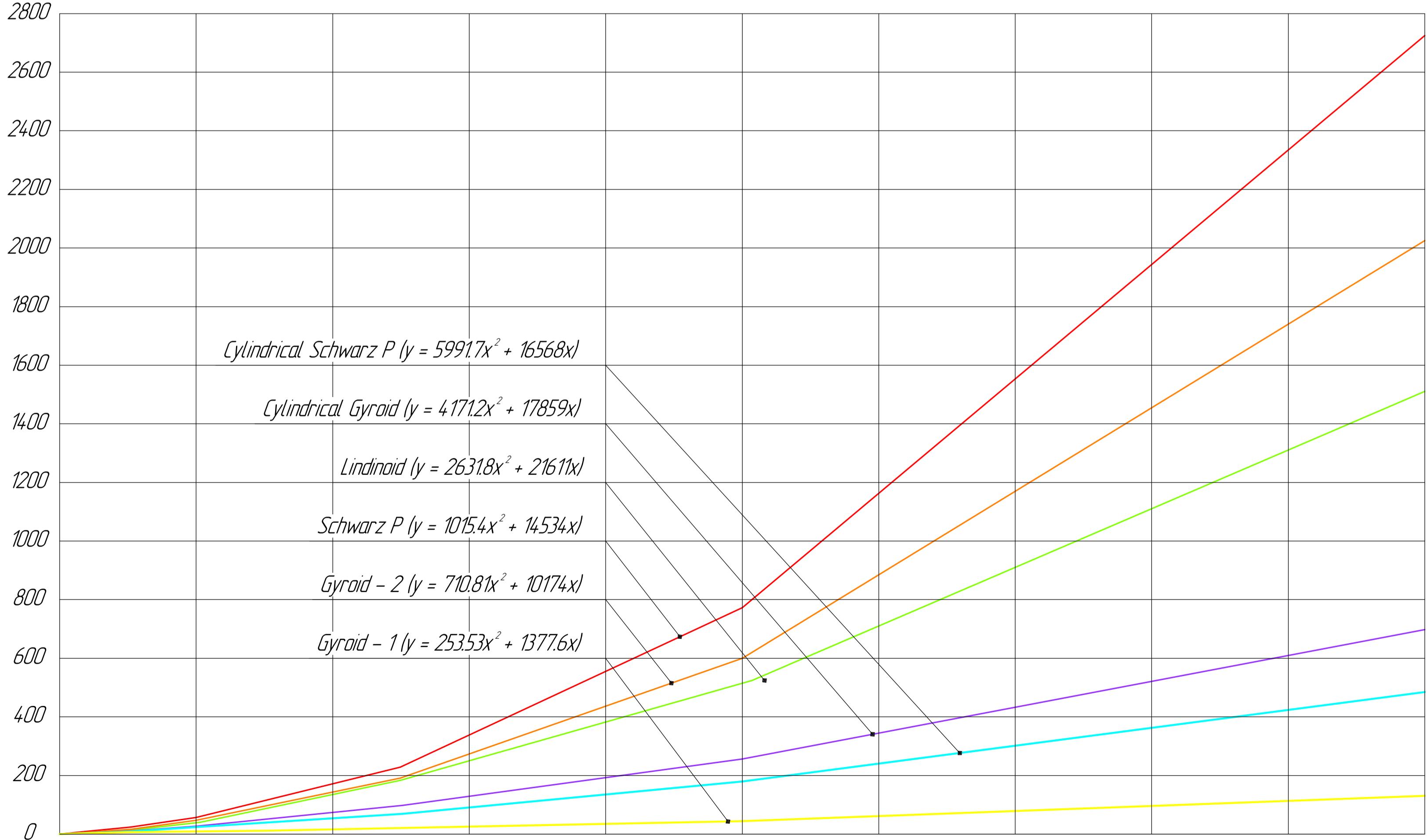
Параметр	Значение	Размерность
Тело	Schwarz P	-
Габариты ячейки $[x, y, z]$	15 15 15	мм
Толщина стенки	0.2	мм
К-т инерционного сопротивления	5991,7	м^{-2}
К-т вязкостного сопротивления	16568	м^{-1}
Изображение ячейки		-
Площадь поб.	14118,79	мм^2
Объем поб.	2167,91	мм^3
Пористость	0,54	-
Коэффициент	84,58	-

Параметр	Значение	Размерность
Тело	Lindénoid	-
Габариты ячейки $[x, y, z]$	15 15 15	мм
Толщина стенки	0.12	мм
К-т инерционного сопротивления	26318	м^{-2}
К-т вязкостного сопротивления	21611	м^{-1}
Изображение ячейки		-
Площадь поб.	35448,05	мм^2
Объем поб.	1410,03	мм^3
Пористость	0,701	-
Коэффициент	93,26	-

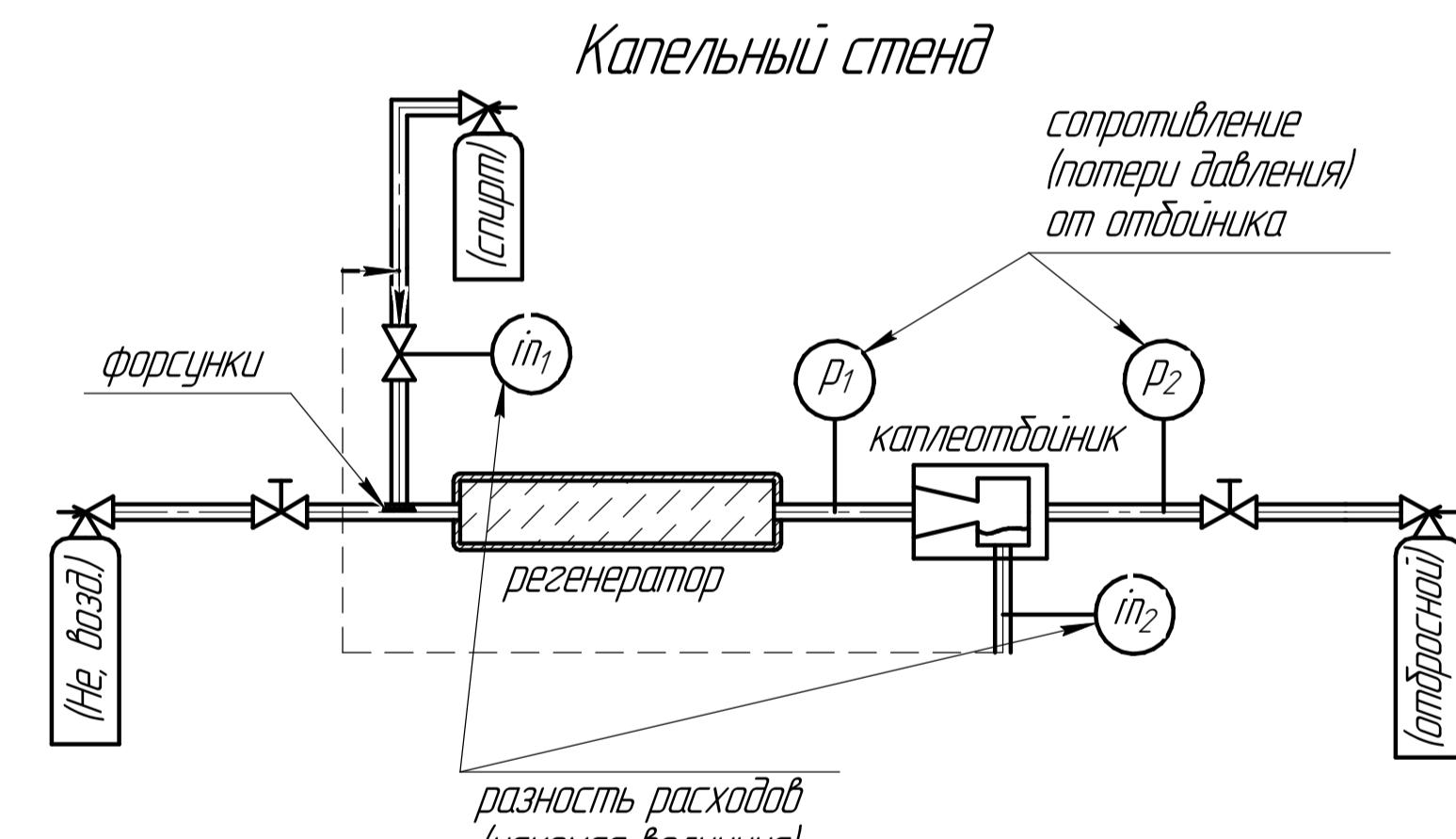
Параметр	Значение	Размерность
Тело	Gyroid (ЦСК)	-
Число наслойений	20	-
Радиус ячейки	2	мм
Высота ячейки	2	мм
Толщина стенки	0,2	мм
К-т инерционного сопротивления	1015,4	м^{-2}
К-т вязкостного сопротивления	14534	м^{-1}
Изображение ячейки		-
Площадь поб.	22964,39	мм^2
Объем поб.	1181,84	мм^3
Пористость	0,749	-
Коэффициент	23,31	-

Параметр	Значение	Размерность
Тело	Schwarz P (ЦСК)	-
Число наслойений	20	-
Радиус ячейки	2	мм
Высота ячейки	2	мм
Толщина стенки	0,2	мм
К-т инерционного сопротивления	710,81	м^{-2}
К-т вязкостного сопротивления	10174	м^{-1}
Изображение ячейки		-
Площадь поб.	15546,05	мм^2
Объем поб.	2093,81	мм^3
Пористость	0,555	-
Коэффициент	11037	-

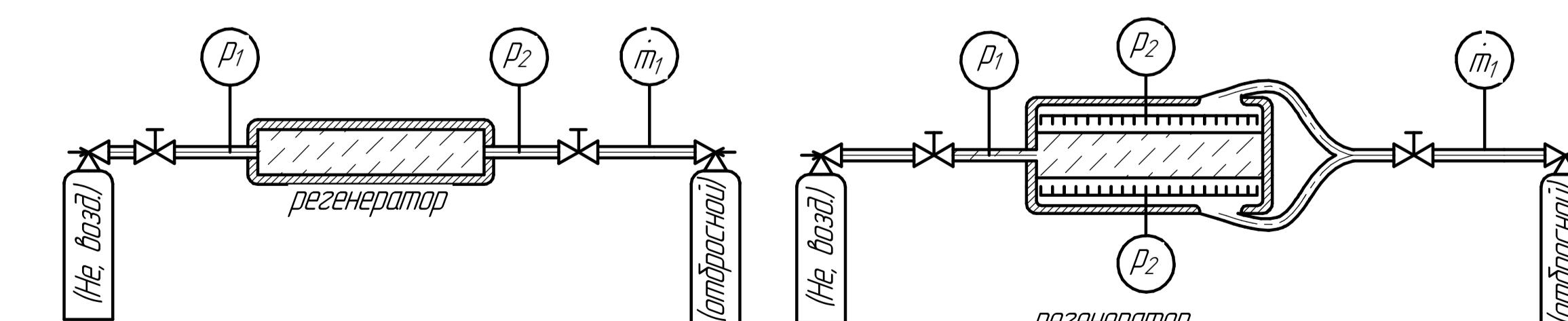
Зависимость потери давления от линейной скорости потока на входе в насадку

Потери давления, $\kappa \text{Pa}/\text{м}$ Скорость на входе, $v, \text{м/с}$

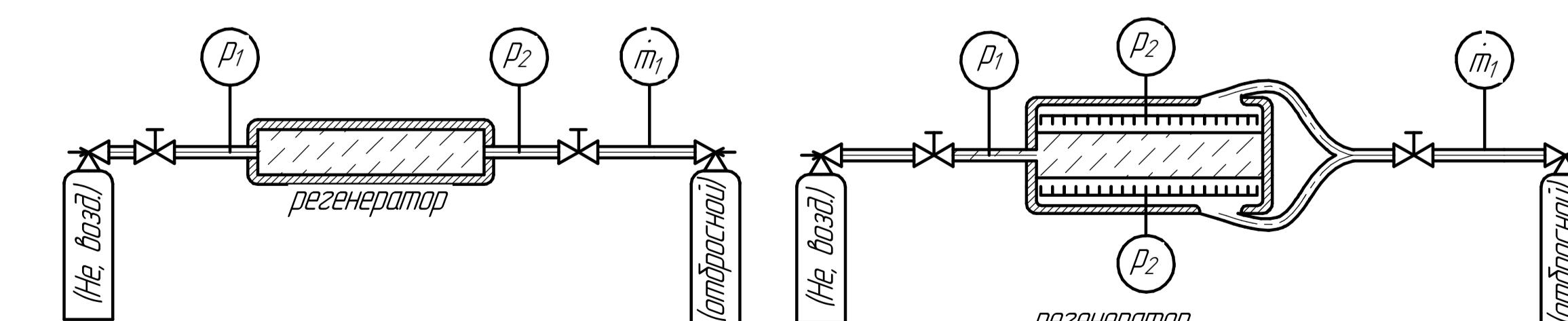
Схемы испытательных стендов



Продувочный стенд (аксиальные потери)



Продувочный стенд (радиальные потери)



Ид. лист	№ докум	Лайн	Лот	Лото	Гидравлические характеристики насадок	
					Лист	Лист №
МГТУ им. Н.Э. Баумана					1	1
Группа 34-121						
Ижоры						
Учеб.						

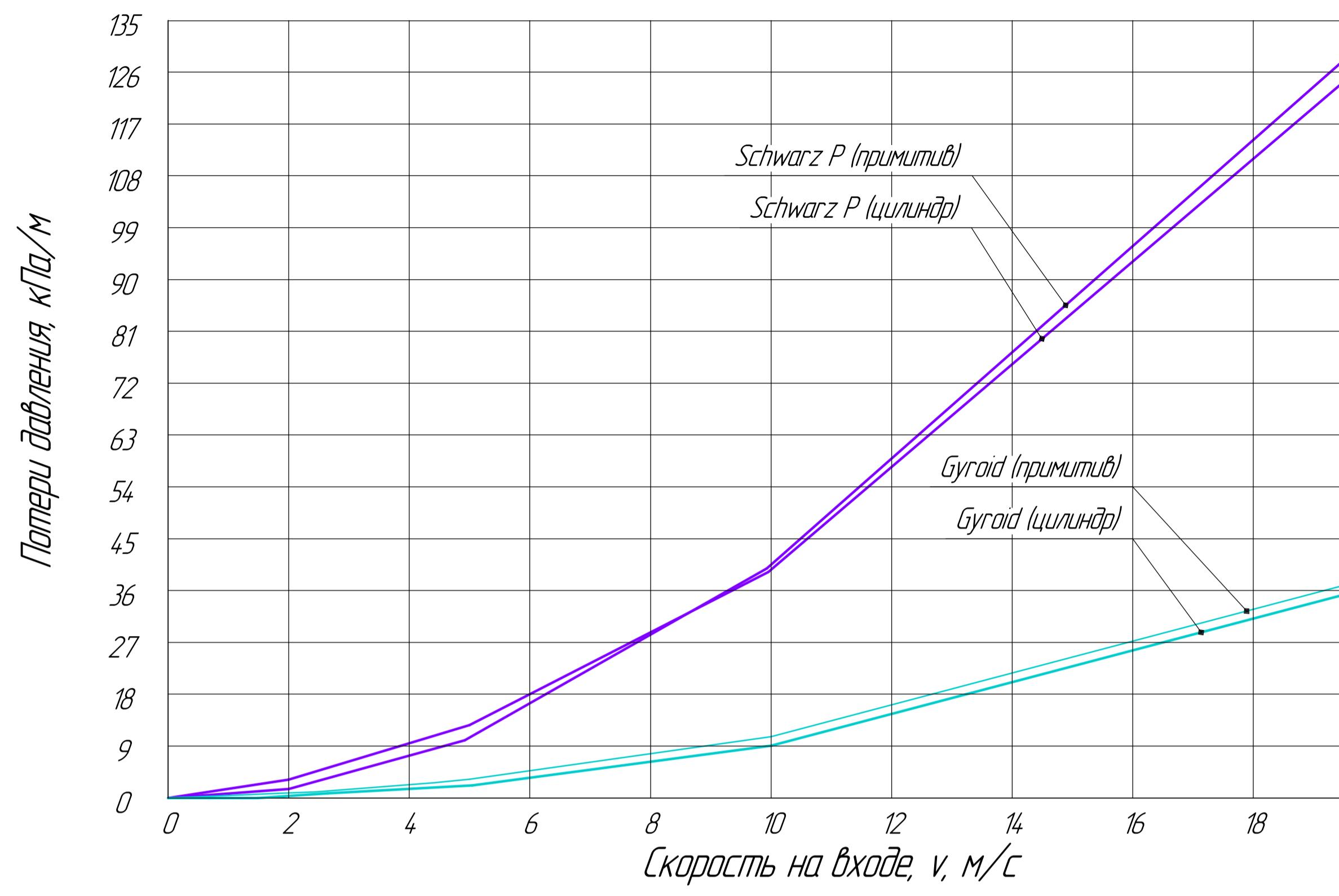
Начальные условия :

1. Шаг промитива – $l = 1 \text{ мм}$;
 2. Давление продувки – $p_{\text{прод}} = 3 \text{ МПа}$;

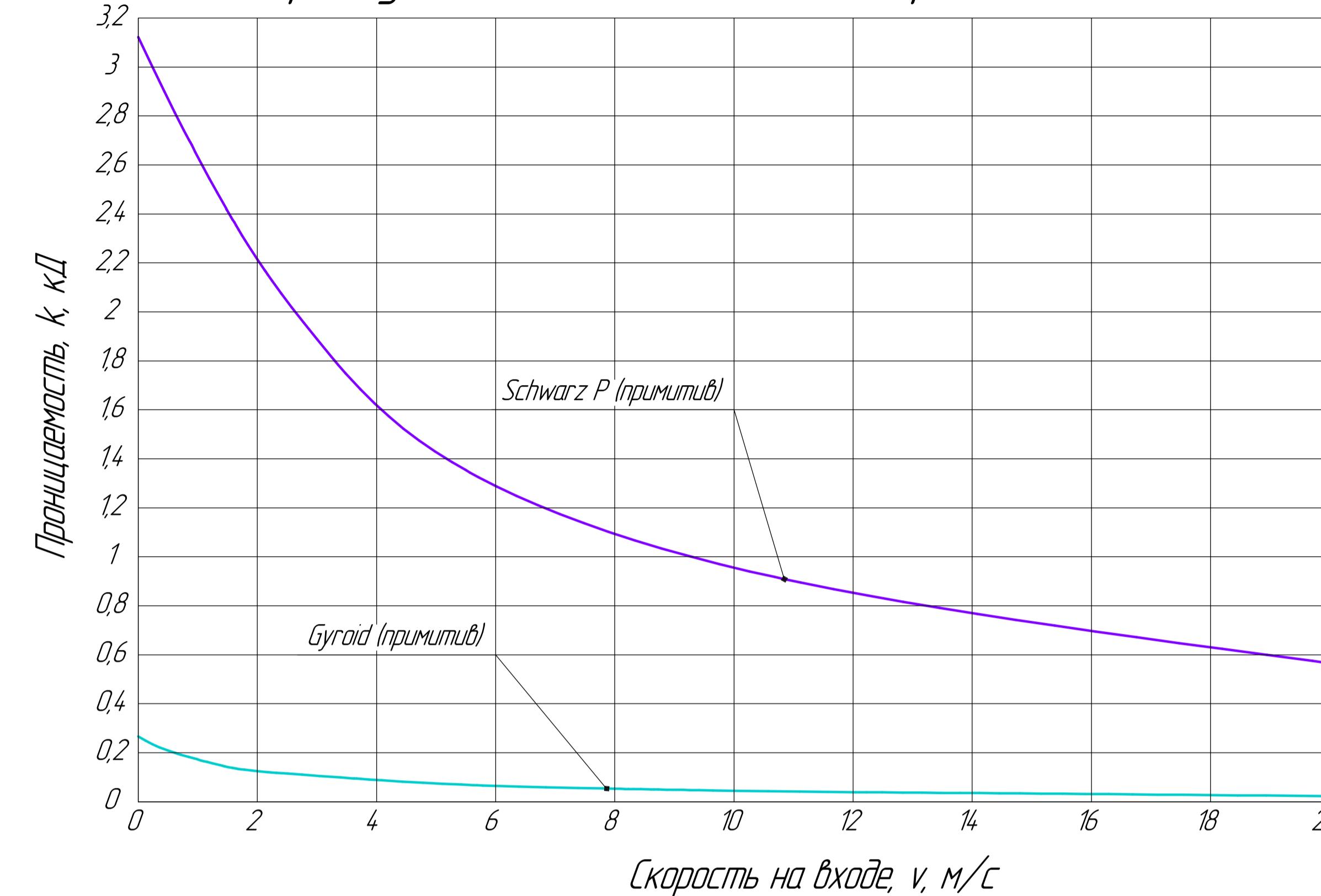
3 Толщина стружки $s = 0,12 \text{ мм}$.

4. Охлаждающая среда - гелий

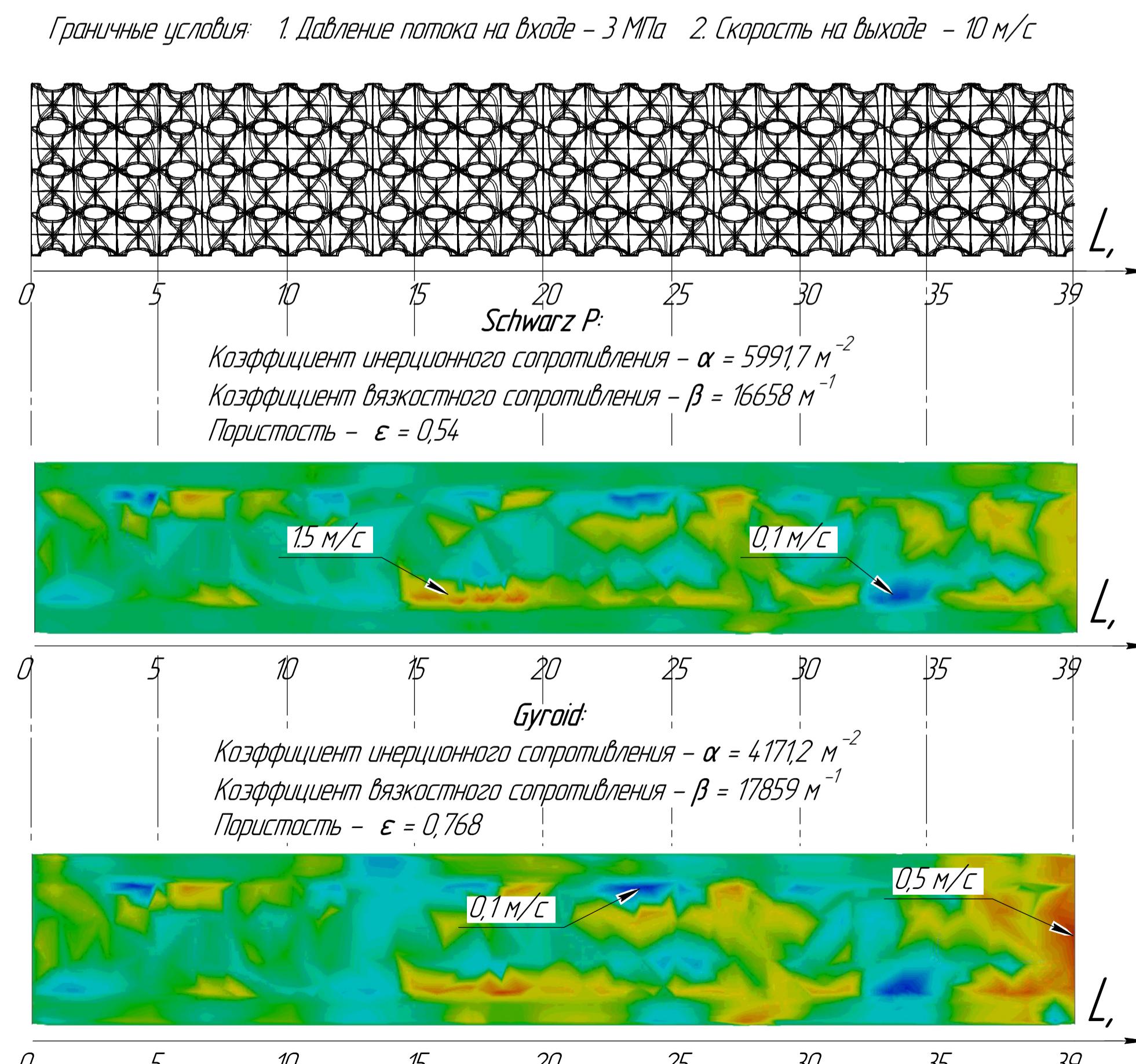
Зависимость потери давления от линейной скорости потока на входе в насадку



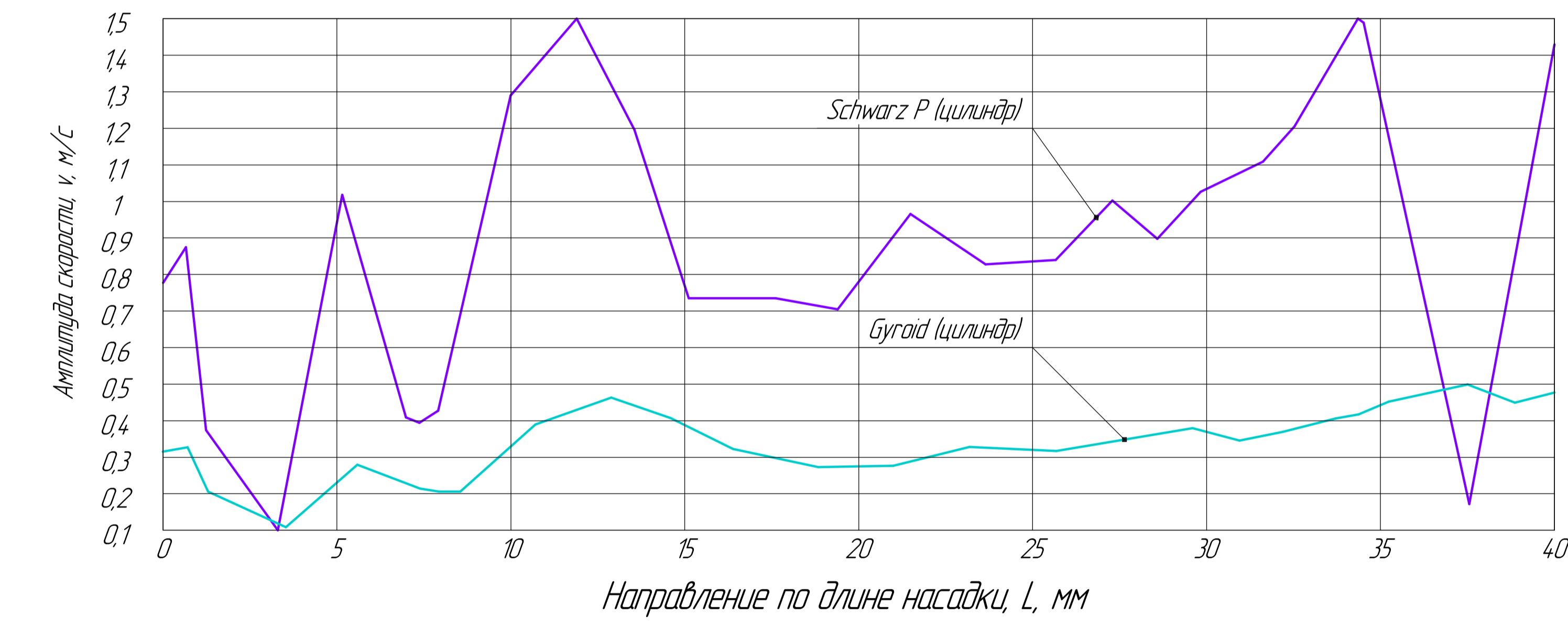
Зависимость проницаемости от линейной скорости на входе в насадку



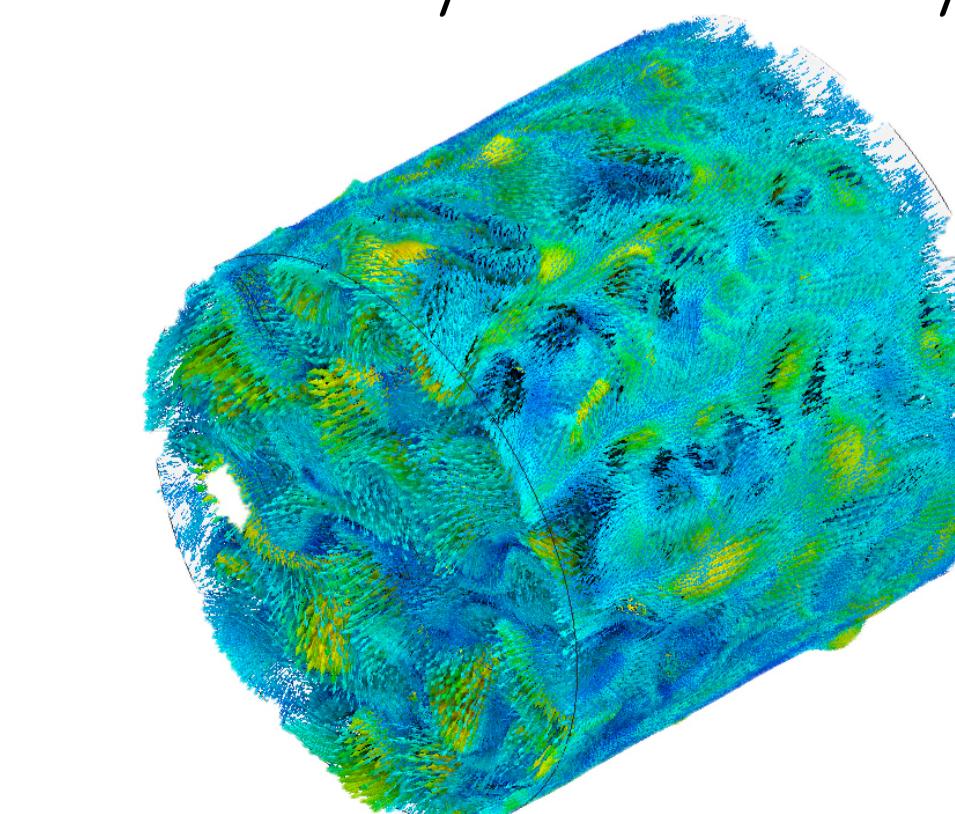
Поле скорости потока по длине насадки в среднем сечении



Зависимость амплитудных значений скоростей потока в диаметральной линии по длине насадки



Векторное поле скоростей образца насадки



Гравиція, маса

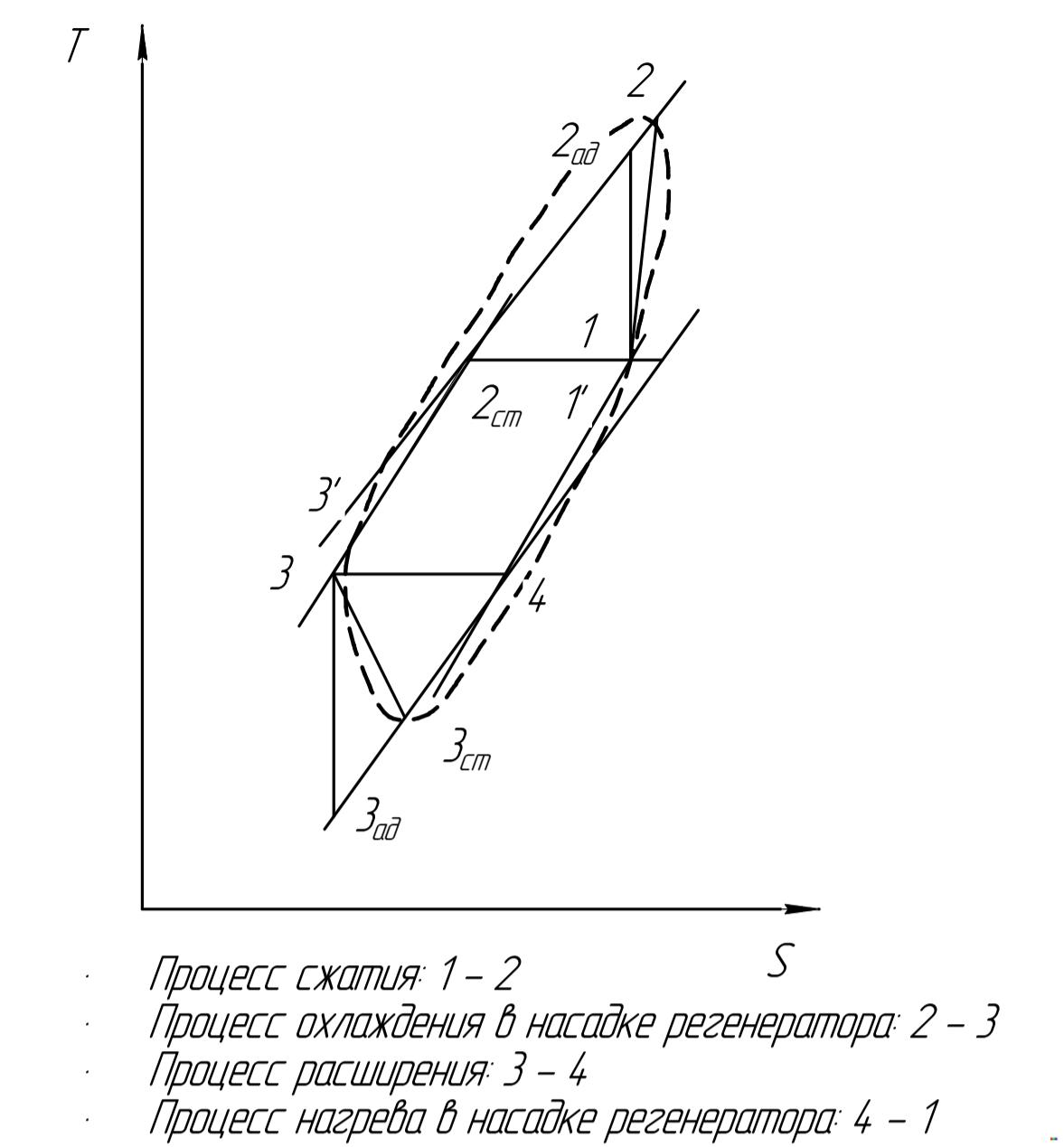
1. Скорость потока на входе – 4 м/с
 2. Массовый расход на выходе – 0,01 кг/с

Характеристик

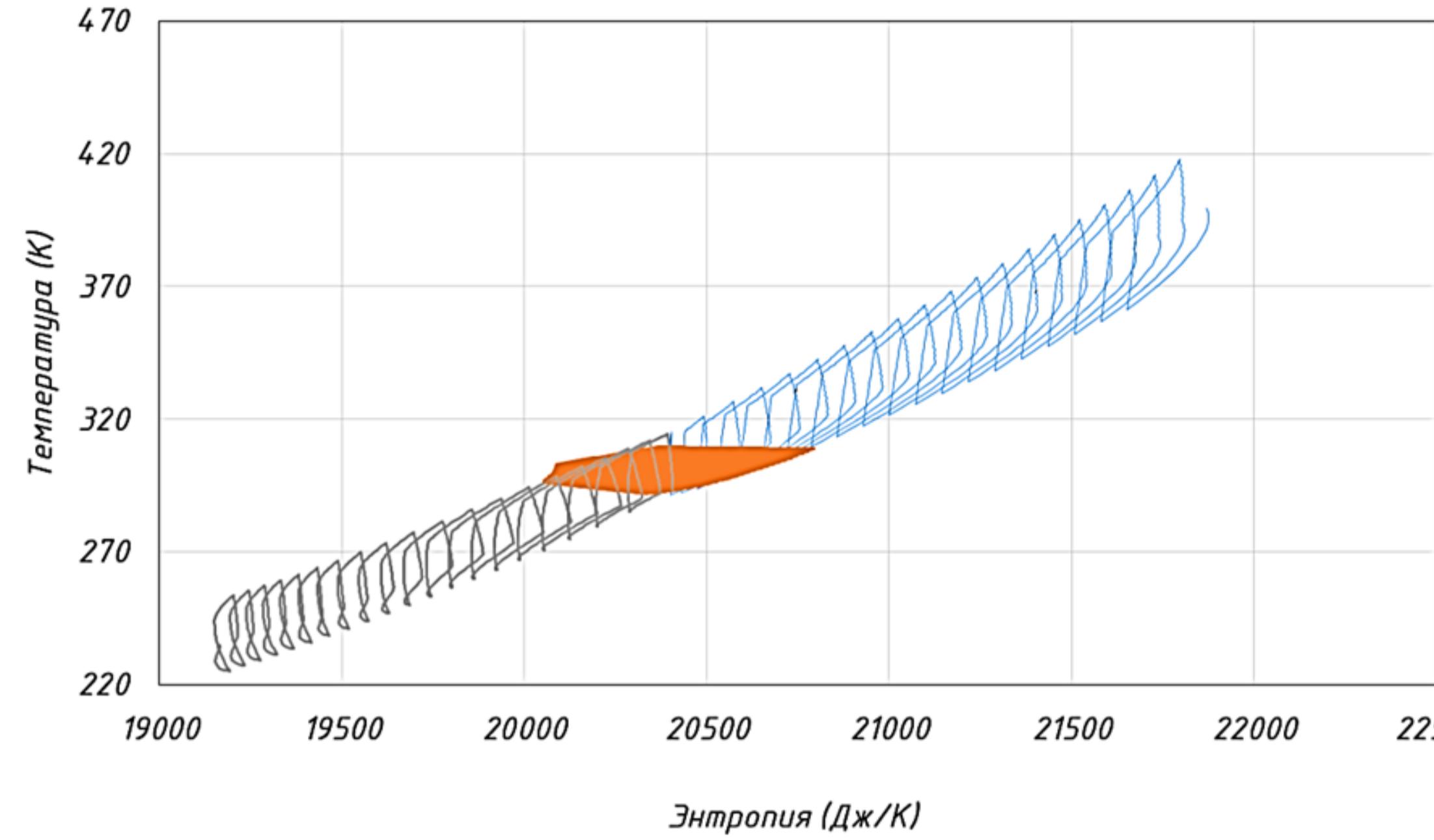
- 3. Толщина стенки примитива – 0,5 мм
 - 4. Шаг примитива – 4 мм
 - 5. Время расчета ~ 9 сут.

Таким образом, моделирование насадки без приведения к однородной модели крайне вычислительно затратно.

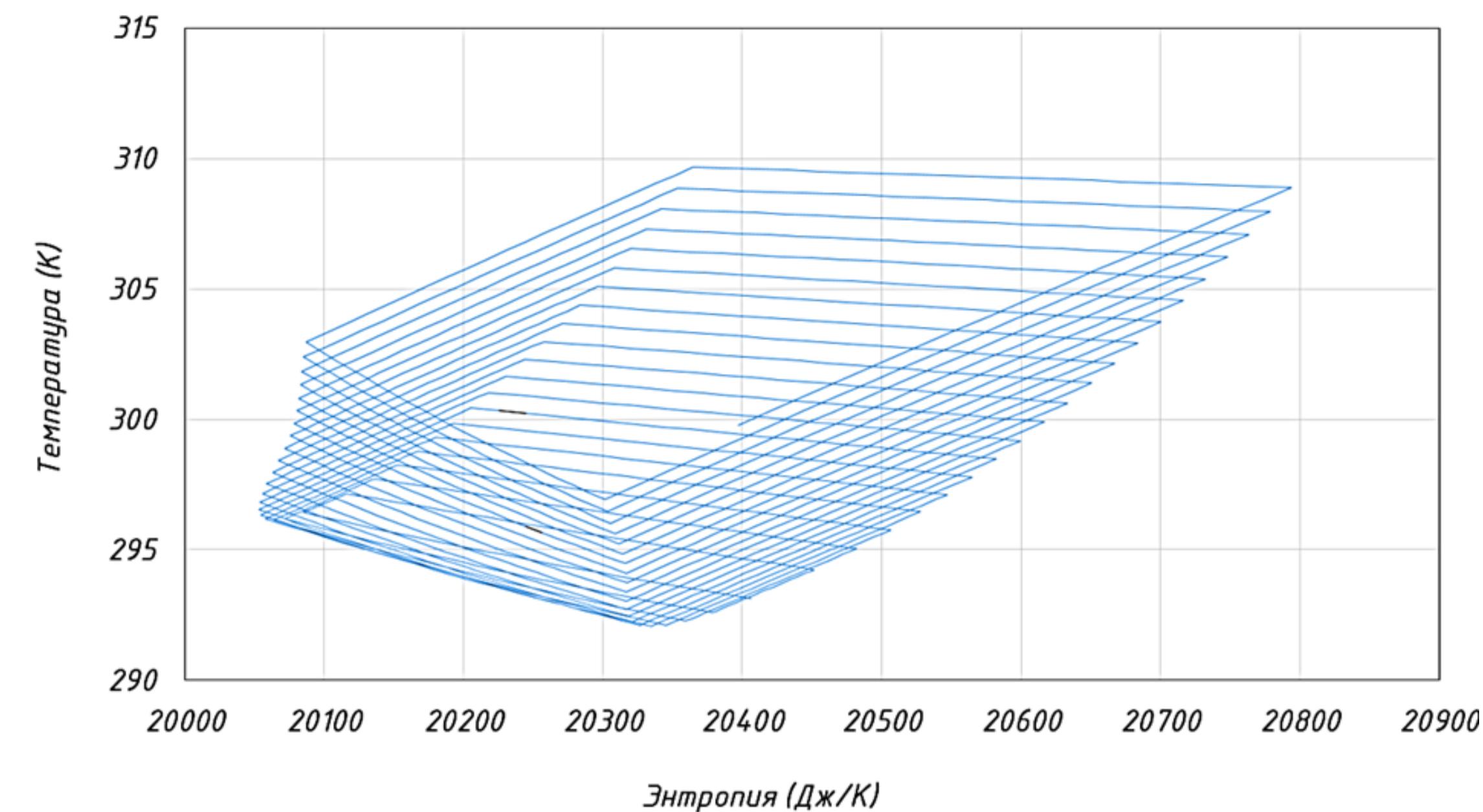
Геометрическая T-S диаграмма цикла Стирлинга



T-S диаграмма для полостей сжатия, расширения и регенератора:

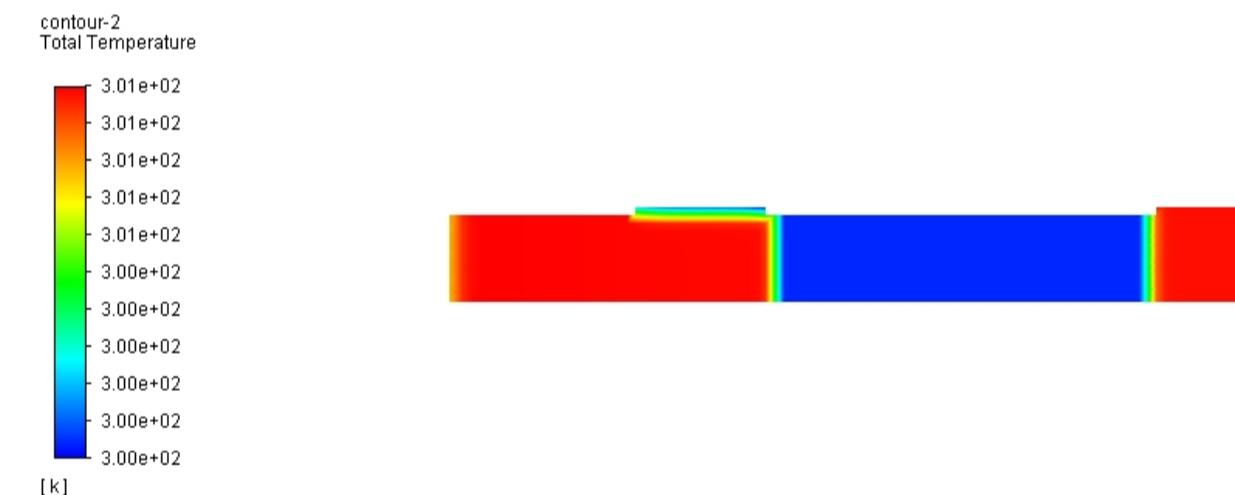


T-S диаграмма для полости регенератора:

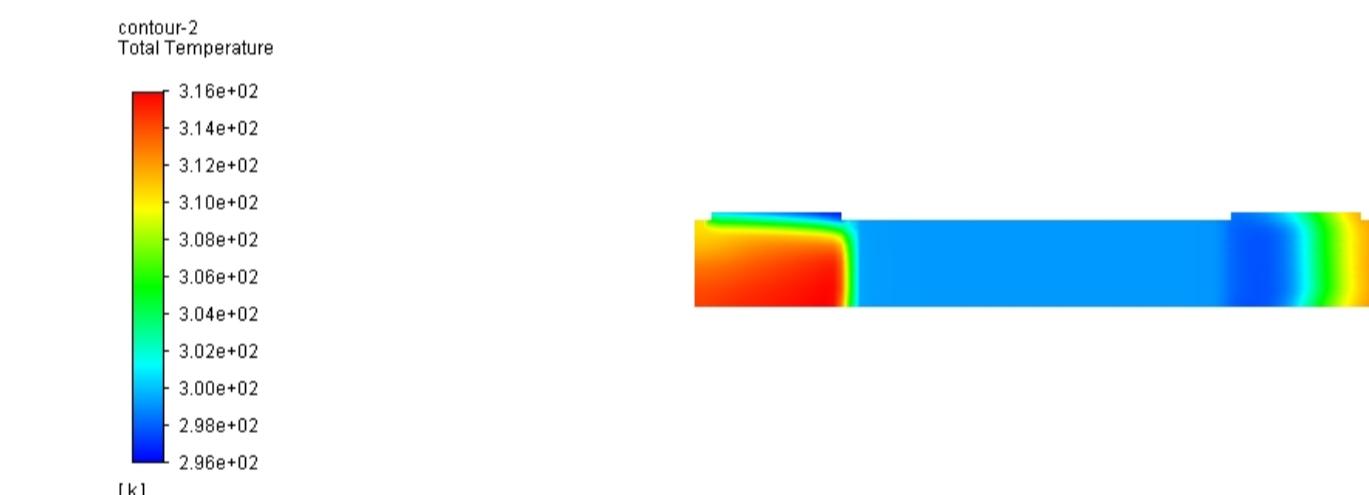


Контуры температур приведенной модели МКГМ:

$t = 0 \text{ с}$



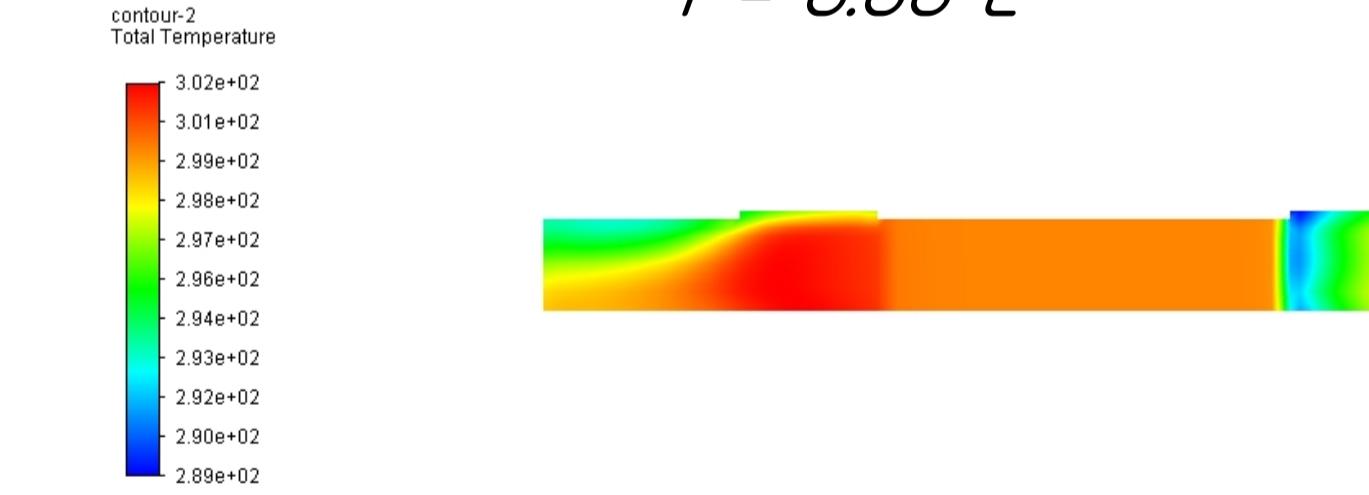
$t = 0.06 \text{ с}$



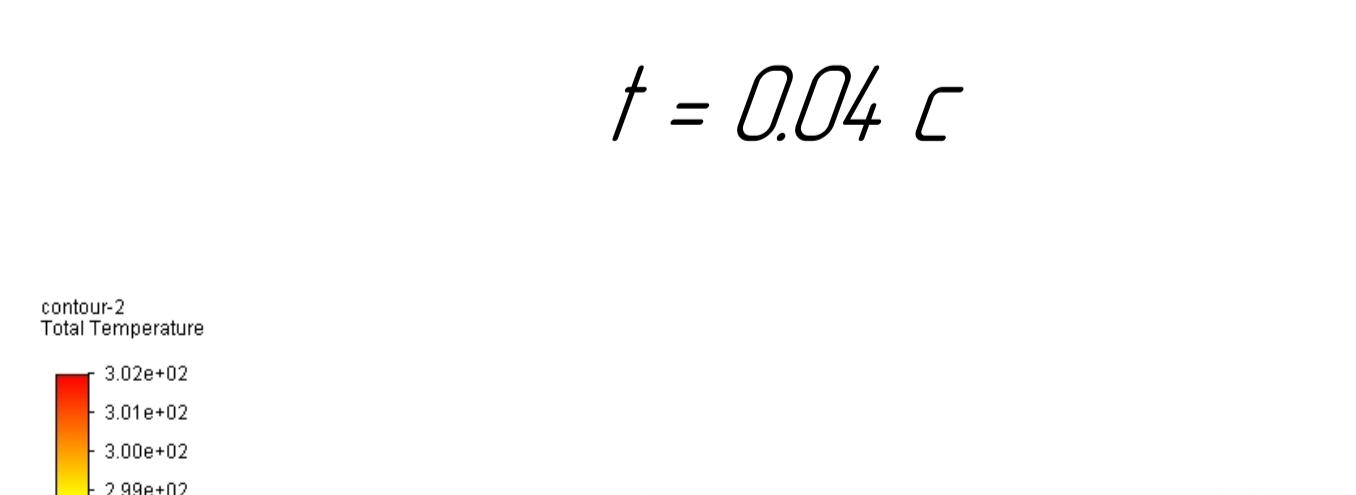
$t = 0.02 \text{ с}$



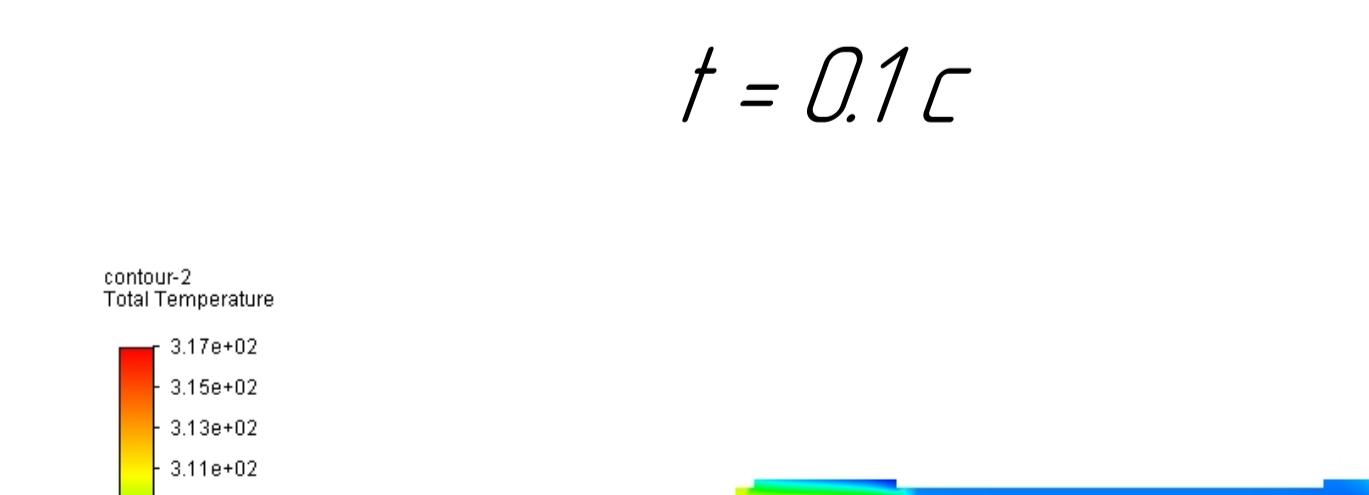
$t = 0.08 \text{ с}$



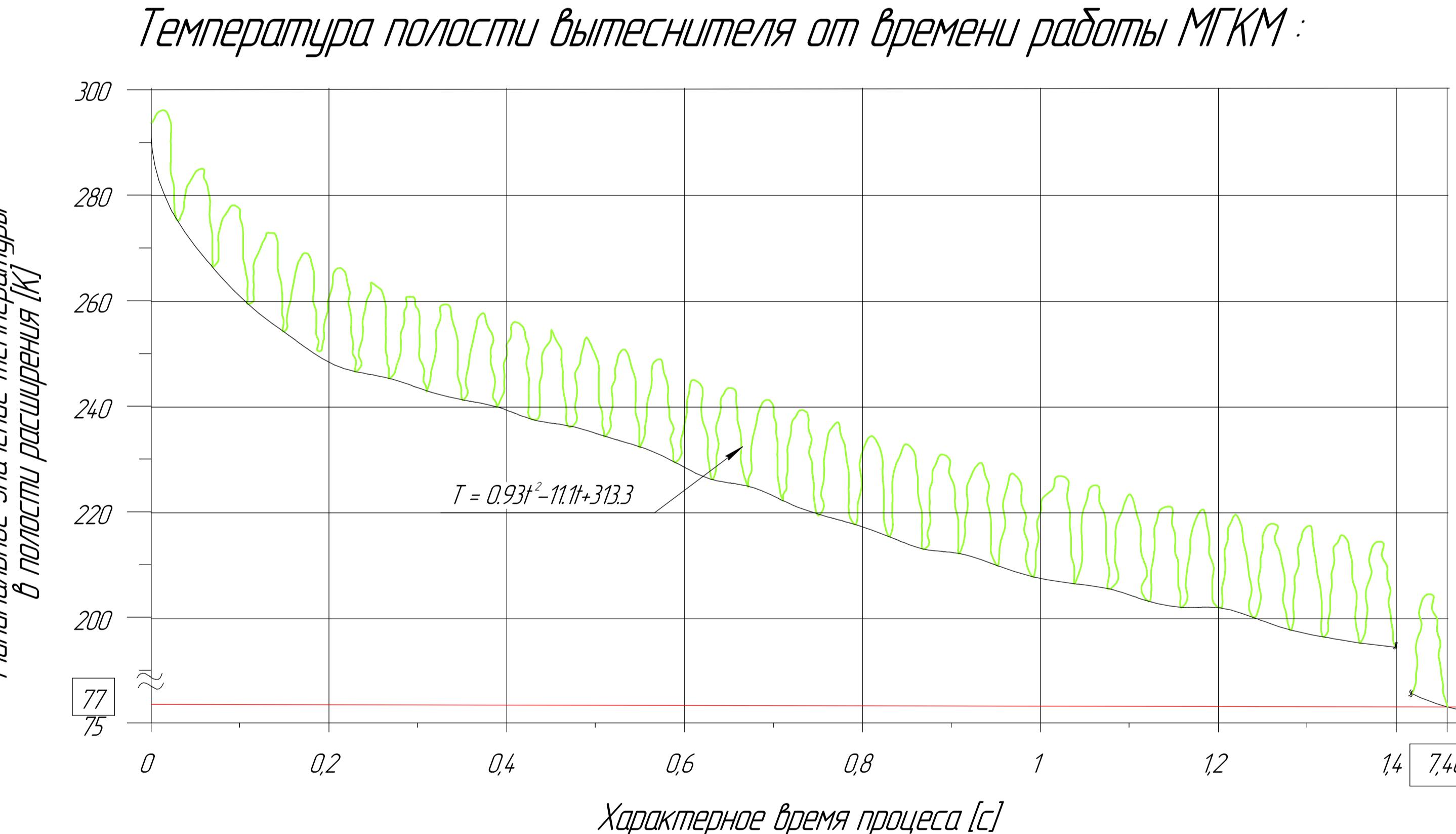
$t = 0.04 \text{ с}$



$t = 0.1 \text{ с}$



Минимальное значение температуры
в полости расширения [K]



Моделирование процесса реализовано в ANSYS Fluent 2019 R3.

- Число итераций: 1600 (6000 для диаграммы Темп. дет. – время)
- Временной шаг: 0,0005 с
- Модель вязкости: SAS (Scale Adaptive Simulation)
- Материал регенератора: Stainless Steel
- Инерционный коэффициент: 41712 м⁻²
- Вязкостный коэффициент: 17859 м⁻¹
- Материалы стенок: Stainless Steel (3 d.o.f.)
- Рабочий газ: He (3 d.o.f.)
- Тип сетки: Quadratic
- Размер сетки: 0,001 м
- Приведенный тепловой поток отводимый от полости сжатия (Heat Flux) Q: 10000 Вт/м²

- Число итераций: 1600 (6000 для диаграммы Темп. дет. – время)
- Временной шаг: 0,0005 с
- Модель вязкости: SAS (Scale Adaptive Simulation)
- Материал регенератора: Stainless Steel
- Инерционный коэффициент: 41712 м⁻²
- Вязкостный коэффициент: 17859 м⁻¹
- Материалы стенок: Stainless Steel (3 d.o.f.)
- Рабочий газ: He (3 d.o.f.)
- Тип сетки: Quadratic
- Размер сетки: 0,001 м
- Приведенный тепловой поток отводимый от полости сжатия (Heat Flux) Q: 10000 Вт/м²

Выпускная квалификационная работа			
Моделирование МКГМ Fluent			
Лит.	Масса	Масштаб	
Лист	Лист	Лист	Лист
Разраб.	Холопечников		
Проб.	Надасардин		
Гонка			
Иконки			
Учт.			

Перемещение поршней

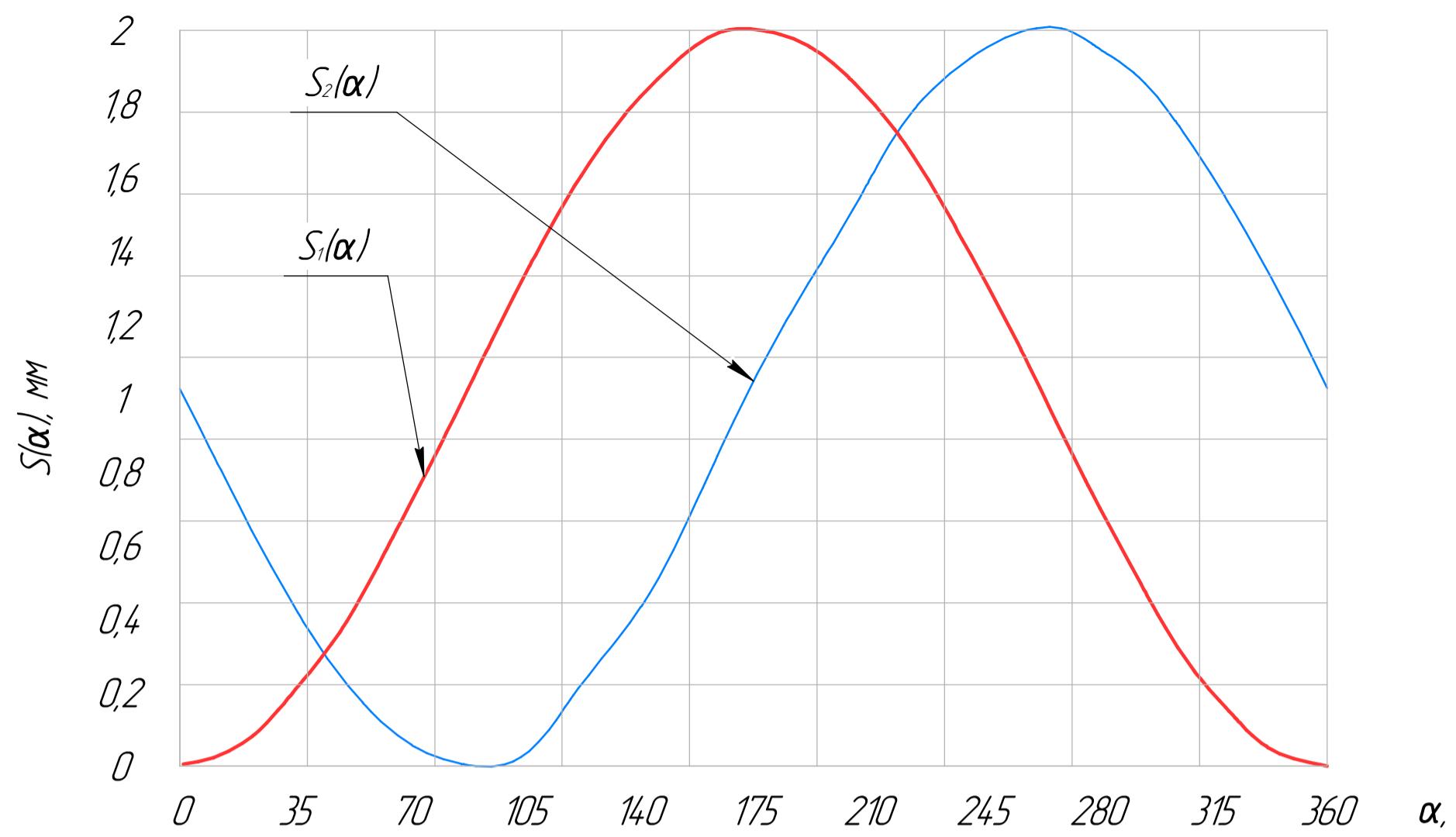
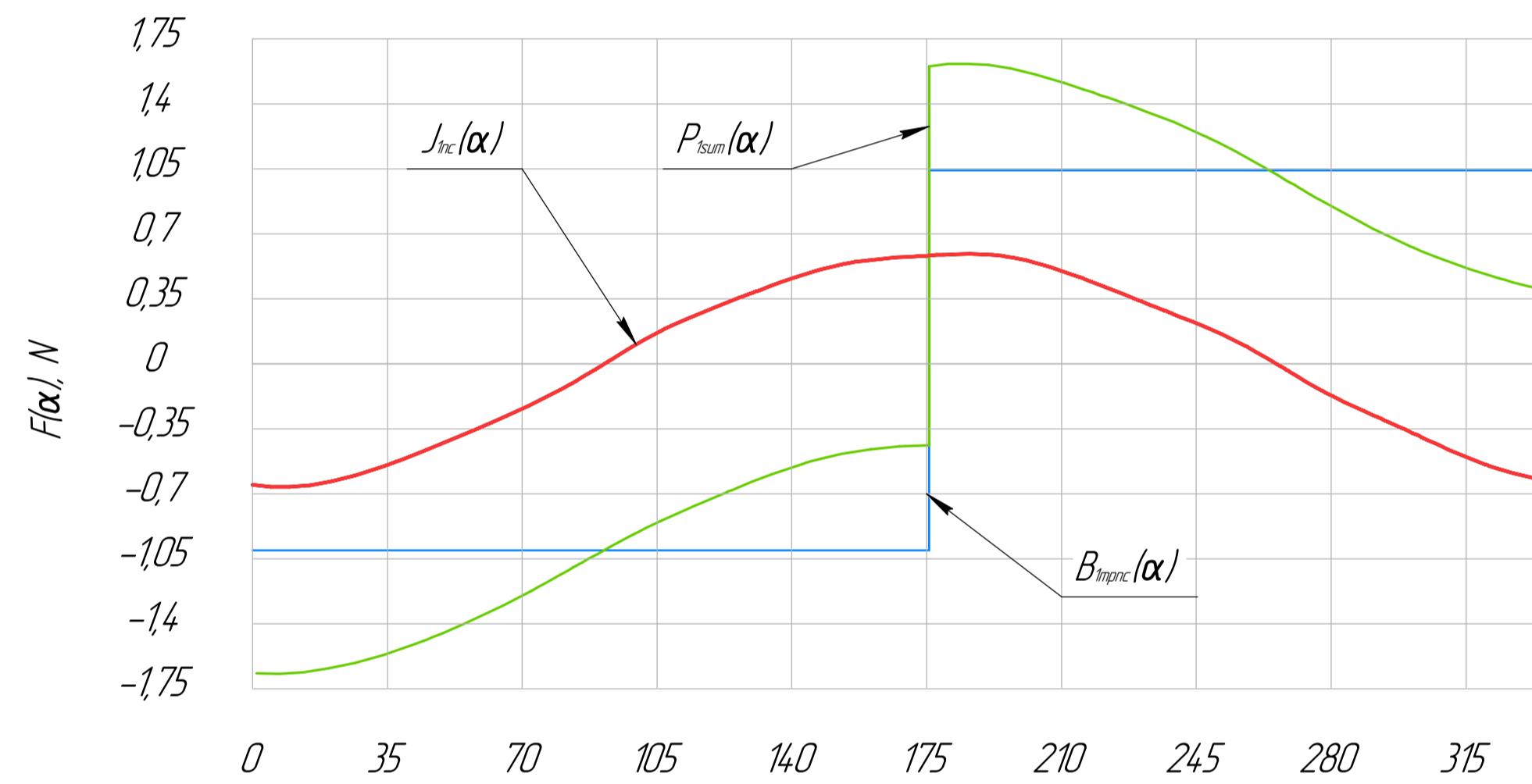
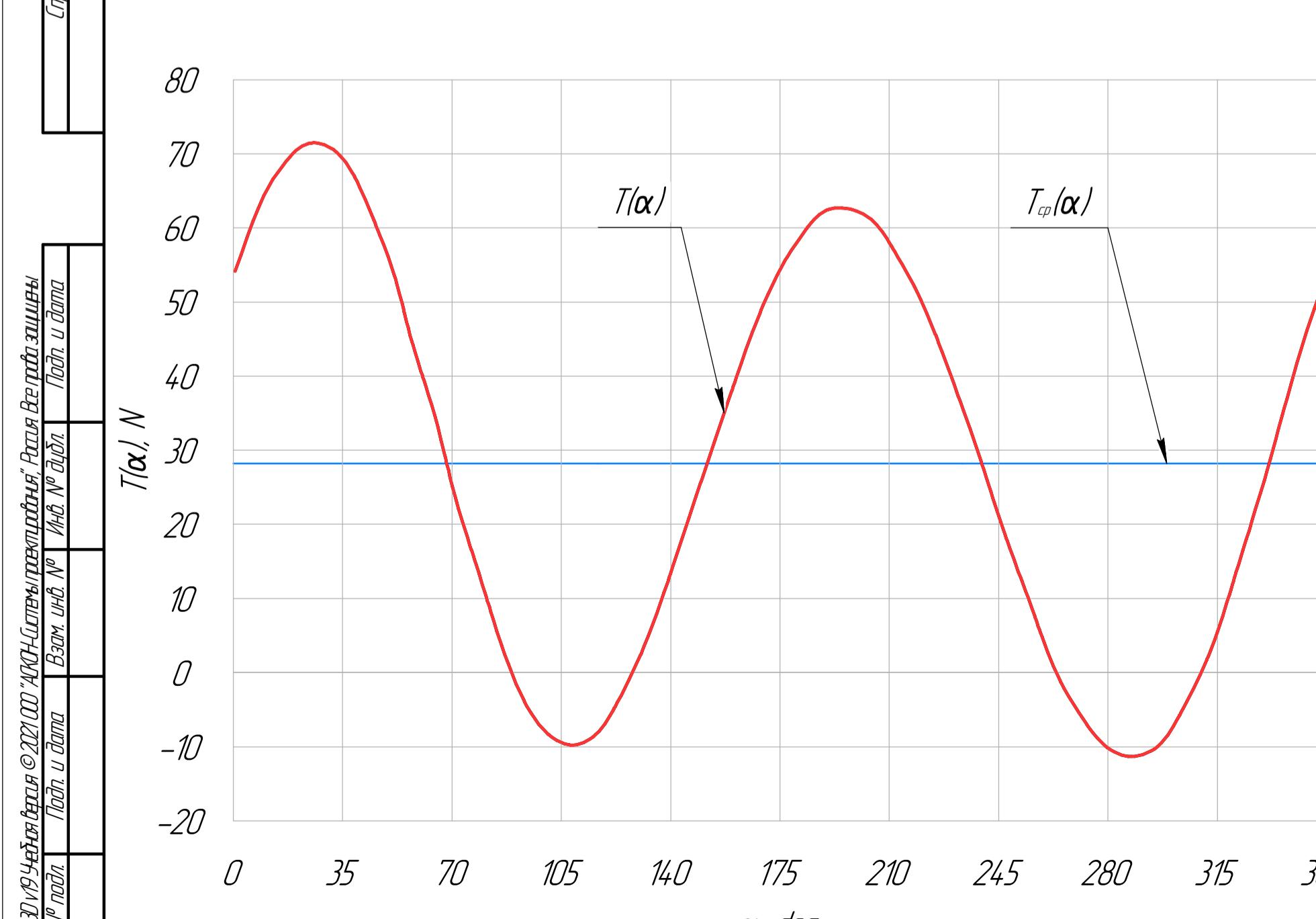


График сил, действующих на вытеснительную полость



Суммарная тангенциальная сила от двух цилиндров



Скорости поршней

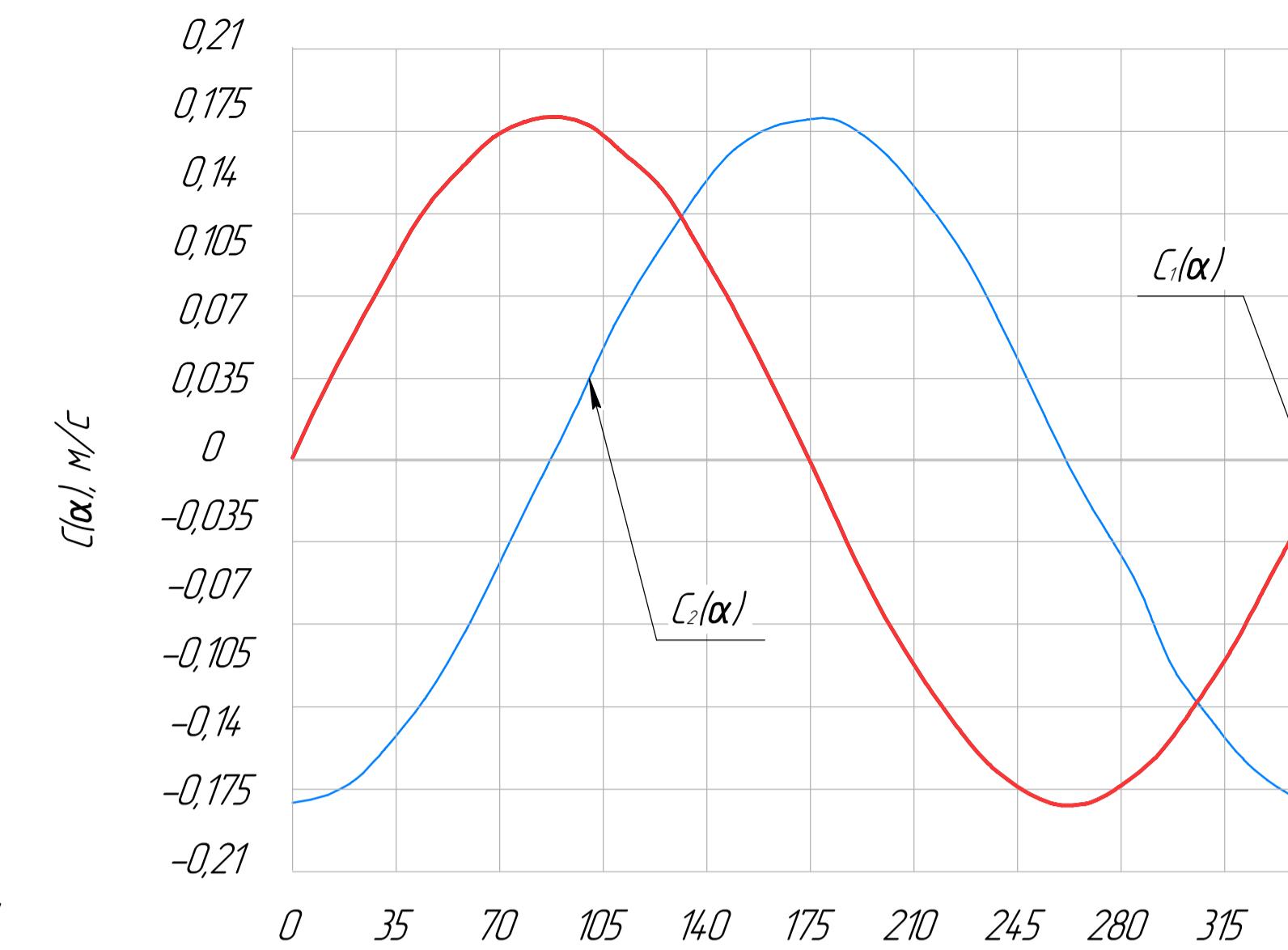
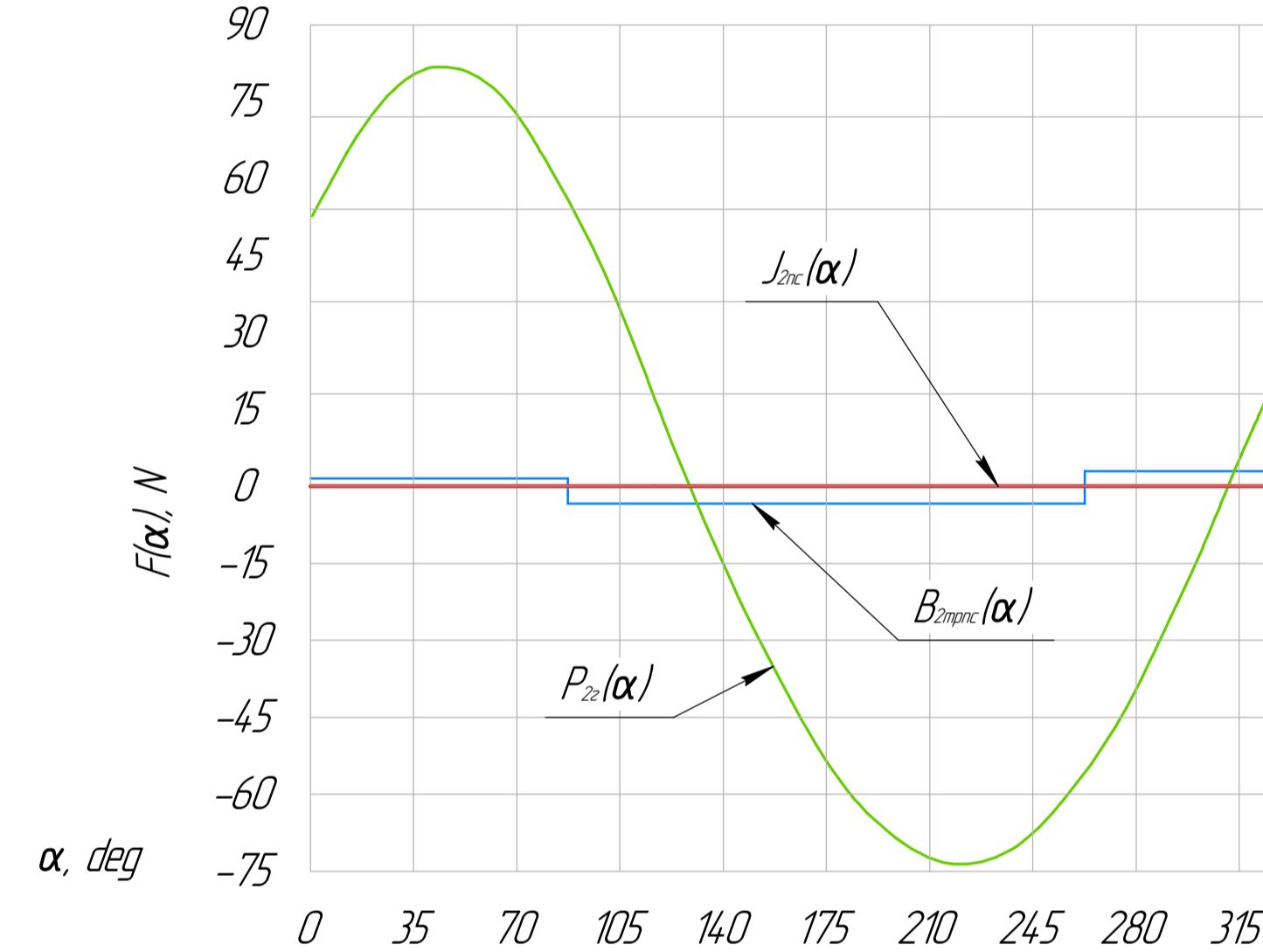
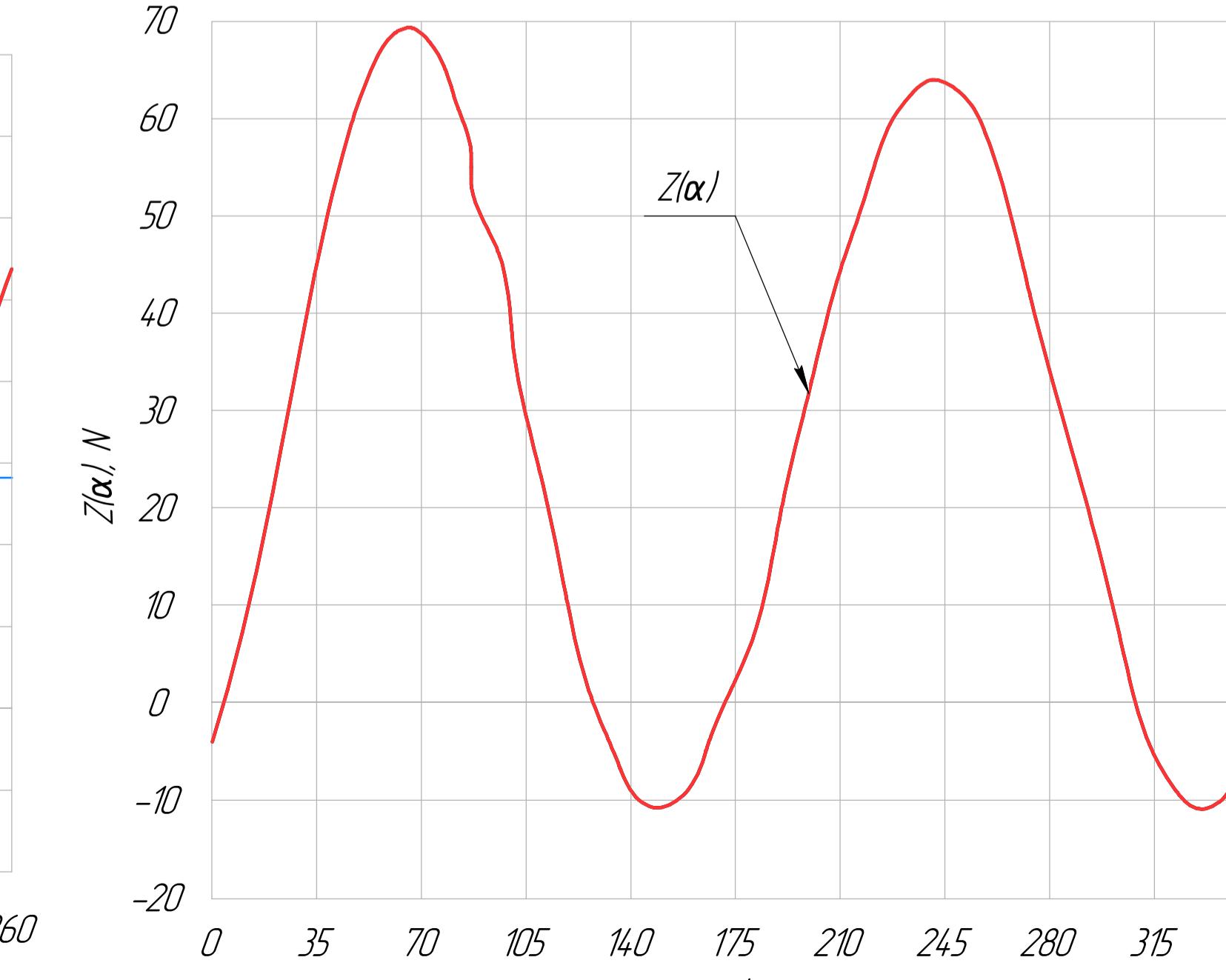


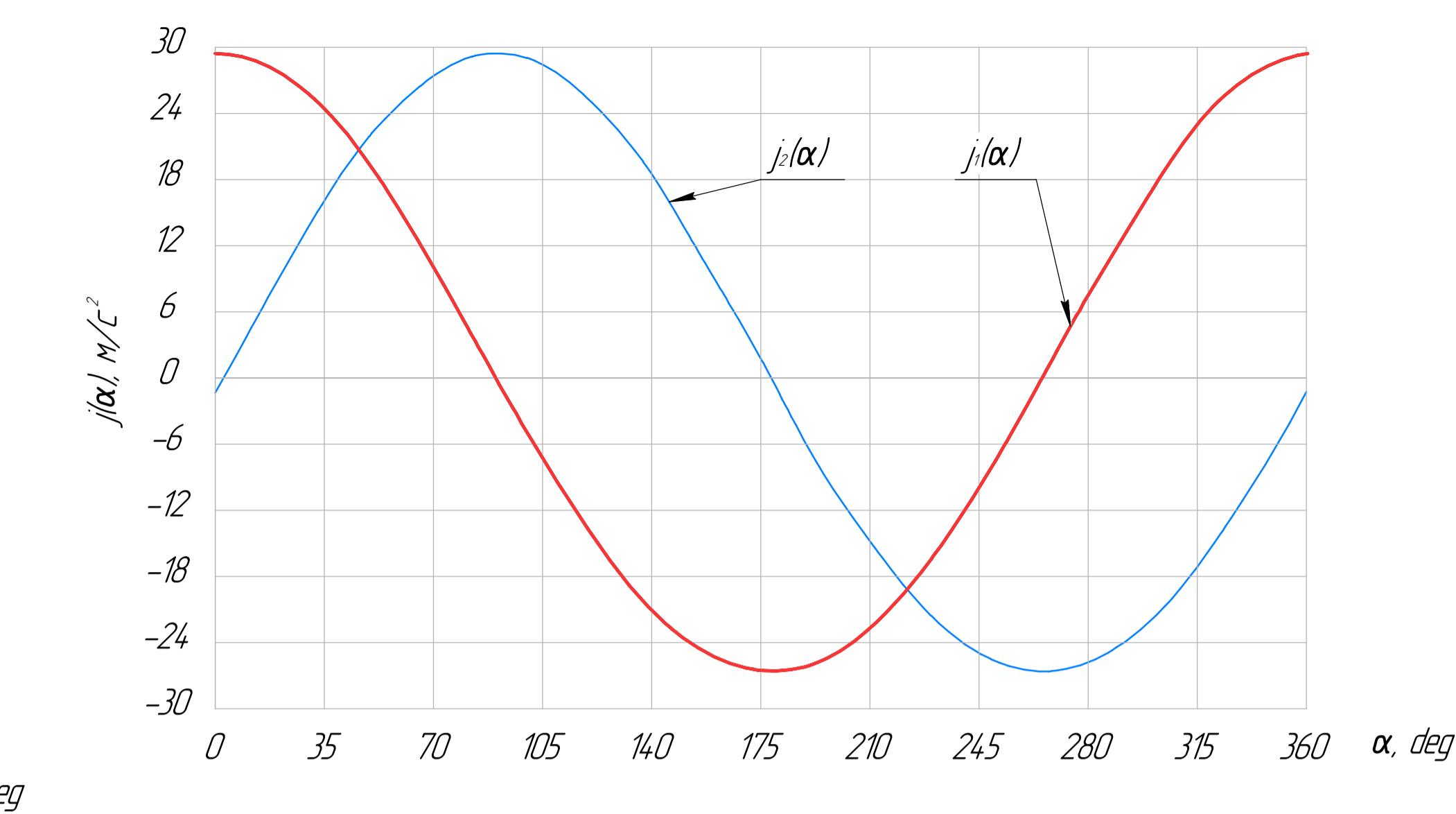
График сил, действующих на компрессорную полость



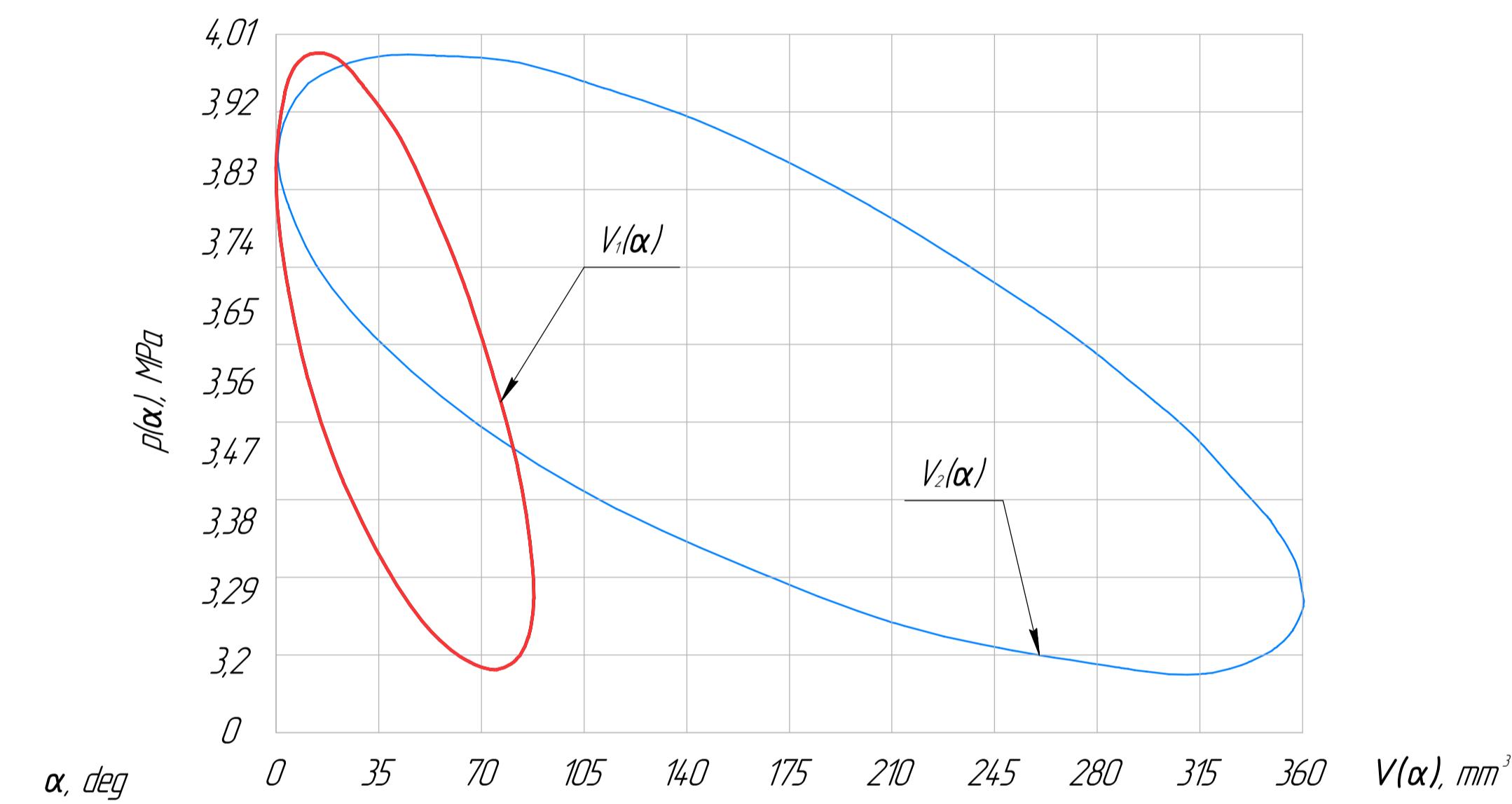
Суммарная радиальная сила от двух цилиндров



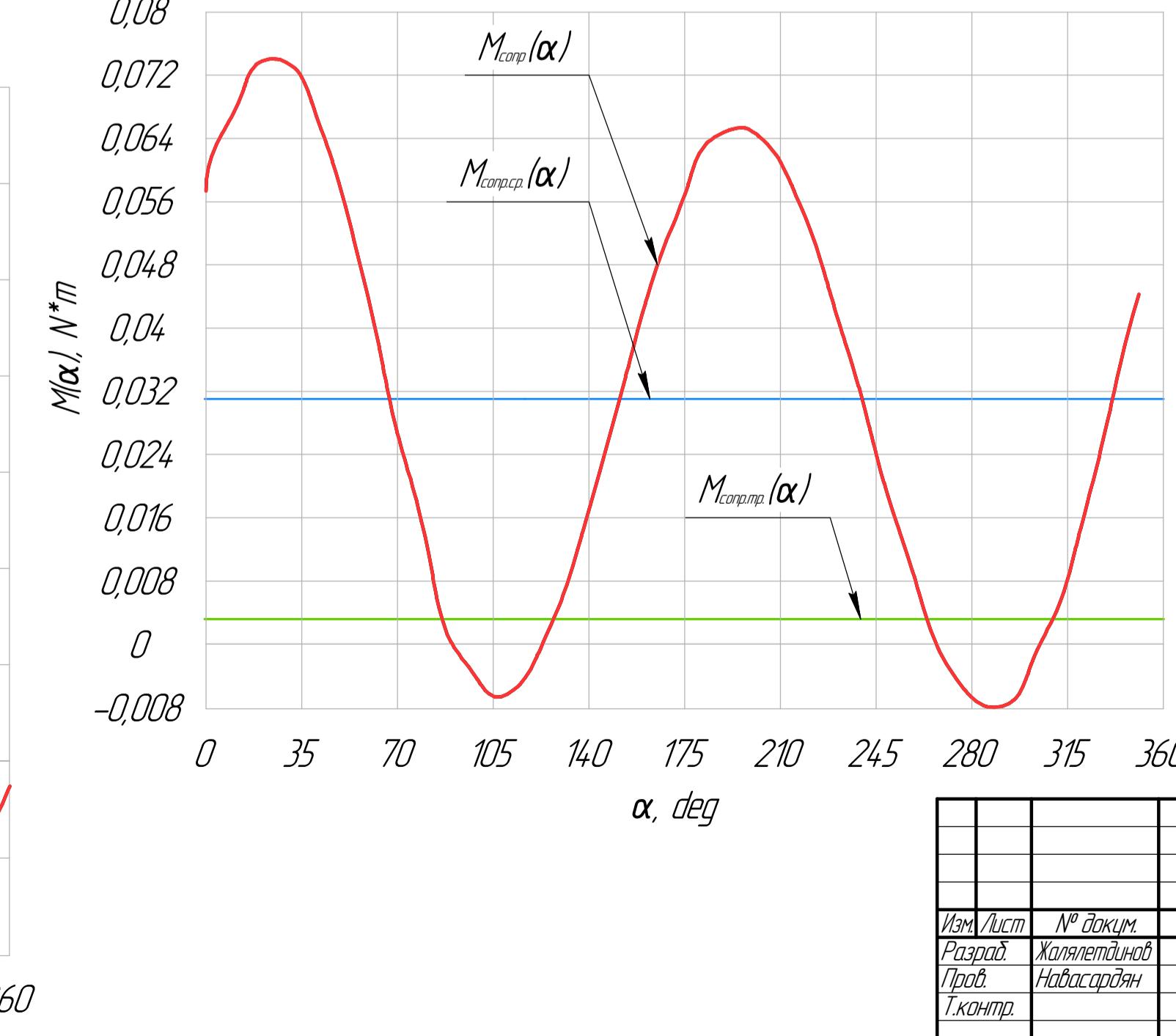
Ускорения поршней



Объемы полостей сжатия и расширения от угла поворота



Средний момент сопротивления



Параметры противовеса

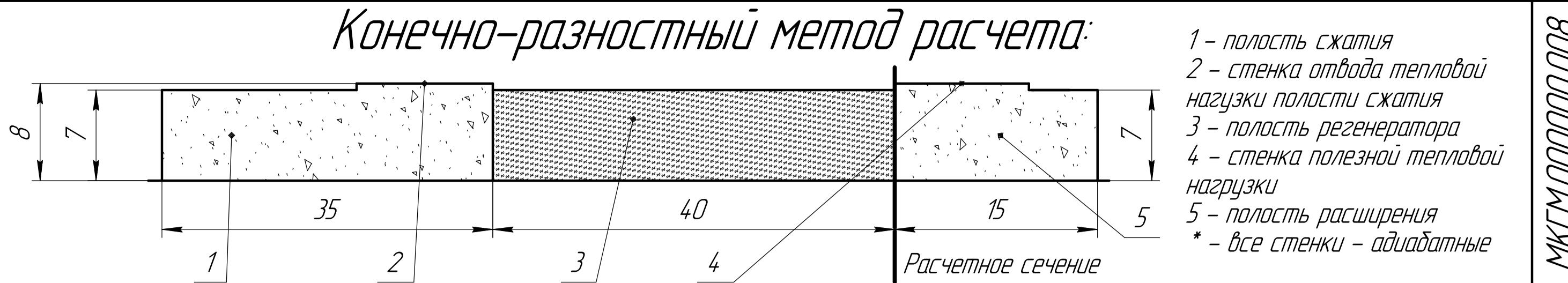
Часто встречающаяся противовесом сила
Масса противовеса
Средняя толщина противовеса
4 мм

Параметры маховика

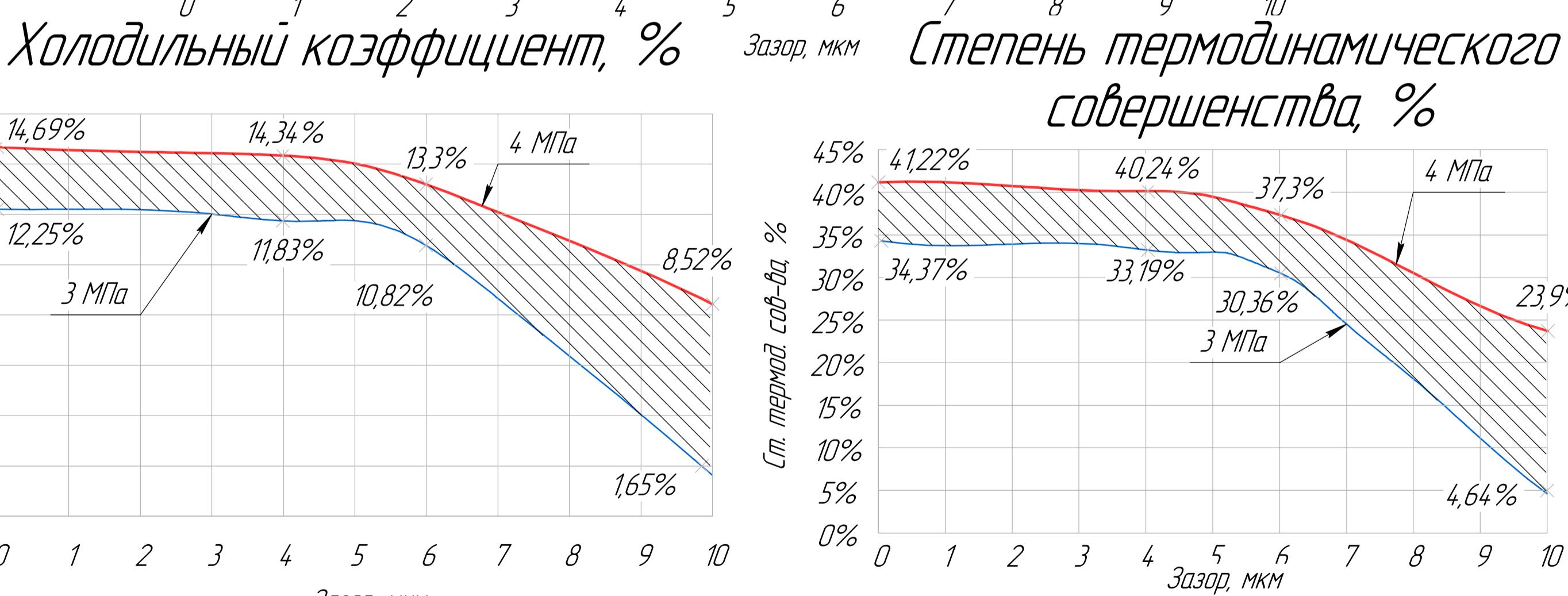
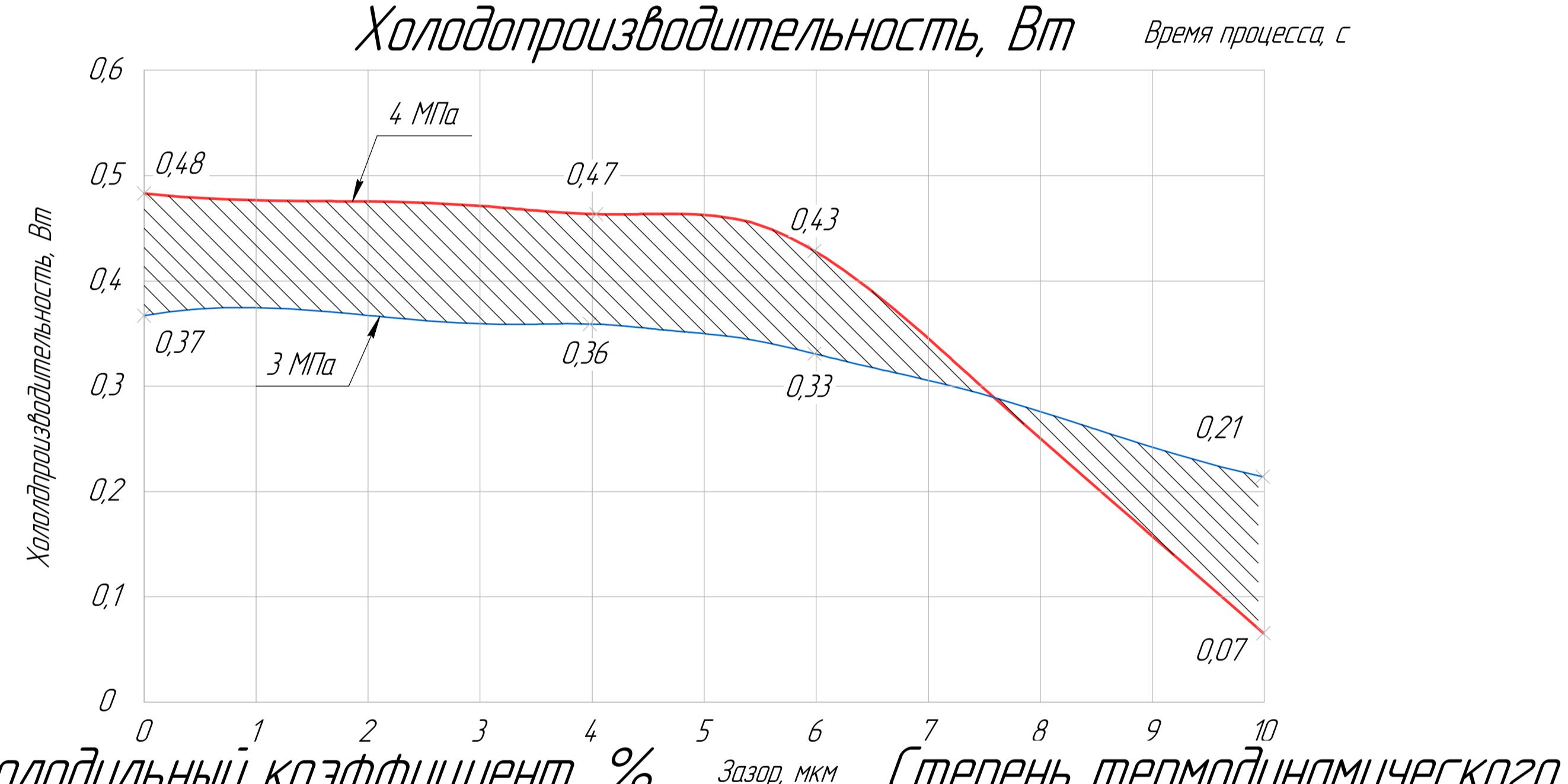
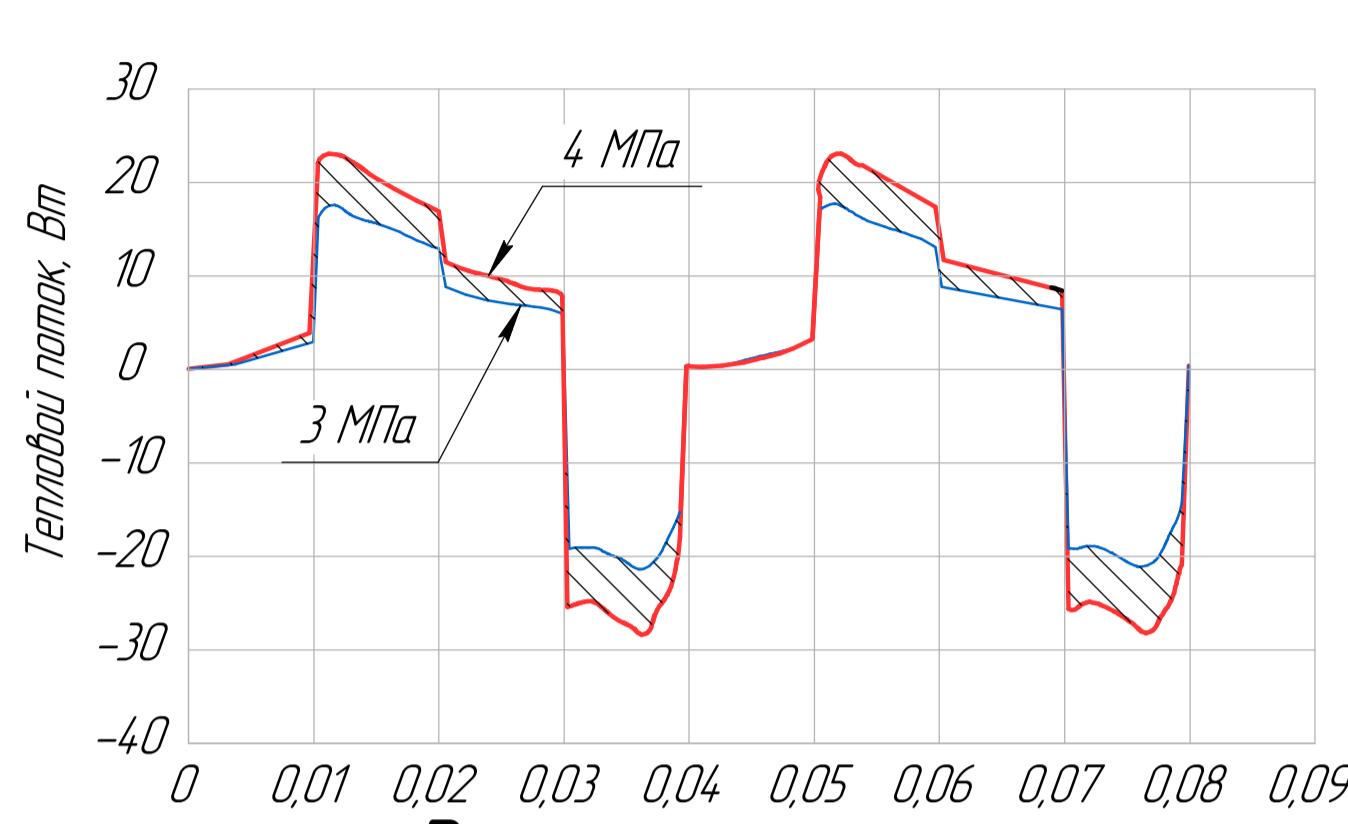
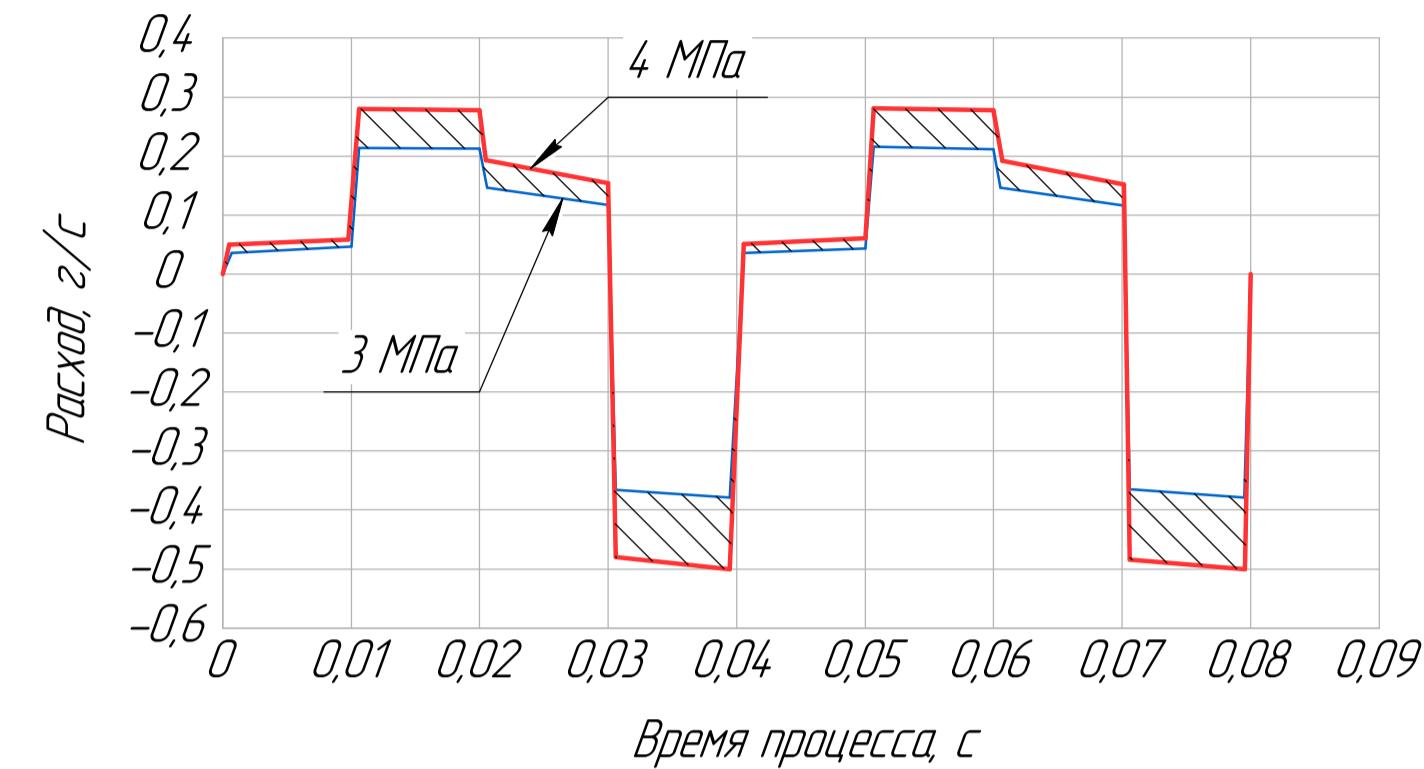
Средний диаметр ротора 9,32 мм
Масса ротора 31,737 г
Степень неравномерности вращения коленчатого вала МКМ
 $2,58 \cdot 10^{-2}$

Выпускная квалификационная работа			
Динамический расчет		Лит.	Масса
Изм. лист	№ докум.	Лит.	Масса
Разраб.	Ходячевский	Лит.	Масса
Проб.	Надасардин	Лит.	Масса
Техн.п.		Лит.	Масса
Изм.напр.		Лит.	Масса
Утв.		Лит.	Масса

Конечно-разностный метод расчета:



Теоретический массовый расход, г/с



Зазор, мкм

Сравнение результатов при аналитическом и краевом разностном методах

o Rote und pastellfarbene

Погрешности составляют: $\delta = \frac{Q_{x, \text{аналит.}} - Q_{x, \text{Fluent}}}{Q_{x, \text{аналит.}}} = 26.5\%$

Аналитический метод расчета:

1. По методу Шмидта и заданных начальных условиях определяются:

- 1) Соотношение ходов поршней $z = 1$
 - 2) Объемы полостей сжатия и расширения
 $V_k = 530 \text{ мм}^2$ $V_b = 132,5 \text{ мм}^2$
 - 3) Диаметр поршня компрессора:
 $D = 15 \text{ мм}$
 - 4) Расчетная холодопроизводительность:
 $Q_{расч} = 2,758 \text{ Вт}$
 - 5) Отводимый тепловой поток сжатия:
 $Q_{сж} = 7,768 \text{ Вт}$
 - 6) Мощность привода:
 $N = 4,9 \text{ Вт}$

3) После уточнения потерь, определяются полученные характеристики проектируемой МКГМ:

$$Q_{\text{действ}} = 0,653 \text{ Вт} \quad N = 4,9 \text{ Вт} \quad \varepsilon = 0,149 \quad \eta_t = 0,419$$

