ВКП.25.250.00.000 ПЗ

- Клапан предохранительный пружинный DN 25/40, PN 250/63
  - Пояснительная записка и расчёт на прочность — ВКП.25.250.00.000 ПЗ
    - Исходные данные (техническое задание заказчика)
    - Чего в ТЗ нет (принято проектом, см. `docs/02_decisions.md`)
  - 1. Конструкция клапана
    - 1.1. Назначение и схема
    - 1.2. Состав и принцип действия
    - 1.3. Материалы (ГОСТ 33260-2015, ГОСТ 977-88, ГОСТ 5632-2014)
    - 1.4. Основные результаты по конструкции
  - 2. Функциональный расчёт клапана
    - 2.1. Затвор и подъём
    - 2.2. Пропускная способность (ГОСТ 12.2.085-2017, прил. Д, Е)
    - 2.3. Давление в выходной полости при срабатывании и реактивная сила
    - 2.4. Пружины (ГОСТ 13764-86, ГОСТ 13765-86, ГОСТ 13773-86)
    - 2.5. Затвор «металл по металлу» (СТ ЦКБА 068-2008, ГОСТ 33258-2015)
    - 2.6. Узел ручного принудительного открытия (ГОСТ 31294-2005 п. 9.13)
    - 2.7. Сводка проверок
  - 3. Расчёт на прочность деталей под давлением (ГОСТ 34233.1/.2/.3-2017, ГОСТ Р 54522-2011)
    - 3.1. Допускаемые напряжения
    - 3.2. Проверка элементов
    - 3.3. Подробные проверки
    - 3.4. Необходимость расчёта на условия испытаний (ГОСТ 34233.1 п. 8.4)
  - 4. Фланцевые соединения (ГОСТ 34233.4-2017)
    - Входное соединение: 1” Class 1500 RTJ (ASME B16.5), кольцо R-16
- Расчёт фланцевого соединения по ГОСТ 34233.4-2017
  - Выходное соединение: DN 40 PN 63 исп. J (ГОСТ 33259), прокладка 1-1-40-63 (ГОСТ 34655)
- Расчёт фланцевого соединения по ГОСТ 34233.4-2017
  - Разъём корпус–крышка: 12 × M20, прокладка СНП
- Расчёт фланцевого соединения по ГОСТ 34233.4-2017
  - 5. Внешние нагрузки и сейсмостойкость (ГОСТ 30546.1-98)
    - 5.1. Расчётные ускорения
    - 5.2. Эквивалентные нагрузки (п. 5.5, 5.9) и реактивная сила
    - 5.3. Проверка входной шейки корпуса (сечение над входным фланцем, z = 42,35 мм)
  - 6. Численный расчёт корпуса методом конечных элементов
    - 6.1. Нормативная основа и критерии
    - 6.2. Расчётная модель
    - 6.3. Сетка и сходимость
    - 6.4. Закрепления и нагрузки
    - 6.5. Результаты: поля эквивалентных напряжений
    - 6.6. Линеаризация и оценка прочности по ГОСТ 34233.1 п. 8.10
    - 6.7. Собственные частоты сборки (сейсмостойкость)
    - 6.8. Выводы
    - 6.9. Допущения и ограничения
  - 7. Конструкторская документация (ЕСКД)
  - 8. Заключение
  - Журнал проектных решений (D-NN)
  - Приложение В. Нормативные документы (локальные копии)
  - Приложение А. Дайджест нормативных требований
    - 0. Присоединения (сводка `norm/01_flanges.md`)
    - 1. ГОСТ 12.2.085-2017 (выбор и расчёт пропускной способности)
    - 2. ГОСТ 31294-2005 (с Изм. 1–3) и ГОСТ 9544-2015
    - 3. ГОСТ 356-80 и ГОСТ 33257-2015 (давления и испытания)
    - 4. СТО Газпром 2-4.1-212-2008 (применимые к ПК пункты)

    - 5. Сейсмостойкость (ГОСТ 30546.1-98 с Изм. 1; ГОСТ 30546.2-98)
    - 6. ГОСТ 15150-69, исполнение УХЛ1
    - 7. Противоречия и риски
- Приложение Б. Воспроизводимость

Клапан предохранительный пружинный DN 25/40, PN 250/63

Пояснительная записка и расчёт на прочность — ВКП.25.250.00.000 ПЗ

Ревизия: 2026-11-23 / 1191c49454. Документ собран автоматически (`make report`) из расчётных скриптов и 3D-модели проекта.

Итоговый показатель	Значение
Пропускная способность по газу (метан, Рн = 25 МПа, α1 = 0,8)	81241 кг/ч
Пропускная способность по воде (Рн = 25 МПа, α2 = 0,6)	228958 кг/ч
Давление в выходной полости при срабатывании (расчётное)	10.0 МПа
Пружина № 1 (Рн 20…25 МПа)	d = 18 мм, D = 82 мм, n = 7.0, F1/F2/F3 = 12272/14134/17000 Н
Масса клапана (по модели)	59.1 кг
Функциональные проверки	все выполнены

Исходные данные (техническое задание заказчика)

Текст заказчика приведён дословно (получен 2026-11-22). Ничего не исправлено и не дополнено.

```
Тип изделия: клапана пружинный предохранительный
Номинальный диаметр входного патрубка DN 25 мм
Номинальное диаметр выходного патрубка DN 40 мм
Номинальное давление входного патрубка PN 250 кгс/см^2
Номинальное давление выходного патрубка PN 63 кгс/см^2
Коэффициент пропускной способности по газу α1 – не менее 0,8
Коэффициент пропускной способности по жидкости α2 – не менее 0,6
Строительная длина L=135 мм (от уплотнительной поверхности входного фланца до оси выходного патрубка),
L1=155 мм (от уплотнительной поверхности выходного фланца до оси входного патрубка)
Фланец входной – 1” class 1500 RTJ
Фланец выходной – по ГОСТ 33259, исполнение J.
Материал корпусных деталей – 12Х18Н9ТЛ/12Х18Н10Т
С узлом ручного принудительного открытия
Материал наплавки на седле – ЦН-6Л
Материал наплавки на золотнике – ЦН-12М
Климатическое исполнение УХЛ1 по ГОСТ 15150
Сейсмостойкость – до 10 баллов включительно по шкале MSK-64
Остальные требования – СТО Газпром 2-4.1-212-2008
Диаметр седла 24 мм
```

Задание на работу: «проработай проект. Начиная от плана до конечных прочностных расчетов. Сделай проектировку модели, по необходимости установи 3д кад модели с mcp и управляй ими. Собери чертеж, модель, далее расчет. Основной источник — госты».

Дополнение заказчика (в ходе работы): «Собирай весь проект в локальной папке. Документы выкачивай локально. Перечитывай, формируй по ним мд файлы. Должна быть воспроизводимость результата и решения».

Чего в ТЗ нет (принято проектом, см. `docs/02_decisions.md`)

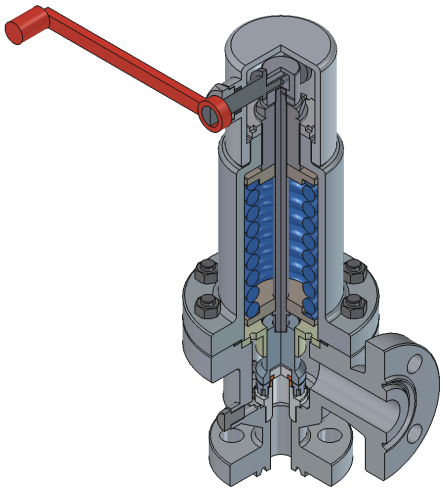
Параметр	В ТЗ	Как закрыто
Давление настройки Рн	не задано	диапазон пружин до PN включительно, расчёт на максимум

Параметр	В ТЗ	Как закрыто
Рабочая среда	не задана	природный газ (объекты ПАО «Газпром», по СТО Газпром 2-4.1-212-2008)
Температура рабочей среды	не задана	принята проектом, см. журнал решений
Противодавление	не задано	определяется расчётом для сброса через выходной патрубок DN 40

1. Конструкция клапана

1.1. Назначение и схема

Клапан ВКП.25.250.00.000 — пружинный предохранительный клапан прямого действия, **угловой, полноподъёмный (h = 7 мм ≥ d0/4 = 6 мм), неразгруженный, закрытого типа, с узлом ручного принудительного открытия**. Подача среды — под золотник. Рабочее положение — вертикальное, колпаком вверх (ГОСТ 31294 п. 5.13). Присоединение: вход — фланец 1” Class 1500 RTJ по ASME B16.5 (кольцо R-16; тарелка корпуса утолщена до 36 мм, отверстия под шпильки — резьбовые 7/8”-9UNC-2B, D-26), выход — фланец DN 40 PN 63 исполнения J по ГОСТ 33259-2015 (тарелка 32 мм; прокладка овального сечения по ГОСТ 34655-2020; ответный фланец — исполнения PN 160 с теми же присоединительными размерами, D-26). Строительные длины по ТЗ: L = 135 мм (от уплотнительной поверхности входного фланца до оси выхода), L1 = 155 мм (от уплотнительной поверхности выходного фланца до оси входа).



Сборка с вырезом четверти (FreeCAD, снимок через MCP)

1.2. Состав и принцип действия

Высокое давление (до 25 МПа) действует только в **сопле 2** и в шейке **корпуса 1**: сопло ввёрнуто в корпус по резьбе М45×2 и уплотнено металлическим конусом; его верхний торец с наплавкой ЦН-6Л образует седло Ø24/Ø26. **Золотник 4** с наплавкой ЦН-12М установлен в **обтюраторе 5**, который скользит в **направляющей 6**, зажатой между корпусом и **крышкой 11**. Усилие **пружины 9** передаётся через **нижнюю тарелку 8** и **шток 7** на обтюратор; затяжка пружины задаётся **регулировочным винтом 12** (фиксация — **гайка 13**). При достижении давления настройки золотник отрывается от седла; струя, отражаясь от юбки обтюратора и **регулировочной втулки 3** (камера подъёма), создаёт дополнительную подъёмную силу и обеспечивает полный ход при Рпо ≈ 1,1·Рн. Положение втулки 3 (давление закрытия, «хлопок») фиксируется **стопорным винтом 19**. Полость пружины соединена с полостью корпуса отверстиями во фланце направляющей и закрыта **колпаком 14**.

Узел ручного подрыва: **эксцентриковый вал 15** проходит через колпак (сальник — **набивка 25**, **нажимная втулка 18**); палец вала находится в окне **головки подъёма 16**, навёрнутой на шток. В исходном положении зазор

до верхней кромки окна 9 мм (больше хода золотника), поэтому вал не мешает работе клапана; поворот **рычага 17** поднимает шток до 5 мм. Разъём корпус–крышка: фланцы толщиной 45 мм со ступицами, 12 **шпилек 23** М20 и **гаек 22**, прокладка СНП **24** в выточке (D-12, D-25).

1.3. Материалы (ГОСТ 33260-2015, ГОСТ 977-88, ГОСТ 5632-2014)

Номера позиций — по спецификации ВКП.25.250.00.000 (ГОСТ 2.106).

Поз.	Деталь	Материал	Обоснование
1, 11	Корпус, крышка	12Х18Н9ТЛ ГОСТ 977-88, гр. 3, 100 % НК	ТЗ; ГОСТ 33260 табл. 2: −253…600 °С
2	Сопло (седло)	12Х18Н10Т + наплавка ЦН-6Л (29,5…39 HRC)	ТЗ; ГОСТ 10051, ГОСТ 33258
4	Золотник	12Х18Н10Т + наплавка ЦН-12М (39,5…51,5 HRC)	ТЗ; золотник твёрже седла (СТ ЦКБА 068 п. 4.5)
3, 5, 7, 8, 10, 12, 15, 19	Внутренние детали	14Х17Н2	ГОСТ 33260: −70…350 °С; пары трения по СТ ЦКБА 057
6, 13, 14, 16–18, 20	Направляющая, колпак и др.	12Х18Н10Т	ГОСТ 33260 табл. 3
9	Пружина	50ХФА ГОСТ 14959-2016	ГОСТ 33260 табл. 11: ПК при пониженной температуре, −180…+250 °С
23 / 22	Шпильки М20 × 70 ГОСТ 22034 / гайки М20 ГОСТ 5915	45Х14Н14В2М / 12Х18Н10Т	ГОСТ 33260 табл. 4; КЛР — группа корпуса
24	Прокладка разъёма	СНП (12Х18Н10Т + ТРГ) с внутренним кольцом	газ, 10 МПа, −60 °С

1.4. Основные результаты по конструкции

Параметр	Значение
Масса (по 3D-модели)	см. `out/cad/bom.json`
Габарит (Ш × Г × В)	418 × 247 × 550 мм (с рычагом)
Пробные давления	вход 35,0 МПа (ГОСТ 356-80), выход 15 МПа (D-09)
Допускаемые моменты от трубопровода	вход 553 Н·м, выход 768 Н·м (D-26)
Пересечения деталей (кроме условных резьб)	нет (`out/cad/interference.json`)
Файлы модели	`out/cad/assembly.step`, `out/cad/parts/*.step`, `out/cad/valve_assembly.FCStd`

2. Функциональный расчёт клапана

Скрипт: `calc/valve_calc.py`; результаты: `out/calc/valve_calc.json`. Термодинамика метана — `calc/gas_pr.py` (уравнение Пенга–Робинсона).

2.1. Затвор и подъём

Параметр	Значение	Обоснование
Диаметр седла d0	24,0 мм	ТЗ
Площадь седла F	452,4 мм²	π·d0²/4
Ширина уплотнительного пояска b	1,0 мм	решение D-07
Средний диаметр уплотнения Dm / эффективная площадь A_m	25,0 мм / 490,9 мм²	—
Ход золотника h (≥ d0/4 = 6,0)	7,0 мм	ГОСТ 31294 п. 3.1.36
Площадь щели π·d0·h	527,8 мм² (= 1,17·F)	≥ F

2.2. Пропускная способность (ГОСТ 12.2.085-2017, прил. Д, Е)

Газ — метан, T1 = 293,15 К, Рпо = 1,10·Рн, P1 — абсолютное давление; α1 = 0,8 (минимум по ТЗ); Kc = Kv = Kw = 1. Основной метод — прямое интегрирование по изоэнтропе реального газа (Е.1), сравнительный —

постоянный показатель изоэнтропы n = k = 1,30 (Е.2.2, табл. И.1).

Рн, МПа	P1 абс., МПа	ρ1, кг/м³	Z1	βкр (реальн.)	G*ideal, кг/(с·м²)	G (Е.1), кг/ч	G (n = 1,3), кг/ч	Δ, %
16,0	17,70	147,9	0,788	0,488	38140	49692	44486	-10,5
20,0	22,10	180,4	0,806	0,460	49073	63936	54893	-14,1
25,0	27,60	213,8	0,850	0,426	62355	81241	66778	-17,8

Жидкость — вода 20 °C, α2 = 0,6, противодавление атмосферное:

Рн, МПа	G, кг/ч	Q, м³/ч	скорость в выходном патрубке Ø40, м/с
16,0	183167	183,5	40,6
25,0	228958	229,4	50,7

2.3. Давление в выходной полости при срабатывании и реактивная сила

Газ, прошедший седло, дросселируется (h = const, ГОСТ 12.2.085 прил. Ж) и истекает через выходной патрубок Ø40 мм (коэффициент расхода патрубка принят 0,9). Давление торможения Pb в полости корпуса находится из равенства расходов через седло и через патрубок (оба сечения — критические).

α1	G, кг/с	Pb изб., МПа	Pb/P1	Tb, °C	T в выходном сечении, °C	реактивная сила, кН
0,8	22,57	8,62	0,316	-18,9	-60,3	12,50
0,9	25,39	9,68	0,354	-14,3	-56,4	14,09

Вывод. При верхнем давлении настройки 25 МПа накопленное давление в выходной полости при полном расходе превышает PN 63 выходного фланца: выходная полость корпуса, крышка и разъём корпус–крышка рассчитываются на p_вых.расч = **10,0 МПа** (решение D-09); присоединение к сбросному трубопроводу остаётся PN 63 по ТЗ. Реактивная сила передаётся на входной фланец моментом F_R·L (учтено в расчёте фланца).

2.4. Пружины (ГОСТ 13764-86, ГОСТ 13765-86, ГОСТ 13773-86)

Класс II, разряд 4 (статические пружины, длительно сжатые — прил. 1 ГОСТ 13764); τ3 = 800 МПа; сталь 50ХФА (ГОСТ 33260 табл. 11: −180…+250 °C, ПК при пониженной температуре). F1 = Рн·A_m при верхнем Рн диапазона, F2 = F1 + c·h; c выбрана из условия F2/F1 ≈ 1,15 (решение D-10).

Параметр	Обозн.	Формула ГОСТ 13765	№ 1 (20…25 МПа)	№ 2 (16…20 МПа)
Позиция ГОСТ 13773	—	табл.	72	50
Диаметр прутка	d, мм	табл.	18,0	16,0
Наружный диаметр	D1, мм	табл.	100,0	95,0
Средний диаметр	D, мм	(9)	82,0	79,0
Индекс	i	(10)	4,56	4,94
Коэффициент кривизны	k	(21)	1,346	1,315
Жёсткость витка	c1, Н/мм	табл.	1862,0	1302,0
Рабочих витков	n	(7)	7,0	6,0
Полное число витков	n1	(8)	9,0	8,0
Жёсткость	c, Н/мм	(6)	266,0	217,0
Сила при настройке (верх диапазона)	F1, Н	Рн·A_m	12272	9817
Сила при полном подъёме	F2, Н	F1 + c·h	14134	11336
Сила при макс. деформации	F3, Н	табл.	17000	12500
Инерционный зазор	δ	(1)	0,169	0,093
Касательное напряжение	τ3, МПа	(4)	819	807
То же при F2	τ2, МПа	(20)	681	732
Деформации	s1 / s2 / s3, мм	(11)–(13)	46,1 / 53,1 / 63,9	45,2 / 52,2 / 57,6

Параметр	Обозн.	Формула ГОСТ 13765	№ 1 (20…25 МПа)	№ 2 (16…20 МПа)
Длины	l0 / l1 / l2 / l3, мм	(14)–(17)	216,9 / 170,8 / 163,8 / 153,0	177,6 / 132,4 / 125,4 / 120,0
Шаг	t, мм	(18)	27,13	25,60
Устойчивость	l0/D	≤ 3	2,65	2,25
Запас до соприкосновения витков при h	мм	s3 − s2	10,8	5,4
Ход регулировочного винта на диапазон	мм	ΔF/c	9,2	9,0
F2/F1 на нижней границе	—	—	1,190	1,193
Критическая скорость	vк, м/с	(5)	3,90	2,12
Масса	m, кг	(23)	4,60	3,11

2.5. Затвор «металл по металлу» (СТ ЦКБА 068-2008, ГОСТ 33258-2015)

Параметр	Значение	Норма / ссылка
Площадь уплотнительного пояска π·Dm·b	78,5 мм²	—
q при F1 без давления среды	156 МПа	≤ 800 (ЦН-6Л/ЦН-12М, без вращения; табл. 11)
q при F2 (полный ход, справочно)	180 МПа	—
q_у для газа при 0,9·Рн (ф. (1), m = 1,5, c = 3,5 МПа, B = 0,10 см)	123 МПа	справочно — см. D-11
Остаточное удельное давление при 0,9·Рн	15,6 МПа	герметичность ПК обеспечивается притиркой и подтверждается испытанием по ГОСТ 9544
Твёрдость седла (ЦН-6Л) / золотника (ЦН-12М)	29,5…39,0 / 39,5…51,5 HRC	золотник твёрже на ≥ 5 HRC (п. 4.5)

2.6. Узел ручного принудительного открытия (ГОСТ 31294-2005 п. 9.13)

Давление на входе	Макс. момент на кулачке, Н·м	Полный момент, Н·м	Усилие на рычаге L = 250 мм, Н	Норма
0,8·Рн	17,3	27,9	112	≤ 196 Н
1,0·Рн	4,0	12,6	51	≤ 196 Н

Эксцентриситет кулачка e = 7 мм, зазор до гайки подъёма 9 мм (≥ h + 2), подъём рычагом до 5 мм.

2.7. Сводка проверок

№	Проверка	Значение	Условие	Ед.	Вывод	Ссылка
1	Ход золотника (полноподъёмный: h ≥ d0/4)	7,000	≥ 6,000	мм	выполнено	ГОСТ 31294-2005 п. 3.1.36
2	Площадь кольцевой щели π·d0·h ≥ F седла	527,788	≥ 452,389	мм²	выполнено	условие α по седлу
3	Седло работает в критическом режиме при накопленном давлении (Pb/P1 < βкр)	0,354	≤ 0,426	—	выполнено	ГОСТ 12.2.085 прил. Е.1
4	пружина № 1 (20…25 МПа): δ = 1 − F2/F3	0,169	∈ 0,05…0,25	—	выполнено	ГОСТ 13765-86 ф. (1)
5	пружина № 1 (20…25 МПа): τ3 (норматив 800 МПа ±10 %)	819,238	≤ 880,000	МПа	выполнено	ГОСТ 13764-86 табл. 2; ГОСТ 13765 прим. к п. 3.8

№	Проверка	Значение	Условие	Ед.	Вывод	Ссылка
6	пружина № 1 (20…25 МПа): индекс i = D/d	4,556	∈ 4…12	—	выполнено	ГОСТ 13765-86 п. 22
7	пружина № 1 (20…25 МПа): устойчивость l0/D	2,645	≤ 3,000	—	выполнено	СТ ЦКБА 044-2010 п. 4.1.11
8	пружина № 1 (20…25 МПа): запас до соприкосновения витков при полном подъёме	10,775	> 0,000	мм	выполнено	ГОСТ 13765 (s3 > s2)
9	пружина № 2 (16…20 МПа): δ = 1 − F2/F3	0,093	∈ 0,05…0,25	—	выполнено	ГОСТ 13765-86 ф. (1)
10	пружина № 2 (16…20 МПа): τ3 (норматив 800 МПа ±10 %)	807,335	≤ 880,000	МПа	выполнено	ГОСТ 13764-86 табл. 2; ГОСТ 13765 прим. к п. 3.8
11	пружина № 2 (16…20 МПа): индекс i = D/d	4,938	∈ 4…12	—	выполнено	ГОСТ 13765-86 п. 22
12	пружина № 2 (16…20 МПа): устойчивость l0/D	2,248	≤ 3,000	—	выполнено	СТ ЦКБА 044-2010 п. 4.1.11
13	пружина № 2 (16…20 МПа): запас до соприкосновения витков при полном подъёме	5,362	> 0,000	мм	выполнено	ГОСТ 13765 (s3 > s2)
14	Удельное давление на уплотнении без давления среды (F1)	156,250	≤ 800,000	МПа	выполнено	СТ ЦКБА 068-2008 табл. 11 (ЦН-6Л / ЦН-12М)
15	Твёрдость золотника выше седла (по нижним границам)	10,000	≥ 5,000	HRC	выполнено	СТ ЦКБА 068-2008 п. 4.5
16	Усилие на рычаге ручного подрыва (0,8 Рн)	111,572	≤ 150,000	Н	выполнено	ГОСТ 31294-2005 п. 9.13 (≤ 196 Н); СТО Газпром 2-4.1-212 п. 7.2.1.3 ж (ручные приводы ≤ 150 Н) — принято 150
17	Зазор кулачок — гайка подъёма ≥ h + 2	9,000	≥ 9,000	мм	выполнено	конструктивное условие (полный подъём без касания)
18	Шток: напряжение сжатия от F2	70,296	≤ 423,333	МПа	выполнено	[σ] = Rp0,2/1,5 (ГОСТ 34233.1 — запас по пределу текучести)
19	Резьба сопла М45×2: срез витков (испытание Рпр вх, затяжка ×1,3)	60,723	≤ 106,909	МПа	выполнено	τ ≤ 0,6·[σ]и; [σ]и = Rp0,2/1,1 (ГОСТ 34233.1 п. 8)
20	Резьба регулировочного	5,306	≤ 78,400	МПа	выполнено	τ ≤ 0,6·[σ] (литая крышка)

№	Проверка	Значение	Условие	Ед.	Вывод	Ссылка
	винта М56×2: срез витков (F2)					

3. Расчёт на прочность деталей под давлением (ГОСТ 34233.1/.2/.3-2017, ГОСТ Р 54522-2011)

Скрипт: `calc/strength_calc.py` на модуле `calc/gost34233_shells.py` (формулы сверены по сканам, тесты `calc/tests/test_gost34233_shells.py`). Результаты: `out/calc/strength.json`.

Расчётные условия. Расчётная температура 100 °C (D-04). Давления: входная полость p = 25,0 МПа (PN 250), выходная полость p = 10,0 МПа — накопленное давление при срабатывании (D-09, разд. 2.3). Гидроиспытания: вход 35,0 МПа (ГОСТ 356-80 табл. 10), выход 15,0 МПа (1,5·p_вых, D-09). Прибавки: отливки c = 1,0 мм, детали из проката/поковок c = 0,5 мм (D-14). Отливки 12Х18Н9ТЛ — с индивидуальным неразрушающим контролем каждой отливки: η = 0,8 (ГОСТ 34233.1 п. 8.3; D-06).

3.1. Допускаемые напряжения

Материал, условия	[σ], МПа	Формула / источник
12Х18Н9ТЛ (отливка, η = 0,8), 100 °C	104,5	[σ] = η·min(Rp0.2/t / n_т; Rm/t / n_в) = 0.8·min(196/1.5; 412/3.0) = 0.8·min(130.7; 137.3)
12Х18Н9ТЛ — гидроиспытание, 20 °C	142,5	ГОСТ 34233.1 ф. (6), (2)
12Х18Н10Т (поковка/прокат), 100 °C	144,4	[σ] = 174 (табл. А.3) × 0.83
12Х18Н10Т — гидроиспытание, 20 °C	209,1	ГОСТ 34233.1 ф. (6), (2)

3.2. Проверка элементов

№	Элемент	Вариант	Метод	Ключевые величины	Вывод
1	Корпус — входная шейка Ø30/Ø80	РУ	Р 54522 п. 5.1 (фактическая (s−c)/D = 0.80; в расчёт принята s = 13.0 мм — предел 0,4·D + c, D-15)	S_R=4,05, [p]=61,44	выполнено
2	Корпус — входная шейка Ø30/Ø80	ГИ вход	Р 54522 п. 5.1 (фактическая (s−c)/D = 0.80; в расчёт принята s = 13.0 мм — предел 0,4·D + c, D-15)	S_R=4,17, [p]=83,79	выполнено
3	Корпус — зона резьбы сопла М45×2 (Z = 62)	РУ	Р 54522 п. 5.1	S_R=6,08, [p]=61,44	выполнено
4	Корпус — зона резьбы сопла М45×2 (Z = 62)	ГИ вход	Р 54522 п. 5.1	S_R=6,26, [p]=83,79	выполнено
5	Корпус — полость Ø84, стенка 18	РУ	34233.2 п. 5.3.1	s_p=4,22, [p]=35,19	выполнено
6	Корпус — отверстие выходного патрубка Ø40 в полости	РУ	34233.3 п. 5.3 (укрепление штуцером-патрубком)	[p]=32,61, s1p=2,11, s_p=4,22	выполнено
7	Корпус — выходной патрубок Ø40/Ø68	РУ	Р 54522 п. 5.1 ((s−c)/D = 0.33 > 0,3 — вне п. 5.2.1 ГОСТ 34233.2)	S_R=2,01, [p]=52,35	выполнено
8	Корпус — полость Ø84, стенка 18	ГИ выход	34233.2 п. 5.3.1	s_p=4,67, [p]=47,99	выполнено

№	Элемент	Вариант	Метод	Ключевые величины	Вывод
9	Корпус — отверстие выходного патрубка Ø40 в полости	ГИ выход	34233.3 п. 5.3 (укрепление штуцером-патрубком)	[p]=44,47, s1p=2,33, s_p=4,67	выполнено
10	Корпус — выходной патрубок Ø40/Ø68	ГИ выход	Р 54522 п. 5.1 ((s−c)/D = 0.33 > 0,3 — вне п. 5.2.1 ГОСТ 34233.2)	S_R=2,22, [p]=71,38	выполнено
11	Сопло — носик Ø24/Ø32	РУ	Р 54522 п. 5.1	S_R=2,27, [p]=36,96	выполнено
12	Сопло — шейка под резьбу М38×1,5 (по d1)	РУ	Р 54522 п. 5.1	S_R=2,27, [p]=56,03	выполнено
13	Сопло — носик Ø24/Ø32	ГИ вход	Р 54522 п. 5.1	S_R=2,19, [p]=53,51	выполнено
14	Сопло — шейка под резьбу М38×1,5 (по d1)	ГИ вход	Р 54522 п. 5.1	S_R=2,19, [p]=81,12	выполнено
15	Золотник Ø32 × 12 (давление на круге Dm = 25)	РУ	34233.2 разд. 7, K = 0,41	s1p=4,44, [p]=96,39	выполнено
16	Золотник Ø32 × 12 (давление на круге Dm = 25)	ГИ вход	34233.2 разд. 7, K = 0,41	s1p=4,36, [p]=139,56	выполнено
17	Крышка — обечайка Ø108, стенка 11	РУ	34233.2 п. 5.3.1	s_p=5,43, [p]=17,72	выполнено
18	Крышка — верхняя стенка s1 = 22 (тип 9, K = 0.365; K0 = 1.344)	РУ	34233.2 разд. 7, табл. 4 тип 9, ф. (72)–(75)	s1p=16,77, [p]=15,64	выполнено
19	Крышка — обечайка Ø108, стенка 11	ГИ выход	34233.2 п. 5.3.1	s_p=6,00, [p]=24,16	выполнено
20	Крышка — верхняя стенка s1 = 22 (тип 9, K = 0.365; K0 = 1.344)	ГИ выход	34233.2 разд. 7, табл. 4 тип 9, ф. (72)–(75)	s1p=16,24, [p]=21,32	выполнено
21	Колпак — обечайка Ø100, стенка 8	РУ	34233.2 п. 5.3.1	s_p=3,59, [p]=20,15	выполнено
22	Колпак — днище s1 = 12 (тип 9, K = 0.350)	РУ	34233.2 разд. 7, тип 9	s1p=8,66, [p]=17,33	выполнено
23	Колпак — обечайка Ø100, стенка 8	ГИ выход	34233.2 п. 5.3.1	s_p=3,72, [p]=29,18	выполнено
24	Колпак — днище s1 = 12 (тип 9, K = 0.350)	ГИ выход	34233.2 разд. 7, тип 9	s1p=8,81, [p]=25,09	выполнено

3.3. Подробные проверки

1. Корпус — входная шейка Ø30/Ø80 — РУ. - Толщина: S ≥ S_R + c: 13,00 ≥ 5,05 мм — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (5)–(7), p009) - Давление: p ≤ [p]: 25,00 ≤ 61,44 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (8), (9), p009) - Применимость: (S−c)/D ≤ 0.4: 0,40 ≤ 0,40 — — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (4), p009) - Область применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа): 25,00 ≥ 10,00 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 разд. 1, p004) - *примечание модуля:* NOTE: ГОСТ Р 54522-2011 — «Действует», изменений не найдено (protect.gost.ru, поиск 2026-11-23; src/gost34233_1-3/status/protect.gost.ru_gost_search_54522_2026-11-23.htm)

2. Корпус — входная шейка Ø30/Ø80 — ГИ вход. - Толщина: S ≥ S_R + c: 13,00 ≥ 5,17 мм — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (5)–(7), p009) - Давление: p ≤ [p]: 35,00 ≤ 83,79 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (8), (9), p009) - Применимость: (S−c)/D ≤ 0.4: 0,40 ≤ 0,40 — — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (4), p009) - Область

применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа): 35,00 ≥ 10,00 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 разд. 1, p004) - *примечание модуля:* NOTE: ГОСТ Р 54522-2011 — «Действует», изменений не найдено (protect.gost.ru, поиск 2026-11-23; src/gost34233_1-3/status/protect.gost.ru_gost_search_54522_2026-11-23.htm)

3. Корпус — зона резьбы сопла M45×2 (Z = 62) — РУ. стенка по наименьшему сечению 21.1 мм; в расчёт принято не более 0,4·D + c - Толщина: S ≥ S_R + c: 19,00 ≥ 7,08 мм — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (5)–(7), p009) - Давление: p ≤ [p]: 25,00 ≤ 61,44 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (8), (9), p009) - Применимость: (S−c)/D ≤ 0.4: 0,40 ≤ 0,40 — — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (4), p009) - Область применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа): 25,00 ≥ 10,00 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 разд. 1, p004) - *примечание модуля:* NOTE: ГОСТ Р 54522-2011 — «Действует», изменений не найдено (protect.gost.ru, поиск 2026-11-23; src/gost34233_1-3/status/protect.gost.ru_gost_search_54522_2026-11-23.htm)

4. Корпус — зона резьбы сопла M45×2 (Z = 62) — ГИ вход. стенка по наименьшему сечению 21.1 мм; в расчёт принято не более 0,4·D + c - Толщина: S ≥ S_R + c: 19,00 ≥ 7,26 мм — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (5)–(7), p009) - Давление: p ≤ [p]: 35,00 ≤ 83,79 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (8), (9), p009) - Применимость: (S−c)/D ≤ 0.4: 0,40 ≤ 0,40 — — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (4), p009) - Область применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа): 35,00 ≥ 10,00 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 разд. 1, p004) - *примечание модуля:* NOTE: ГОСТ Р 54522-2011 — «Действует», изменений не найдено (protect.gost.ru, поиск 2026-11-23; src/gost34233_1-3/status/protect.gost.ru_gost_search_54522_2026-11-23.htm)

5. Корпус — полость Ø84, стенка 18 — РУ. - Толщина: s ≥ s_p + c: 18,00 ≥ 5,22 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (1), (2), p012) - Давление: p ≤ [p]: 10,00 ≤ 35,19 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (3), p012) - Применимость: (s−c)/D: 0,20 ≤ 0,30 — — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 п. 5.2.1: (s−c)/D ≤ 0.3 (трубы, D < 200 мм), p011) - *примечание модуля:* ASSUMPTION: (s−c)/D > 0.1 — применимость обоснована пределом 0.3 п. 5.2.1 «для труб при D < 200 мм»; распространение на корпус клапана — допущение расчётчика

6. Корпус — отверстие выходного патрубка Ø40 в полости — РУ. - Давление: p ≤ [p] (с отверстием): 10,00 ≤ 32,61 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.3-2017 ф. (31), (32), p017) - Условие укрепления (35): ΣA ≥ 0.5(d_p − d0p)s_p: 801,04 ≥ 56,72 мм² — выполнено (ГОСТ 34233.3-2017 ф. (16), (35), p014, p018) - Табл. 1: (d_p − 2c_s)/D ≤ 1.0: 0,48 ≤ 1,00 — — выполнено (ГОСТ 34233.3-2017 табл. 1, p011) - Табл. 1: (s−c)/D ≤ 0.3: 0,20 ≤ 0,30 — — выполнено (ГОСТ 34233.3-2017 табл. 1, p011) - *примечание модуля:* ASSUMPTION: сноска 2 к табл. 1 — (s−c)/D ≤ 0.3 для труб D < 200 мм применена к корпусу

7. Корпус — выходной патрубок Ø40/Ø68 — РУ. - Толщина: S ≥ S_R + c: 14,00 ≥ 3,01 мм — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (5)–(7), p009) - Давление: p ≤ [p]: 10,00 ≤ 52,35 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (8), (9), p009) - Применимость: (S−c)/D ≤ 0.4: 0,33 ≤ 0,40 — — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (4), p009) - Область применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа): 10,00 ≥ 10,00 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 разд. 1, p004) - *примечание модуля:* NOTE: ГОСТ Р 54522-2011 — «Действует», изменений не найдено (protect.gost.ru, поиск 2026-11-23; src/gost34233_1-3/status/protect.gost.ru_gost_search_54522_2026-11-23.htm) - *примечание модуля:* INFO: Область применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа) = 10.0 — вне формальной области действия; метод применён как более строгий для толстостенного элемента (ГОСТ 34233.2 неприменим по (s−c)/D), см. D-15

8. Корпус — полость Ø84, стенка 18 — ГИ выход. - Толщина: s ≥ s_p + c: 18,00 ≥ 5,67 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (1), (2), p012) - Давление: p ≤ [p]: 15,00 ≤ 47,99 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (3), p012) - Применимость: (s−c)/D: 0,20 ≤ 0,30 — — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 п. 5.2.1: (s−c)/D ≤ 0.3 (трубы, D < 200 мм), p011) - *примечание модуля:* ASSUMPTION: (s−c)/D > 0.1 — применимость обоснована пределом 0.3 п. 5.2.1 «для труб при D < 200 мм»; распространение на корпус клапана — допущение расчётчика

9. Корпус — отверстие выходного патрубка Ø40 в полости — ГИ выход. - Давление: p ≤ [p] (с отверстием): 15,00 ≤ 44,47 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.3-2017 ф. (31), (32), p017) - Условие укрепления (35): ΣA ≥ 0.5(d_p − d0p)s_p: 777,70 ≥ 62,71 мм² — выполнено (ГОСТ 34233.3-2017 ф. (16), (35), p014, p018) - Табл. 1: (d_p − 2c_s)/D ≤ 1.0: 0,48 ≤ 1,00 — — выполнено (ГОСТ 34233.3-2017 табл. 1, p011) - Табл. 1: (s−c)/D ≤ 0.3: 0,20 ≤ 0,30 — — выполнено (ГОСТ 34233.3-2017 табл. 1, p011) - *примечание модуля:* ASSUMPTION: сноска 2 к табл. 1 — (s−c)/D ≤ 0.3 для труб D < 200 мм применена к корпусу

10. Корпус — выходной патрубок Ø40/Ø68 — ГИ выход. - Толщина: S ≥ S_R + c: 14,00 ≥ 3,22 мм — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (5)–(7), p009) - Давление: p ≤ [p]: 15,00 ≤ 71,38 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (8), (9), p009) - Применимость: (S−c)/D ≤ 0.4: 0,33 ≤ 0,40 — — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (4), p009) -

Область применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа): 15,00 ≥ 10,00 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 разд. 1, p004) - *примечание модуля:* NOTE: ГОСТ Р 54522-2011 — «Действует», изменений не найдено (protect.gost.ru, поиск 2026-11-23; src/gost34233_1-3/status/protect.gost.ru_gost_search_54522_2026-11-23.htm)

11. Сопло — носик Ø24/Ø32 — РУ. внешнее давление полости не учитывается (запас) - Толщина: S ≥ S_R + c: 4,00 ≥ 2,77 мм — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (5)–(7), p009) - Давление: p ≤ [p]: 25,00 ≤ 36,96 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (8), (9), p009) - Применимость: (S−c)/D ≤ 0.4: 0,15 ≤ 0,40 — — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (4), p009) - Область применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа): 25,00 ≥ 10,00 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 разд. 1, p004) - *примечание модуля:* NOTE: ГОСТ Р 54522-2011 — «Действует», изменений не найдено (protect.gost.ru, поиск 2026-11-23; src/gost34233_1-3/status/protect.gost.ru_gost_search_54522_2026-11-23.htm)

12. Сопло — шейка под резьбу М38×1,5 (по d1) — РУ. - Толщина: S ≥ S_R + c: 6,19 ≥ 2,77 мм — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (5)–(7), p009) - Давление: p ≤ [p]: 25,00 ≤ 56,03 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (8), (9), p009) - Применимость: (S−c)/D ≤ 0.4: 0,24 ≤ 0,40 — — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (4), p009) - Область применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа): 25,00 ≥ 10,00 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 разд. 1, p004) - *примечание модуля:* NOTE: ГОСТ Р 54522-2011 — «Действует», изменений не найдено (protect.gost.ru, поиск 2026-11-23; src/gost34233_1-3/status/protect.gost.ru_gost_search_54522_2026-11-23.htm)

13. Сопло — носик Ø24/Ø32 — ГИ вход. внешнее давление полости не учитывается (запас) - Толщина: S ≥ S_R + c: 4,00 ≥ 2,69 мм — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (5)–(7), p009) - Давление: p ≤ [p]: 35,00 ≤ 53,51 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (8), (9), p009) - Применимость: (S−c)/D ≤ 0.4: 0,15 ≤ 0,40 — — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (4), p009) - Область применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа): 35,00 ≥ 10,00 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 разд. 1, p004) - *примечание модуля:* NOTE: ГОСТ Р 54522-2011 — «Действует», изменений не найдено (protect.gost.ru, поиск 2026-11-23; src/gost34233_1-3/status/protect.gost.ru_gost_search_54522_2026-11-23.htm)

14. Сопло — шейка под резьбу М38×1,5 (по d1) — ГИ вход. - Толщина: S ≥ S_R + c: 6,19 ≥ 2,69 мм — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (5)–(7), p009) - Давление: p ≤ [p]: 35,00 ≤ 81,12 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (8), (9), p009) - Применимость: (S−c)/D ≤ 0.4: 0,24 ≤ 0,40 — — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 ф. (4), p009) - Область применения: p > 10 МПа (разд. 1: св. 10 до 130 МПа): 35,00 ≥ 10,00 МПа — выполнено (ГОСТ Р 54522-2011 разд. 1, p004) - *примечание модуля:* NOTE: ГОСТ Р 54522-2011 — «Действует», изменений не найдено (protect.gost.ru, поиск 2026-11-23; src/gost34233_1-3/status/protect.gost.ru_gost_search_54522_2026-11-23.htm)

15. Золотник Ø32 × 12 (давление на круге Dm = 25) — РУ. D_p = наружный диаметр пояска (запас); наплавка в толщину не включена - Толщина: s1 ≥ s1p + c: 12,00 ≥ 4,94 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (71), (72), p028) - Давление: p ≤ K_p·[p]: 25,00 ≤ 96,39 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (75), (70), п. 7.1.2, p027, p030) - *примечание модуля:* NOTE: (s1−c)/D_p = 0.442 > 0.11 — [p] умножено на K_p = 0.5735 (п. 7.1.2)

16. Золотник Ø32 × 12 (давление на круге Dm = 25) — ГИ вход. D_p = наружный диаметр пояска (запас); наплавка в толщину не включена - Толщина: s1 ≥ s1p + c: 12,00 ≥ 4,86 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (71), (72), p028) - Давление: p ≤ K_p·[p]: 35,00 ≤ 139,56 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (75), (70), п. 7.1.2, p027, p030) - *примечание модуля:* NOTE: (s1−c)/D_p = 0.442 > 0.11 — [p] умножено на K_p = 0.5735 (п. 7.1.2)

17. Крышка — обечайка Ø108, стенка 11 — РУ. - Толщина: s ≥ s_p + c: 11,00 ≥ 6,43 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (1), (2), p012) - Давление: p ≤ [p]: 10,00 ≤ 17,72 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (3), p012) - Применимость: (s−c)/D: 0,09 ≤ 0,30 — — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 п. 5.2.1: (s−c)/D ≤ 0.3 (трубы, D < 200 мм), p011)

18. Крышка — верхняя стенка s1 = 22 (тип 9, K = 0.365; K0 = 1.344) — РУ. в РУ к давлению добавлено эквивалентное давление от силы пружины F2 = 14134 Н (1.73 МПа) - Толщина: s1 ≥ s1p + c: 22,00 ≥ 17,77 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (71), (72), p028) - Давление: p ≤ K_p·[p]: 11,73 ≤ 15,64 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (75), (70), п. 7.1.2, p027, p030) - *примечание модуля:* NOTE: (s1−c)/D_p = 0.206 > 0.11 — [p] умножено на K_p = 0.8496 (п. 7.1.2)

19. Крышка — обечайка Ø108, стенка 11 — ГИ выход. - Толщина: s ≥ s_p + c: 11,00 ≥ 7,00 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (1), (2), p012) - Давление: p ≤ [p]: 15,00 ≤ 24,16 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф.

(3), p012) - Применимость: (s−c)/D: 0,09 ≤ 0,30 — — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 п. 5.2.1: (s−c)/D ≤ 0.3 (трубы, D < 200 мм), p011)

20. Крышка — верхняя стенка s1 = 22 (тип 9, K = 0.365; K0 = 1.344) — ГИ выход. в РУ к давлению добавлено эквивалентное давление от силы пружины F2 = 14134 Н (1.73 МПа) - Толщина: s1 ≥ s1p + c: 22,00 ≥ 17,24 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (71), (72), p028) - Давление: p ≤ K_p·[p]: 15,00 ≤ 21,32 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (75), (70), п. 7.1.2, p027, p030) - *примечание модуля:* NOTE: (s1−c)/D_p = 0.206 > 0.11 — [p] умножено на K_p = 0.8496 (п. 7.1.2)

21. Колпак — обечайка Ø100, стенка 8 — РУ. - Толщина: s ≥ s_p + c: 8,00 ≥ 4,09 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (1), (2), p012) - Давление: p ≤ [p]: 10,00 ≤ 20,15 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (3), p012) - Применимость: (s−c)/D: 0,07 ≤ 0,30 — — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 п. 5.2.1: (s−c)/D ≤ 0.3 (трубы, D < 200 мм), p011)

22. Колпак — днище s1 = 12 (тип 9, K = 0.350) — РУ. - Толщина: s1 ≥ s1p + c: 12,00 ≥ 9,16 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (71), (72), p028) - Давление: p ≤ K_p·[p]: 10,00 ≤ 17,33 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (75), (70), п. 7.1.2, p027, p030) - *примечание модуля:* NOTE: (s1−c)/D_p = 0.122 > 0.11 — [p] умножено на K_p = 0.9819 (п. 7.1.2)

23. Колпак — обечайка Ø100, стенка 8 — ГИ выход. - Толщина: s ≥ s_p + c: 8,00 ≥ 4,22 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (1), (2), p012) - Давление: p ≤ [p]: 15,00 ≤ 29,18 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (3), p012) - Применимость: (s−c)/D: 0,07 ≤ 0,30 — — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 п. 5.2.1: (s−c)/D ≤ 0.3 (трубы, D < 200 мм), p011)

24. Колпак — днище s1 = 12 (тип 9, K = 0.350) — ГИ выход. - Толщина: s1 ≥ s1p + c: 12,00 ≥ 9,31 мм — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (71), (72), p028) - Давление: p ≤ K_p·[p]: 15,00 ≤ 25,09 МПа — выполнено (ГОСТ 34233.2-2017 ф. (75), (70), п. 7.1.2, p027, p030) - *примечание модуля:* NOTE: (s1−c)/D_p = 0.122 > 0.11 — [p] умножено на K_p = 0.9819 (п. 7.1.2)

3.4. Необходимость расчёта на условия испытаний (ГОСТ 34233.1 п. 8.4)

- п. 8.4: p_исп < 1.35·p·[σ]20/[σ] (иначе нужен расчёт на испытания): 35,00 < 33,75 — расчёт на испытания выполнен выше
- п. 8.4: p_исп < 1.35·p·[σ]20/[σ] (иначе нужен расчёт на испытания): 15,00 < 13,50 — расчёт на испытания выполнен выше

Вывод: все элементы удовлетворяют условиям прочности.

4. Фланцевые соединения (ГОСТ 34233.4-2017)

Скрипт: `calc/flange_calc.py` на модуле `calc/gost34233_4.py` (формулы — со ссылками на пункты и страницы скана; коэффициенты β_F, β_V, f — оцифровка рис. К.2–К.4, проверочный скрипт `calc/tests/digitize_figs_gost34233_4.py`; тесты `calc/tests/test_gost34233_4.py`). Внешние нагрузки — `out/calc/loads.json` (разд. 5). Шпильки — 45Х14Н14В2М, гайки — 12Х18Н10Т; кольцевые прокладки — мягкое железо (D-24); затяжка без контроля момента.

Соединение	Вывод	Минимальный запас	Определяющая проверка	Момент затяжки, Н·м
Входное соединение: 1” Class 1500 RTJ (ASME B16.5), кольцо R-16	выполнено	1.00	Фланец 2: тарелка, max(	σR
Выходное соединение: DN 40 PN 63 исп. J (ГОСТ 33259), прокладка 1-1-40-63 (ГОСТ 34655)	выполнено	1.00	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0мо
Разъём корпус–крышка: 12 × М20, прокладка СНП	выполнено	1.11	Фланец 1: тарелка, max(	σR

Допускаемые изгибающие моменты от трубопровода (D-26). Фланец корпуса проверен на предельный момент присоединяемой трубы (разд. 5); несущую способность соединения ограничивает стандартный ответный фланец трубопровода, поэтому основной расчёт выполнен при допускаемом моменте:

Соединение	M трубы, Н·м	Запас фланца корпуса при M трубы	Допускаемый момент на соединение, Н·м
вход 1” Cl.1500	786	1.40	**553**
выход DN 40	812	1.37	**768**

Входное соединение: 1” Class 1500 RTJ (ASME B16.5), кольцо R-16

Расчёт фланцевого соединения по ГОСТ 34233.4-2017

Итог: **все проверки выполнены**.

1. Исходные данные

Параметр	Значение
Расчётное давление p, МПа	25.000
Расчётная температура t, °C	100.0
Внешняя осевая сила F, Н	1406.3
Внешний изгибающий момент M, Н·мм	5.5304e+05
Пробное давление p_пр, МПа / t, °C	35.000 / 20.000
Затяжка	uncontrolled (K_у.з = 1.0)

Фланец	Ф1 корпус (литой, 1” Cl.1500)	Ф2 ответный WN 1” Cl.1500 (ASME B16.5)
Наименование	Ф1 корпус (литой, 1” Cl.1500)	Ф2 ответный WN 1” Cl.1500 (ASME B16.5)
Тип (расчётная схема)	weld_neck	weld_neck
Материал	12Х18Н9ТЛ (отливка, η = 0,8)	12Х18Н10Т (поковка)
D_н, мм	149.4	149.4
D_б, мм	101.6	101.6
D, мм	30.000	15.220
h, мм	36.000	28.400
S_0, мм	25.000	9.090
S_1, мм	25.000	18.540
l, мм	23.000	38.450
c, мм	0	0
t_ф, °C	100.0	100.0
[σ]^20, МПа	104.5	152.7
[σ] при t_ф, МПа	104.5	144.4
[σ]_и (испытание), МПа	142.5	209.1
E^20, МПа	2.0000e+05	2.0000e+05
E при t_ф, МПа	2.0000e+05	2.0000e+05
α_ф, 1/°C	1.6600e-05	1.6600e-05
Источник [σ]	задано пользователем	задано пользователем

Прокладка	Значение	Ссылка
Тип / материал (табл. И.1)	кольцо овального/восьмигранного сечения, сталь 05кп (ГОСТ 9045) или 08Х13 (ГОСТ 5632)	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
b_п, мм	7.950	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (4); D_сп = средний диаметр [p016]
b_0, мм	1.988	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (4); D_сп = средний диаметр [p016]

Прокладка	Значение	Ссылка
D_сп, мм	50.800	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (4); D_сп = средний диаметр [p016]
h_п, мм	14.200	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (4); D_сп = средний диаметр [p016]
m	5.500	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
q_обж, МПа	125.0	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
[q], МПа	—	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
K_обж	—	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
E_п, МПа	—	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
y_п, мм/Н	0	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, К.1: для металлических и асбометаллических прокладок y_п = 0 [p039]

Крепёж	Значение	Ссылка
Вид, n × d	шпилька, 4 × М22 (шаг 2.822222222222222)	—
Марка шпилек / гаек	45Х14Н14В2М / 12Х18Н10Т	—
f_б, мм²	270.3	задано пользователем
A_б = n·f_б, мм²	1081.2	ГОСТ 34233.4-2017, п. 6.1, ф. (8) [p016]
t_б, °C	100.0	—
[σ]_н^б при 20 °C / при t_б, МПа	160.0 / 150.0	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Г, табл. Г.1 [p030–p031], графа «45Х14Н14В2М»
E_б^20 / E_б, МПа	2.0500e+05 / 2.0200e+05	задано пользователем
α_б, 1/°C	1.7000e-05	задано пользователем
L_б0, мм	45.100	прил. К, К.1
L_б, мм	57.546	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.2) [p039]
y_б, мм/Н	2.5963e-07	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.2) [p039]

2. Параметры фланцев (прил. Е, К)

Величина	Ф1 корпус (литой, 1” Cl.1500)	Ф2 ответный WN 1” Cl.1500 (ASME B16.5)	Ссылка
K	4.9800	9.8160	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_T	0.8750	0.5492	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_U	1.3324	0.7982	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_Y	1.2175	0.7286	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_Z	1.0840	1.0210	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
l_0	27.3861	11.7622	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β	1.0000	2.0396	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К: для прямой втулки, плоских и свободных фланцев β_F = 0,91; β_V = 0,55; f = 1 [p042]; ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
x	0.8398	3.2689	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К: для прямой втулки, плоских и свободных фланцев β_F = 0,91;

Величина	Ф1 корпус (литой, 1” Cl.1500)	Ф2 ответный WN 1” Cl.1500 (ASME B16.5)	Ссылка
			β_V = 0,55; f = 1 [p042]; ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
β_F	0.9100	0.6790	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К: для прямой втулки, плоских и свободных фланцев β_F = 0,91; β_V = 0,55; f = 1 [p042]; ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
β_V	0.5500	0.1193	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К: для прямой втулки, плоских и свободных фланцев β_F = 0,91; β_V = 0,55; f = 1 [p042]; ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
f	1.0000	1.0000	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К: для прямой втулки, плоских и свободных фланцев β_F = 0,91; β_V = 0,55; f = 1 [p042]; ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
λ	3.6352	8.3283	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.11), (К.12) [p042]
y_ф	4.0220e-11	6.7059e-11	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.11), (К.12) [p042]
y_ф.н	3.5308e-11	7.1916e-11	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.15) [p042]
C_F	1.0000	1.0466	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.18) [p042]
D*	55.0000	33.7600	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.19) [p042]
ζ	—	1.8435	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.5), (Е.6) [p033]; ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.7) [p033]
S_э	25.0000	16.7576	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.5), (Е.6) [p033]; ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.7) [p033]
e	-2.1000	9.4112	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.5), (Е.6) [p033]; ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.7) [p033]
b	25.4000	25.4000	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.1) [p033]
K_S	1.2000	1.2000	ГОСТ 34233.4-2017, п. 8.5.1 (в издании условия напечатаны по «K_S»; по смыслу — по K) [p021]
[Θ]	0.0060	0.0060	п. 9.1 [p022]

Соединение	Значение	Ссылка
γ, Н/мм	3.0057e+06	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Е, ф. (Е.8) [p033–p034]
α	1.0000	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Е: для овальных/восьмигранных прокладок и свободных фланцев α = 1 [p034]
α_м	1.0366	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Е, ф. (Е.13) [p034]
Q_t (справочно), Н	-6194.2	ГОСТ 34233.4-2017, п. 6.4, ф. (11) [p017]

Соединение	Значение	Ссылка
Учёт Q_t в расчёте	нет	п. 4.7, 4.8 [p015]

3. Усилия по режимам (разд. 5—7)

Величина	работа	работа, только давление (п. 4.4)	испытание	Ссылка
p, МПа	25.000	25.000	35.000	
Q_д, Н	50645.1	50645.1	70903.1	ф. (9) [p017]
R_п, Н	43613.7	43613.7	61059.2	ф. (7) [p016]
P_обж, Н	19824.4	19824.4	19824.4	ф. (6) [p016]
Q_t, Н	0	0	0	ф. (11) [p017]
P_б1, Н	1.4081e+05	94258.8	1.3196e+05	ф. (16) [p017]
P_б2, Н	69196.8	69196.8	69196.8	ф. (17) [p017]
P_б^м режима, Н	1.4081e+05	94258.8	1.3196e+05	ф. (15) [p017]
P_б^м принятое, Н	1.4081e+05	1.4081e+05	1.4081e+05	ф. (15)
P_б^р, Н	1.3921e+05	1.4081e+05	1.4081e+05	ф. (18) [p018]
σ_б1, МПа	130.2	130.2	130.2	ф. (19) [p018]
σ_б2, МПа	128.8	130.2	130.2	ф. (20) [p018]
[σ]_м^б, МПа	192.0	192.0	259.2	ф. (Г.3) [p029]
[σ]_р^б, МПа	150.0	150.0	216.0	ф. (Г.4) [p029]
q, МПа	111.0	111.0	111.0	ф. (23) [p018]

4. Моменты и напряжения во фланцах (разд. 8, 9)

Величина	работа, ф.1	работа, ф.2	работа, только давление (п. 4.4), ф.1	работа, только давление (п. 4.4), ф.2	испытание, ф.1	испытание, ф.2	Ссылка
M^м	3.5765e+06	3.7431e+06	3.5765e+06	3.7431e+06	3.5765e+06	3.7431e+06	ф. (24)
M^р	3.5181e+06	4.6423e+06	3.4701e+06	4.2420e+06	3.4276e+06	4.4415e+06	ф. (26)
σ_1^м	28.621	38.731	28.621	38.731	28.621	38.731	ф. (28)/(30)
σ_0^м	28.621	38.731	28.621	38.731	28.621	38.731	ф. (29)/(30)
σ_R^м	65.565	116.4	65.565	116.4	65.565	116.4	ф. (31)
σ_T^м	40.923	103.3	40.923	103.3	40.923	103.3	ф. (32)
σ_1^р	28.154	48.035	27.770	43.893	27.430	45.957	ф. (34)/(36)
σ_0^р	28.154	48.035	27.770	43.893	27.430	45.957	ф. (35)/(36)
σ_1мм^р	13.725	36.351	4.089	2.312	5.724	3.237	ф. (37)
σ_0мм^р	13.725	139.7	4.089	6.548	5.724	9.168	ф. (38)
σ_0мо^р	15.000	20.930	15.000	20.930	21.000	29.301	ф. (39)
σ_R^р	64.495	144.4	63.615	132.0	62.835	138.2	ф. (40)
σ_T^р	40.255	128.1	39.706	117.0	39.219	122.5	ф. (41)
Θ	1.4150e-04	3.1131e-04	1.3957e-04	2.8446e-04	1.3786e-04	2.9784e-04	ф. (58)
[σ]	104.5	144.4	104.5	144.4	142.5	209.1	ГОСТ 34233.1
[σ]_M	156.8	216.6	156.8	216.6	213.8	313.6	ГОСТ 34233.1 п. 8.10
[σ]_R	313.6	433.3	313.6	433.3	427.6	627.3	ГОСТ 34233.1 п. 8.10

5. Проверки

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
1	затяжка	болты	Болты (шпильки) при затяжке:	130.2	192.0	МПа	1.47	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, ф. (19),

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
			σ_б1 ≤ [σ]_м^б						(21); (Г.3) [p018, p029]
2	работа	болты	Болты (шпильки) в рабочих условиях: σ_б2 ≤ [σ]_р^б	128.8	150.0	МПа	1.16	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, ф. (20), (22); (Г.4) [p018, p029]
3	затяжка	фланец 1	Фланец 1: сечение S0 при затяжке, max(	σ0+σR	;	σ0+σT	) ≤ K_S·K_T·[σ]_0	94.1862	188.2
4	затяжка	фланец 1	Фланец 1: тарелка при затяжке, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	65.5648	104.5
5	работа	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0−σ0мм+σR	;	σ0−σ0мм+σT	;	σ0+σ0мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_(
6	работа	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	15.0000	104.5
7	работа	фланец 1	Фланец 1: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	64.4946	104.5
8	работа	фланец 1	Фланец 1: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	1.4150e-04	0.0060	рад	42.40	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
9	затяжка	фланец 2	Фланец 2: сечение S1 при затяжке, max(	σ1+σR	;	σ1+σT	) ≤ K_S·K_T·[σ]_M^20	155.2	274.9
10	затяжка	фланец 2	Фланец 2: сечение S0 при затяжке, σ0 ≤ 1,3·[σ]_R^20	38.7309	595.6	МПа	15.38	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 8.5.2, ф. (45) [p021]; ГОСТ 34233.1- 2017, п. 8.10, ф (12): [σ]_M = 1,5[σ], [σ]_R = 3[σ] [G1 p018]
11	затяжка	фланец 2	Фланец 2: тарелка при затяжке, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	116.4	144.4
12	работа	фланец 2	Фланец 2: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
13	работа	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
14	работа	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	139.7	144.4
15	работа	фланец 2	Фланец 2: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	144.4	144.4
16	работа	фланец 2	Фланец 2: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	3.1131e-04	0.0060	рад	19.27	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
17	работа, только	болты	Болты (шпильки) в	130.2	150.0	МПа	1.15	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, ф. (20),

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
	давление (п. 4.4)		рабочих условиях: σ_б2 ≤ [σ]_р^б						(22); (Г.4) [p018, p029]
18	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0−σ0мм+σR	;	σ0−σ0мм+σT	;	σ0+σ0мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_(
19	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	15.0000	104.5
20	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	63.6151	104.5
21	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	1.3957e-04	0.0060	рад	42.99	OK	ГОСТ 34233.4 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
22	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
23	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
24	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	20.9296	144.4
25	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	132.0	144.4
26	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	2.8446e-04	0.0060	рад	21.09	OK	ГОСТ 34233.4 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
27	испытание	болты	Болты (шпильки) при испытании: σ_б2 ≤ [σ]_р^б	130.2	216.0	МПа	1.66	OK	ГОСТ 34233.4 2017, ф. (20), (22); (Г.4) [p018, p029]
28	испытание	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0−σ0мм+σR	;	σ0−σ0мм+σT	;	σ0+σ0мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_(
29	испытание	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	21.0000	142.5
30	испытание	фланец 1	Фланец 1: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	62.8352	142.5
31	испытание	фланец 1	Фланец 1: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	1.3786e-04	0.0078	рад	56.58	OK	ГОСТ 34233.4 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
32	испытание	фланец 2	Фланец 2: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
33	испытание	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
34	испытание	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	29.3014	209.1
35	испытание	фланец 2	Фланец 2: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	138.2	209.1
36	испытание	фланец 2	Фланец 2: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	2.9784e-04	0.0078	рад	26.19	ОК	ГОСТ 34233.4-2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]

6. Крутящий момент затяжки (прил. Л, справочное)

- P_б^м = 1.4081e+05 Н; σ_б1 = 130.2 МПа.
- M_кр = 186.8 Н·м на одну шпильку (рис. Л.1 (оцифровка, UNVERIFIED); ГОСТ 34233.4-2017, прил. Л, рис. Л.1 [p044]).

7. Необходимость расчёта на испытание (ГОСТ 34233.1, п. 8.4)

- Фланец 1: p·1,35·[σ]^20/[σ] = 33.750 МПа; p_пр = 35.000 МПа -> расчёт нужен.
- Фланец 2: p·1,35·[σ]^20/[σ] = 35.690 МПа; p_пр = 35.000 МПа -> расчёт не требуется.

8. Предупреждения, допущения, непроверенные места

Предупреждения (условия применимости и пр.):

- WARNING: фланец 2: K = D_н/D = 9.816 вне рис. К.1 (1,02…5,0), п. 4.2.2
- фланец 2: WARNING: x = l/l0 = 3.269 > 2.00 — вне графика (п. 4.2.2); принято по граничной кривой 2.00 (UNVERIFIED)

UNVERIFIED:

- UNVERIFIED: фланец 2: β_F = 0.6790, β_V = 0.1193, f = 1.000 — оцифровка графиков рис. К.2—К.4 (формул в стандарте нет)
- UNVERIFIED: α_м — (Е.13)/(Е.14) записаны для пары одинаковых фланцев (множитель 2); для разных принято 2·y_ф.н·b·(b+e−e²/D_сп) -> Σ_i y_ф.н,i·b·(b+e_i−e_i²/D_сп), 2·y_ф.н·b² -> Σ y_ф.н,i·b² (точно совпадает для одинаковых фланцев)
- UNVERIFIED: M_кр по рис. Л.1 — оцифровка графика; ось подписана «мН·м» [ТАК В ИЗДАНИИ], принято Н·м

Допущения и толкования:

- ASSUMPTION: температуры фланцев и болтов приняты равными расчётной температуре среды t = 100 °C (п. 4.6; консервативно для допускаемых напряжений)
- NOTE: max t элементов = 100 °C ≤ 120 °C — расчёт с учётом Q_t допускается не проводить (п. 4.7) [p015]
- ASSUMPTION: единая затяжка: P_б^м = max по всем режимам (п. 4.5 — прочность и герметичность при всех режимах; прил. Л — «учитывать все возможные режимы»)
- ASSUMPTION: условия статической прочности при затяжке (43), (45), (47) — с [σ]_M, [σ]_R по [σ]^20 (по аналогии с (51), (56), где для затяжки стоит [σ]^20); (54) — с [σ] при расчётной температуре, как напечатано
- ASSUMPTION: при испытании [σ]_M = 1,5·[σ]_и, [σ]_R = 3·[σ]_и (ф. (12) ГОСТ 34233.1 с [σ] = [σ]_и), K_у.р = 1,35 (прил. Г), K_Θ = 1,3 (п. 9.1), [σ]_н^б при 20 °C, E = E^20

- NOTE: знак «±» в (10), (37), (38) — рассмотрены оба, принят наихудший
- фланец 2: NOTE: x = l/l0 = 3.269 > 1,30 (рис. К.4); f принят по кривой 1,30 (f убывает с ростом l/l0 — консервативно)

Выходное соединение: DN 40 PN 63 исп. J (ГОСТ 33259), прокладка 1-1-40-63 (ГОСТ 34655)

Расчёт фланцевого соединения по ГОСТ 34233.4-2017

Итог: **все проверки выполнены**.

1. Исходные данные

Параметр	Значение
Расчётное давление p, МПа	10.000
Расчётная температура t, °C	100.0
Внешняя осевая сила F, Н	0
Внешний изгибающий момент M, Н·мм	7.6758e+05
Пробное давление p_пр, МПа / t, °C	15.000 / 20.000
Затяжка	uncontrolled (K_у.з = 1.0)

Фланец	Ф1 корпус (тип 21, литой, b = 32)	Ф2 ответный (тип 11, PN 160, ряд 1)
Наименование	Ф1 корпус (тип 21, литой, b = 32)	Ф2 ответный (тип 11, PN 160, ряд 1)
Тип (расчётная схема)	weld_neck	weld_neck
Материал	12Х18Н9ТЛ (отливка, η = 0,8)	12Х18Н10Т (поковка)
D_н, мм	165.0	165.0
D_б, мм	125.0	125.0
D, мм	40.000	37.000
h, мм	32.000	28.000
S_0, мм	14.000	4.500
S_1, мм	20.000	19.500
l, мм	30.000	37.000
c, мм	0	0
t_ф, °C	100.0	100.0
[σ]^20, МПа	104.5	152.7
[σ] при t_ф, МПа	104.5	144.4
[σ]_и (испытание), МПа	142.5	209.1
E^20, МПа	2.0000e+05	2.0000e+05
E при t_ф, МПа	2.0000e+05	2.0000e+05
α_ф, 1/°C	1.6600e-05	1.6600e-05
Источник [σ]	задано пользователем	задано пользователем

Прокладка	Значение	Ссылка
Тип / материал (табл. И.1)	кольцо овального/восьмигранного сечения, сталь 05кп (ГОСТ 9045) или 08Х13 (ГОСТ 5632)	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
b_п, мм	8.000	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (4); D_сп = средний диаметр [p016]
b_0, мм	2.000	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (4); D_сп = средний диаметр [p016]
D_сп, мм	75.000	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (4); D_сп = средний диаметр [p016]
h_п, мм	14.000	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (4); D_сп = средний диаметр [p016]
m	5.500	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]

Прокладка	Значение	Ссылка
q_обж, МПа	125.0	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
[q], МПа	—	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
K_обж	—	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
E_п, МПа	—	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
y_п, мм/Н	0	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, К.1: для металлических и асбометаллических прокладок y_п = 0 [p039]

Крепёж	Значение	Ссылка
Вид, n × d	шпилька, 4 × М20 (шаг 2.5)	—
Марка шпилек / гаек	45Х14Н14В2М / 12Х18Н10Т	—
f_б, мм²	225.0	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Д, табл. Д.1 (без проточки) [p032]
A_б = n·f_б, мм²	900.0	ГОСТ 34233.4-2017, п. 6.1, ф. (8) [p016]
t_б, °C	100.0	—
[σ]_н^б при 20 °C / при t_б, МПа	160.0 / 150.0	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Г, табл. Г.1 [p030–p031], графа «45Х14Н14В2М»
E_б^20 / E_б, МПа	2.0500e+05 / 2.0200e+05	задано пользователем
α_б, 1/°C	1.7000e-05	задано пользователем
L_б0, мм	71.272 (оценка: 35.00 + 31.00 + 5.27; зазор — посадка овального кольца в канавку: центр скругления R4 на глубине 0.364 мм, зазор = h − 2(z_c + R))	прил. К, К.1
L_б, мм	82.472	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.2) [p039]
y_б, мм/Н	4.4700e-07	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.2) [p039]

2. Параметры фланцев (прил. Е, К)

Величина	Ф1 корпус (тип 21, литой, b = 32)	Ф2 ответный (тип 11, PN 160, ряд 1)	Ссылка
K	4.1250	4.4595	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_T	0.9892	0.9406	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_U	1.5507	1.4549	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_Y	1.4176	1.3298	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_Z	1.1249	1.1059	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
l_0	23.6643	12.9035	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β	1.4286	4.3333	ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
x	1.2677	2.8674	ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
β_F	0.8035	0.5239	ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
β_V	0.2732	0.0241	ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]

Величина	Ф1 корпус (тип 21, литой, b = 32)	Ф2 ответный (тип 11, PN 160, ряд 1)	Ссылка
f	1.0000	1.0000	ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
λ	3.3538	3.6620	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.11), (К.12) [p042]
y_ф	7.9898e-11	1.1448e-10	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.11), (К.12) [p042]
y_ф.н	5.6004e-11	8.3597e-11	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.15) [p042]
C_F	1.1677	1.2016	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.18) [p042]
D*	60.0000	56.5000	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.19) [p042]
ζ	1.2898	3.2753	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.5), (Е.6) [p033]
S_э	18.0570	14.7390	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.5), (Е.6) [p033]
e	8.4715	11.6305	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.5), (Е.6) [p033]
b	25.0000	25.0000	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.1) [p033]
K_S	1.2000	1.2000	ГОСТ 34233.4-2017, п. 8.5.1 (в издании условия напечатаны по «K_S»; по смыслу — по K) [p021]
[Θ]	0.0060	0.0060	п. 9.1 [p022]

Соединение	Значение	Ссылка
γ, Н/мм	1.7387e+06	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Е, ф. (Е.8) [p033–p034]
α	1.0000	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Е: для овальных/восьмигранных прокладок и свободных фланцев α = 1 [p034]
α_м	1.0581	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Е, ф. (Е.13) [p034]
Q_t (справочно), Н	-3338.4	ГОСТ 34233.4-2017, п. 6.4, ф. (11) [p017]
Учёт Q_t в расчёте	нет	п. 4.7, 4.8 [p015]

3. Усилия по режимам (разд. 5—7)

Величина	работа	работа, только давление (п. 4.4)	испытание	Ссылка
p, МПа	10.000	10.000	15.000	
Q_д, Н	44156.2	44156.2	66234.4	ф. (9) [p017]
R_п, Н	25918.1	25918.1	38877.2	ф. (7) [p016]
P_обж, Н	29452.4	29452.4	29452.4	ф. (6) [p016]
Q_t, Н	0	0	0	ф. (11) [p017]
P_б1, Н	1.1339e+05	70074.4	1.0511e+05	ф. (16) [p017]
P_б2, Н	57600.0	57600.0	57600.0	ф. (17) [p017]
P_б^м режима, Н	1.1339e+05	70074.4	1.0511e+05	ф. (15) [p017]
P_б^м принятое, Н	1.1339e+05	1.1339e+05	1.1339e+05	ф. (15)
P_б^р, Н	1.1101e+05	1.1339e+05	1.1339e+05	ф. (18) [p018]
σ_б1, МПа	126.0	126.0	126.0	ф. (19) [p018]
σ_б2, МПа	123.3	126.0	126.0	ф. (20) [p018]
[σ]_м^б, МПа	192.0	192.0	259.2	ф. (Г.3) [p029]
[σ]_р^б, МПа	150.0	150.0	216.0	ф. (Г.4) [p029]

Величина	работа	работа, только давление (п. 4.4)	испытание	Ссылка
q, МПа	60.156	60.156	60.156	ф. (23) [p018]

4. Моменты и напряжения во фланцах (разд. 8, 9)

Величина	работа, ф.1	работа, ф.2	работа, только давление (п. 4.4), ф.1	работа, только давление (п. 4.4), ф.2	испытание, ф.1	испытание, ф.2	Ссылка
M^м	3.3102e+06	3.4062e+06	3.3102e+06	3.4062e+06	3.3102e+06	3.4062e+06	ф. (24)
M^р	4.0825e+06	4.5239e+06	3.7470e+06	4.0232e+06	3.9654e+06	4.3318e+06	ф. (26)
σ_1^м	41.125	43.294	41.125	43.294	41.125	43.294	ф. (28)/(30)
σ_0^м	41.125	43.294	41.125	43.294	41.125	43.294	ф. (29)/(30)
σ_R^м	58.917	80.551	58.917	80.551	58.917	80.551	ф. (31)
σ_T^м	48.290	67.072	48.290	67.072	48.290	67.072	ф. (32)
σ_1^р	50.719	57.501	46.551	51.138	49.265	55.059	ф. (34)/(36)
σ_0^р	50.719	57.501	46.551	51.138	49.265	55.059	ф. (35)/(36)
σ_1мм^р	16.905	18.805	3.332	3.105	4.997	4.657	ф. (37)
σ_0мм^р	29.228	144.4	5.288	18.317	7.932	27.476	ф. (38)
σ_0мо^р	14.286	41.111	14.286	41.111	21.429	61.667	ф. (39)
σ_R^р	72.663	107.0	66.692	95.144	70.579	102.4	ф. (40)
σ_T^р	59.556	89.080	54.662	79.222	57.848	85.298	ф. (41)
Θ	3.2618e-04	5.1791e-04	2.9938e-04	4.6060e-04	3.1683e-04	4.9592e-04	ф. (58)
[σ]	104.5	144.4	104.5	144.4	142.5	209.1	ГОСТ 34233.1
[σ]_M	156.8	216.6	156.8	216.6	213.8	313.6	ГОСТ 34233.1 п. 8.10
[σ]_R	313.6	433.3	313.6	433.3	427.6	627.3	ГОСТ 34233.1 п. 8.10

5. Проверки

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
1	затяжка	болты	Болты (шпильки) при затяжке: σ_б1 ≤ [σ]_м^б	126.0	192.0	МПа	1.52	ОК	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (19), (21); (Г.3) [p018, p029]
2	работа	болты	Болты (шпильки) в рабочих условиях: σ_б2 ≤ [σ]_р^б	123.3	150.0	МПа	1.22	ОК	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (20), (22); (Г.4) [p018, p029]
3	затяжка	фланец 1	Фланец 1: сечение S1 при затяжке, max(	σ1+σR	;	σ1+σT	) ≤ K_S·K_T·[σ]_M^20	100.0	188.2
4	затяжка	фланец 1	Фланец 1: сечение S0 при затяжке, σ0 ≤ 1,3·[σ]_R^20	41.1248	407.7	МПа	9.91	ОК	ГОСТ 34233.4-2017, п. 8.5.2, ф. (45) [p021]; ГОСТ 34233.1-2017, п. 8.10, ф (12): [σ]_M = 1,5[σ], [σ]_R = 3[σ] [G1 p018]

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
5	затяжка	фланец 1	Фланец 1: тарелка при затяжке, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	58.9175	104.5
6	работа	фланец 1	Фланец 1: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
7	работа	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
8	работа	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	29.2279	104.5
9	работа	фланец 1	Фланец 1: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	72.6632	104.5
10	работа	фланец 1	Фланец 1: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	3.2618e-04	0.0060	рад	18.39	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
11	затяжка	фланец 2	Фланец 2: сечение S1 при затяжке, max(	σ1+σR	;	σ1+σT	) ≤ K_S·K_T·[σ]_M^20	123.8	274.9
12	затяжка	фланец 2	Фланец 2: сечение S0 при затяжке, σ0 ≤ 1,3·[σ]_R^20	43.2944	595.6	МПа	13.76	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 8.5.2, ф. (45) [p021]; ГОСТ 34233.1- 2017, п. 8.10, ф (12): [σ]_M = 1,5[σ], [σ]_R = 3[σ] [G1 p018]
13	затяжка	фланец 2	Фланец 2: тарелка при затяжке, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	80.5512	144.4
14	работа	фланец 2	Фланец 2: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
15	работа	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
16	работа	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	144.4	144.4
17	работа	фланец 2	Фланец 2: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	107.0	144.4
18	работа	фланец 2	Фланец 2: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	5.1791e-04	0.0060	рад	11.58	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
19	работа, только давление (п. 4.4)	болты	Болты (шпильки) в рабочих условиях: σ_б2 ≤ [σ]_p^б	126.0	150.0	МПа	1.19	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, ф. (20), (22); (Г.4) [p018, p029]
20	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
21	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
22	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	14.2857	104.5
23	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	66.6920	104.5
24	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	2.9938e-04	0.0060	рад	20.04	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
25	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
26	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
27	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	41.1111	144.4
28	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	95.1441	144.4
29	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	4.6060e-04	0.0060	рад	13.03	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
30	испытание	болты	Болты (шпильки) при испытании: σ_б2 ≤ [σ]_p^б	126.0	216.0	МПа	1.71	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, ф. (20), (22); (Г.4) [p018, p029]
31	испытание	фланец 1	Фланец 1: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
32	испытание	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
33	испытание	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	21.4286	142.5
34	испытание	фланец 1	Фланец 1: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	70.5793	142.5
35	испытание	фланец 1	Фланец 1: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	3.1683e-04	0.0078	рад	24.62	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
36	испытание	фланец 2	Фланец 2: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
37	испытание	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
38	испытание	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	61.6667	209.1
39	испытание	фланец 2	Фланец 2: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	102.4	209.1
40	испытание	фланец 2	Фланец 2: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	4.9592e-04	0.0078	рад	15.73	ОК	ГОСТ 34233.4-2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]

6. Крутящий момент затяжки (прил. Л, справочное)

- P_б^м = 1.1339e+05 Н; σ_б1 = 126.0 МПа.
- M_кр = 145.1 Н·м на одну шпильку (рис. Л.1 (оцифровка, UNVERIFIED); ГОСТ 34233.4-2017, прил. Л, рис. Л.1 [p044]).

7. Необходимость расчёта на испытание (ГОСТ 34233.1, п. 8.4)

- Фланец 1: p·1,35·[σ]^20/[σ] = 13.500 МПа; p_пр = 15.000 МПа -> расчёт нужен.
- Фланец 2: p·1,35·[σ]^20/[σ] = 14.276 МПа; p_пр = 15.000 МПа -> расчёт нужен.

8. Предупреждения, допущения, непроверенные места

Предупреждения (условия применимости и пр.):

- фланец 2: WARNING: x = l/l0 = 2.867 > 2.00 — вне графика (п. 4.2.2); принято по граничной кривой 2.00 (UNVERIFIED)

UNVERIFIED:

- UNVERIFIED: фланец 1: β_F = 0.8035, β_V = 0.2732, f = 1.000 — оцифровка графиков рис. К.2—К.4 (формул в стандарте нет)
- UNVERIFIED: фланец 2: β_F = 0.5239, β_V = 0.0241, f = 1.000 — оцифровка графиков рис. К.2—К.4 (формул в стандарте нет)
- UNVERIFIED: α_м — (Е.13)/(Е.14) записаны для пары одинаковых фланцев (множитель 2); для разных принято 2·y_ф.н·b·(b+e−e²/D_сп) -> Σ_i y_ф.н,i·b·(b+e_i−e_i²/D_сп), 2·y_ф.н·b² -> Σ y_ф.н,i·b² (точно совпадает для одинаковых фланцев)
- UNVERIFIED: M_кр по рис. Л.1 — оцифровка графика; ось подписана «мН·м» [ТАК В ИЗДАНИИ], принято Н·м

Допущения и толкования:

- ASSUMPTION: температуры фланцев и болтов приняты равными расчётной температуре среды t = 100 °C (п. 4.6; консервативно для допускаемых напряжений)
- ASSUMPTION: L_б0 не задано — оценка 71.27 мм = Σ(h + h_выст + h_ш) + зазор (посадка овального кольца в канавку: центр скругления R4 на глубине 0.364 мм, зазор = h − 2(z_c + R)); уточнить по чертежу
- NOTE: max t элементов = 100 °C ≤ 120 °C — расчёт с учётом Q_t допускается не проводить (п. 4.7) [p015]
- ASSUMPTION: единая затяжка: P_б^м = max по всем режимам (п. 4.5 — прочность и герметичность при всех режимах; прил. Л — «учитывать все возможные режимы»)
- ASSUMPTION: условия статической прочности при затяжке (43), (45), (47) — с [σ]_M, [σ]_R по [σ]^20 (по аналогии с (51), (56), где для затяжки стоит [σ]^20); (54) — с [σ] при расчётной температуре, как напечатано

- ASSUMPTION: при испытании [σ]_M = 1,5·[σ]_и, [σ]_R = 3·[σ]_и (ф. (12) ГОСТ 34233.1 с [σ] = [σ]_и), K_y.p = 1,35 (прил. Г), K_Θ = 1,3 (п. 9.1), [σ]_н^б при 20 °C, E = E^20
- NOTE: знак «±» в (10), (37), (38) — рассмотрены оба, принят наихудший
- фланец 2: NOTE: x = l/l0 = 2.867 > 1,30 (рис. К.4); f принят по кривой 1,30 (f убывает с ростом l/l0 — консервативно)

Разъём корпус–крышка: 12 × M20, прокладка СНП

Расчёт фланцевого соединения по ГОСТ 34233.4-2017

Итог: **все проверки выполнены**.

1. Исходные данные

Параметр	Значение
Расчётное давление p, МПа	10.000
Расчётная температура t, °C	100.0
Внешняя осевая сила F, Н	782.7
Внешний изгибающий момент M, Н·мм	87896.5
Пробное давление p_пр, МПа / t, °C	15.000 / 20.000
Затяжка	uncontrolled (K_y.з = 1.0)

Фланец	Ф1 корпус (фланец разъёма)	Ф2 крышка (фланец)
Наименование	Ф1 корпус (фланец разъёма)	Ф2 крышка (фланец)
Тип (расчётная схема)	weld_neck	weld_neck
Материал	12Х18Н9ТЛ (отливка, η = 0,8)	12Х18Н9ТЛ (отливка, η = 0,8)
D_н, мм	210.0	210.0
D_б, мм	176.0	176.0
D, мм	84.000	108.0
h, мм	37.000	45.000
S_0, мм	18.000	11.000
S_1, мм	33.000	14.000
l, мм	22.000	30.000
c, мм	0	0
t_ф, °C	100.0	100.0
[σ]^20, МПа	104.5	104.5
[σ] при t_ф, МПа	104.5	104.5
[σ]_и (испытание), МПа	142.5	142.5
E^20, МПа	2.0000e+05	2.0000e+05
E при t_ф, МПа	2.0000e+05	2.0000e+05
α_ф, 1/°C	1.6600e-05	1.6600e-05
Источник [σ]	задано пользователем	задано пользователем

Прокладка	Значение	Ссылка
Тип / материал (табл. И.1)	спирально-навитая с лентой из нержавеющей стали	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
b_п, мм	7.000	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (2)/(3), (5) [p016]
b_0, мм	7.000	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (2)/(3), (5) [p016]
D_сп, мм	127.0	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (2)/(3), (5) [p016]
h_п, мм	4.500	ГОСТ 34233.4-2017, п. 5.1, ф. (2)/(3), (5) [p016]

Прокладка	Значение	Ссылка
m	3.000	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
q_обж, МПа	69.000	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
[q], МПа	—	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
K_обж	—	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
E_п, МПа	—	ГОСТ 34233.4-2017, прил. И, табл. И.1 [p037–p038]
y_п, мм/Н	0	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, К.1 (y_п = 0 принято для СНП) [p039]

Крепёж	Значение	Ссылка
Вид, n × d	шпилька, 12 × М20 (шаг 2.5)	—
Марка шпилек / гаек	45Х14Н14В2М / 12Х18Н10Т	—
f_б, мм²	225.0	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Д, табл. Д.1 (без проточки) [p032]
A_б = n·f_б, мм²	2700.0	ГОСТ 34233.4-2017, п. 6.1, ф. (8) [p016]
t_б, °C	100.0	—
[σ]_н^б при 20 °C / при t_б, МПа	160.0 / 150.0	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Г, табл. Г.1 [p030–p031], графа «45Х14Н14В2М»
E_б^20 / E_б, МПа	2.0500e+05 / 2.0200e+05	задано пользователем
α_б, 1/°C	1.7000e-05	задано пользователем
L_б0, мм	45.000	прил. К, К.1
L_б, мм	56.200	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.2) [p039]
y_б, мм/Н	1.0154e-07	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.2) [p039]

2. Параметры фланцев (прил. Е, К)

Величина	Ф1 корпус (фланец разъёма)	Ф2 крышка (фланец)	Ссылка
K	2.5000	1.9444	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_T	1.3385	1.5266	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_U	2.4757	3.3922	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_Y	2.2665	3.1086	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β_Z	1.3810	1.7192	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
l_0	38.8844	34.4674	ГОСТ 34233.4-2017, прил. К, ф. (К.3)—(К.8) [p039]
β	1.8333	1.2727	ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
x	0.5658	0.8704	ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
β_F	0.8231	0.8491	ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
β_V	0.2323	0.3651	ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]
f	1.0124	1.0000	ГОСТ 34233.4-2017, рис. К.2, К.3, К.4 (оцифровка); (К.9), (К.10) [p040–p041]

Величина	Ф1 корпус (фланец разъёма)	Ф2 крышка (фланец)	Ссылка
λ	1.7095	3.7331	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.11), (К.12) [р042]
y_ф	4.9078e-11	1.0671e-10	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.11), (К.12) [р042]
y_ф.н	4.0080e-11	2.2279e-11	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.15) [р042]
C_F	1.0000	1.0000	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.18) [р042]
D*	102.0	122.0	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (К.19) [р042]
ζ	1.3700	1.1650	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.5), (Е.6) [р033]
S_э	24.6609	12.8151	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.5), (Е.6) [р033]
e	9.1696	3.0924	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.5), (Е.6) [р033]
b	24.5000	24.5000	ГОСТ 34233.4-2017, ф. (Е.1) [р033]
K_S	1.2000	1.1815	ГОСТ 34233.4-2017, п. 8.5.1 (в издании условия напечатаны по «K_S»; по смыслу — по K) [р021]
[Θ]	0.0060	0.0060	п. 9.1 [р022]

Соединение	Значение	Ссылка
γ, Н/мм	5.0876e+06	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Е, ф. (Е.8) [р033–р034]
α	1.0980	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Е, ф. (Е.11) [р034]
α_м	1.0720	ГОСТ 34233.4-2017, прил. Е, ф. (Е.13) [р034]
Q_t (справочно), Н	-13350.0	ГОСТ 34233.4-2017, п. 6.4, ф. (11) [р017]
Учёт Q_t в расчёте	нет	п. 4.7, 4.8 [р015]

3. Усилия по режимам (разд. 5—7)

Величина	работа	работа, только давление (п. 4.4)	испытание	Ссылка
p, МПа	10.000	10.000	15.000	
Q_д, Н	1.2661e+05	1.2661e+05	1.8992e+05	ф. (9) [р017]
R_п, Н	83786.3	83786.3	1.2568e+05	ф. (7) [р016]
P_обж, Н	96354.2	96354.2	96354.2	ф. (6) [р016]
Q_t, Н	0	0	0	ф. (11) [р017]
P_б1, Н	2.2663e+05	2.2280e+05	3.3421e+05	ф. (16) [р017]
P_б2, Н	1.7280e+05	1.7280e+05	1.7280e+05	ф. (17) [р017]
P_б^м режима, Н	2.2663e+05	2.2280e+05	3.3421e+05	ф. (15) [р017]
P_б^м принятое, Н	3.3421e+05	3.3421e+05	3.3421e+05	ф. (15)
P_б^р, Н	3.2153e+05	3.2180e+05	3.1560e+05	ф. (18) [р018]
σ_б1, МПа	123.8	123.8	123.8	ф. (19) [р018]
σ_б2, МПа	119.1	119.2	116.9	ф. (20) [р018]
[σ]_м^б, МПа	192.0	192.0	259.2	ф. (Г.3) [р029]
[σ]_р^б, МПа	150.0	150.0	216.0	ф. (Г.4) [р029]
q, МПа	119.7	119.7	119.7	ф. (23) [р018]

4. Моменты и напряжения во фланцах (разд. 8, 9)

Величина	работа, ф.1	работа, ф.2	работа, только давление (п. 4.4), ф.1	работа, только давление (п. 4.4), ф.2	испытание, ф.1	испытание, ф.2	Ссылка
M^м	8.1881e+06	8.1881e+06	8.1881e+06	8.1881e+06	8.1881e+06	8.1881e+06	ф. (24)
M^р	9.0709e+06	8.2799e+06	9.0451e+06	8.2757e+06	9.4736e+06	8.3195e+06	ф. (26)
σ_1^м	43.120	91.727	43.120	91.727	43.120	91.727	ф. (28)/(30)
σ_0^м	43.655	91.727	43.655	91.727	43.655	91.727	ф. (29)/(30)
σ_R^м	85.038	24.816	85.038	24.816	85.038	24.816	ф. (31)
σ_T^м	43.950	73.722	43.950	73.722	43.950	73.722	ф. (32)
σ_1^р	47.769	92.756	47.634	92.709	49.890	93.200	ф. (34)/(36)
σ_0^р	48.362	92.756	48.224	92.709	50.509	93.200	ф. (35)/(36)
σ_1мм^р	4.879	17.747	4.566	17.064	6.850	25.596	ф. (37)
σ_0мм^р	10.336	23.174	9.603	22.265	14.404	33.398	ф. (38)
σ_0мо^р	23.333	49.091	23.333	49.091	35.000	73.636	ф. (39)
σ_R^р	94.207	25.095	93.939	25.082	98.389	25.215	ф. (40)
σ_T^р	48.689	74.549	48.550	74.511	50.850	74.905	ф. (41)
Θ	4.4518e-04	8.8354e-04	4.4391e-04	8.8309e-04	4.6495e-04	8.8777e-04	ф. (58)
[σ]	104.5	104.5	104.5	104.5	142.5	142.5	ГОСТ 34233.1
[σ]_M	156.8	156.8	156.8	156.8	213.8	213.8	ГОСТ 34233.1 п. 8.10
[σ]_R	313.6	313.6	313.6	313.6	427.6	427.6	ГОСТ 34233.1 п. 8.10

5. Проверки

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
1	затяжка	болты	Болты (шпильки) при затяжке: σ_б1 ≤ [σ]_м^б	123.8	192.0	МПа	1.55	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, ф. (19), (21); (Г.3) [p018, p029]
2	работа	болты	Болты (шпильки) в рабочих условиях: σ_б2 ≤ [σ]_р^б	119.1	150.0	МПа	1.26	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, ф. (20), (22); (Г.4) [p018, p029]
3	затяжка	фланец 1	Фланец 1: сечение S1 при затяжке, max(	σ1+σR	;	σ1+σT	) ≤ K_S·K_T·[σ]_M^20	128.2	188.2
4	затяжка	фланец 1	Фланец 1: сечение S0 при затяжке, σ0 ≤ 1,3·[σ]_R^20	43.6549	407.7	МПа	9.34	ОК	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 8.5.2, ф. (45) [p021]; ГОСТ 34233.1- 2017, п. 8.10, ф (12): [σ]_M = 1,5[σ], [σ]_R = 3[σ] [G1 p018]
5	затяжка	фланец 1	Фланец 1: тарелка при затяжке, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	85.0378	104.5
6	работа	фланец 1	Фланец 1: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
7	работа	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
8	работа	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	23.3333	104.5
9	работа	фланец 1	Фланец 1: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	94.2068	104.5
10	работа	фланец 1	Фланец 1: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	4.4518e-04	0.0060	рад	13.48	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
11	затяжка	фланец 2	Фланец 2: сечение S1 при затяжке, max(	σ1+σR	;	σ1+σT	) ≤ K_S·K_T·[σ]_M^20	165.4	185.3
12	затяжка	фланец 2	Фланец 2: сечение S0 при затяжке, σ0 ≤ 1,3·[σ]_R^20	91.7273	407.7	МПа	4.44	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 8.5.2, ф. (45) [p021]; ГОСТ 34233.1- 2017, п. 8.10, ф (12): [σ]_M = 1,5[σ], [σ]_R = 3[σ] [G1 p018]
13	затяжка	фланец 2	Фланец 2: тарелка при затяжке, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	73.7222	104.5
14	работа	фланец 2	Фланец 2: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
15	работа	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
16	работа	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	49.0909	104.5
17	работа	фланец 2	Фланец 2: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	74.5491	104.5
18	работа	фланец 2	Фланец 2: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	8.8354e-04	0.0060	рад	6.79	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
19	работа, только давление (п. 4.4)	болты	Болты (шпильки) в рабочих условиях: σ_б2 ≤ [σ]_p^б	119.2	150.0	МПа	1.26	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, ф. (20), (22); (Г.4) [p018, p029]
20	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
21	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
22	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	23.3333	104.5
23	работа, только	фланец 1	Фланец 1: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	93.9389	104.5

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
	давление (п. 4.4)								
24	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 1	Фланец 1: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	4.4391e-04	0.0060	рад	13.52	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
25	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
26	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
27	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	49.0909	104.5
28	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	74.5111	104.5
29	работа, только давление (п. 4.4)	фланец 2	Фланец 2: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	8.8309e-04	0.0060	рад	6.79	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
30	испытание	болты	Болты (шпильки) при испытании: σ_б2 ≤ [σ]_p^б	116.9	216.0	МПа	1.85	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, ф. (20), (22); (Г.4) [p018, p029]
31	испытание	фланец 1	Фланец 1: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
32	испытание	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
33	испытание	фланец 1	Фланец 1: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	35.0000	142.5
34	испытание	фланец 1	Фланец 1: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	98.3894	142.5
35	испытание	фланец 1	Фланец 1: угол поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]	4.6495e-04	0.0078	рад	16.78	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф. (58) [p022]
36	испытание	фланец 2	Фланец 2: сечение S1, max(	σ1−σ1мм+σR	;	σ1−σ1мм+σT	;	σ1+σ1мм	) ≤ K_S·K_T·[σ]_I
37	испытание	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0±σ0мм	;	0,3σ0±σ0мо	;	0,7σ0± (σ0мм−σ0мо)	) ≤ 1,3·[σ]_R
38	испытание	фланец 2	Фланец 2: сечение S0, max(	σ0мо	;	σ0мм	) ≤ [σ]	73.6364	142.5
39	испытание	фланец 2	Фланец 2: тарелка, max(	σR	;	σT	) ≤ K_T·[σ]	74.9055	142.5
40	испытание	фланец 2	Фланец 2: угол	8.8777e-04	0.0078	рад	8.79	OK	ГОСТ 34233.4- 2017, п. 9.1, ф.

№	Режим	Элемент	Проверка	Значение	Допускаемое	Ед.	Запас	Итог	Ссылка
			поворота Θ ≤ K_Θ·[Θ]						(58) [p022]

6. Крутящий момент затяжки (прил. Л, справочное)

- P_б^м = 3.3421e+05 Н; σ_б1 = 123.8 МПа.
- M_кр = 143.2 Н·м на одну шпильку (рис. Л.1 (оцифровка, UNVERIFIED); ГОСТ 34233.4-2017, прил. Л, рис. Л.1 [p044]).

7. Необходимость расчёта на испытание (ГОСТ 34233.1, п. 8.4)

- Фланец 1: p·1,35·[σ]^20/[σ] = 13.500 МПа; p_пр = 15.000 МПа -> расчёт нужен.
- Фланец 2: p·1,35·[σ]^20/[σ] = 13.500 МПа; p_пр = 15.000 МПа -> расчёт нужен.

8. Предупреждения, допущения, непроверенные места

Предупреждения (условия применимости и пр.):

- WARNING: фланец 1: уклон 0.682 > 1:3 — по п. 4.2.1 нужна цилиндрическая часть толщиной S0 (рекомендуется ≥ 1,5·S0 = 27.00 мм); длина не задана

UNVERIFIED:

- UNVERIFIED: СНП — в табл. И.1 нет K_обж, E_п, [q]; принято y_п = 0 (как для металлической) и проверка (23) не выполняется — прямого указания в стандарте нет
- UNVERIFIED: фланец 1: β_F = 0.8231, β_V = 0.2323, f = 1.012 — оцифровка графиков рис. К.2—К.4 (формул в стандарте нет)
- UNVERIFIED: фланец 2: β_F = 0.8491, β_V = 0.3651, f = 1.000 — оцифровка графиков рис. К.2—К.4 (формул в стандарте нет)
- UNVERIFIED: α_м — (Е.13)/(Е.14) записаны для пары одинаковых фланцев (множитель 2); для разных принято 2·y_ф.н·b·(b+e−e²/D_сп) -> Σ_i y_ф.н,i·b·(b+e_i−e_i²/D_сп), 2·y_ф.н·b² -> Σ y_ф.н,i·b² (точно совпадает для одинаковых фланцев)
- UNVERIFIED: M_кр по рис. Л.1 — оцифровка графика; ось подписана «мН·м» [ТАК В ИЗДАНИИ], принято Н·м

Допущения и толкования:

- ASSUMPTION: температуры фланцев и болтов приняты равными расчётной температуре среды t = 100 °C (п. 4.6; консервативно для допускаемых напряжений)
- NOTE: max t элементов = 100 °C ≤ 120 °C — расчёт с учётом Q_t допускается не проводить (п. 4.7) [p015]
- ASSUMPTION: единая затяжка: P_б^м = max по всем режимам (п. 4.5 — прочность и герметичность при всех режимах; прил. Л — «учитывать все возможные режимы»)
- ASSUMPTION: условия статической прочности при затяжке (43), (45), (47) — с [σ]_M, [σ]_R по [σ]^20 (по аналогии с (51), (56), где для затяжки стоит [σ]^20); (54) — с [σ] при расчётной температуре, как напечатано
- ASSUMPTION: при испытании [σ]_M = 1,5·[σ]_и, [σ]_R = 3·[σ]_и (ф. (12) ГОСТ 34233.1 с [σ] = [σ]_и), K_y.p = 1,35 (прил. Г), K_Θ = 1,3 (п. 9.1), [σ]_н^б при 20 °C, E = E^20
- NOTE: знак «±» в (10), (37), (38) — рассмотрены оба, принят наихудший

5. Внешние нагрузки и сейсмостойкость (ГОСТ 30546.1-98)

Скрипт: `calc/seismic_calc.py`; результаты: `out/calc/loads.json`.

5.1. Расчётные ускорения

Параметр	Значение	Обоснование
Сейсмичность по ТЗ	10 баллов MSK-64	ТЗ

Параметр	Значение	Обоснование
Базовое ускорение (9 баллов, отметка 0, жёсткое изделие)	5,0 м/с²	ГОСТ 30546.1 п. 5.6
Коэффициент уровня установки (0…10 м)	1,0	табл. 1, п. 5.7
Установка на трубопроводе (промежуточная конструкция)	×2	п. 4.4.3
Переход 9 → 10 баллов	×2	экстраполяция (+1 балл ⇔ ×2), в стандарте нет — **решение D-21**
Горизонтальное ускорение a_h	**20,0 м/с²** (2,04 g)	—
Вертикальное ускорение a_v = 0,7·a_h	**14,0 м/с²**	п. 5.8
Низшая собственная частота (МКЭ, клапан на входном фланце)	208,3 Гц	> 30 Гц — изделие жёсткое, расчёт квазистатический (п. 5.1.4)

5.2. Эквивалентные нагрузки (п. 5.5, 5.9) и реактивная сила

Масса клапана 59,1 кг, центр масс на высоте 229 мм; крышка с пружинным узлом и колпаком — 32,9 кг, z = 319 мм. Реактивная сила при срабатывании F_R = 14,09 кН по оси выхода (z = 135 мм).

Соединение	Осевая сила F, кН	Изгибающий момент M, Н·м	Состав
Входной фланец (Cl.1500 RTJ)	1,41	786	M = [σ]тр·Wтр (труба 1” XXS) + m·a_h·z_cg; F — вертикальная сейсмика + вес
Разъём корпус–крышка	0,78	88	крышка с пружинным узлом и колпаком: m·a_h·(z_cg − z_разъёма)
Выходной фланец (DN 40 PN 63)	0,00	812	M = [σ]тр·Wтр (труба 48,3 × 5,08); реактивную силу воспринимает опора сбросной линии (ГОСТ 31294 п. 11.16.2)

Моменты от трубопровода (решение D-22) — предельный изгибающий момент присоединяемой трубы под давлением: σ_и = min([σ] − σz; [σ] − σθ + σz) (Треска для мембранных напряжений), M = σ_и·W; труба 12Х18Н10Т, [σ] = 174,0 МПа при 100 °C:

Присоединение	Труба	p, МПа	σz / σθ, МПа	σ_и доп., МПа	W, мм³	M, Н·м
вход	1” Sch XXS (33,4 × 9,09)	25,0	6,6 / 33,4	147,1	3500	515
выход	46 × 4,5 (под фланец тип 11 ряд 1)	10,0	18,3 / 46,1	146,2	5556	812

Справочно — открытый сброс без опоры сбросной линии. Реактивная сила F_R = 14,1 кН на плече до входной шейки создала бы момент 1306 Н·м — в 2,5 раза больше несущей способности самой входной трубы 1” XXS (515 Н·м). Поэтому реактивную силу должна воспринимать опора сбросного трубопровода у первого отвода (ГОСТ 31294 п. 11.16.2); требование внесено в технические требования сборочного чертежа.

Эти нагрузки переданы в расчёт фланцевых соединений по ГОСТ 34233.4 (`calc/flange_calc.py`).

5.3. Проверка входной шейки корпуса (сечение над входным фланцем, z = 42,35 мм)

Ø80/Ø30 (с прибавкой c = 1 мм к внутреннему диаметру), p = 25 МПа; M = 736 Н·м. Напряжения: окружное (Ламе) наружное/внутреннее 9,5/34,5 МПа, осевое от давления 4,8 МПа, от изгиба ±15,0 МПа, от осевой силы -0,33 МПа; [σ] = 104,5 МПа (12Х18Н9ТЛ, η = 0,8, 100 °C).

Проверка	Значение	Допуск	Вывод	Ссылка
Входная шейка: наружное волокно, Треска (σm + изгиб от трубы и сейсмики)	20,1	104,5	выполнено	ГОСТ 34233.1 п. 8.10 ((σ)m ≤ [σ]; глобальный изгиб — как мембранное)

Проверка	Значение	Допуск	Вывод	Ссылка
Входная шейка: внутреннее волокно, Треска (σm + σи по толщине)	65,5	156,8	выполнено	ГОСТ 34233.1 п. 8.10 ((σ)m + (σ)и ≤ 1,5[σ])
Резонансные частоты вне 1…30 Гц (жёсткое изделие)	208,3	30,0	выполнено	ГОСТ 30546.1 п. 5.1.4, 5.6

Примечание: основная внешняя нагрузка — реактивная сила при срабатывании; сейсмическая составляющая при 10 баллах мала из-за малой массы клапана. Крепление сбросного трубопровода должно воспринимать реактивную силу (ГОСТ 31294 п. 11.16.2).

6. Численный расчёт корпуса методом конечных элементов

Скрипт-вход: `fea/run_fea.py` (запуск: `tools/freecad/squashfs-root/usr/bin/python fea/run_fea.py`, без ручных действий в GUI); модули `fea/geom.py` (геометрия, грани, ЛКН), `fea/mesher.py` (gmsh), `fea/model.py` (нагрузки, закрепления, входные файлы CalculiX), `fea/post.py` (линеаризация), `fea/render.py` (рисунки), `fea/report.py` (этот раздел). Результаты — `out/fea/` (`results.json` — все числа; `static_*/` — `.inp/.frd/.dat`; `modal/`; `img/` — рисунки; `vtk/` — поля для просмотра в ParaView).

6.1. Нормативная основа и критерии

- ГОСТ 34233.1-2017 п. 4.5.6, 4.5.7.1: численное моделирование допускается, когда конструкция (литой угловой корпус с врезкой патрубка, фланцами и резьбовыми зонами) не охватывается формулами ГОСТ 34233.2…34233.11; условно упругий расчёт оценивается по категориям напряжений по п. 8.10.
- п. 4.3: критерий прочности — теория наибольших касательных напряжений, приведённые напряжения — интенсивность σэкв = σ1 − σ3 (Треска); по Мизесу — только для титана. Все величины ниже — по Треска.
- п. 8.10, ф. (12) (температура ниже области ползучести): (σ)m ≤ [σ]; (σ)m или (σ)mL + (σ)и ≤ [σ]_M = 1,5[σ]; (σ)m или (σ)mL + (σ)и + (σ)иL + (σ)t + (σ)tL ≤ [σ]_R = 3[σ]; используются **линеаризованные по сечению** значения. Температурных напряжений нет (равномерная температура), поэтому третья строка сводится к линеаризованной сумме мембранных и изгибных напряжений (включая краевые).
- ГОСТ 34233.3-2017 п. 4.7: узлы врезки вне табл. 1 рассчитываются численно с проверкой по п. 8.10 ГОСТ 34233.1.
- Допускаемые напряжения — calc/gost34233_shells.py: allowable_stress('12Х18Н9ТЛ', T, product='casting', individual_ndt=True), fea_criteria(); тесты модуля: «Всего тестов: 17, утверждений: 108 — все пройдены».

Вариант	Условия	t, °C	[σ], МПа	1,5[σ]	3[σ]	Формула
РУ	рабочие	100	104,53	156,8	313,6	[σ] = η·min(Rp0.2/t / n_т; Rm/t / n_в) = 0.8·min(196/1.5; 412/3.0) = 0.8·min(130.7; 137.3)
РУ+С	рабочие	100	104,53	156,8	313,6	[σ] = η·min(Rp0.2/t / n_т; Rm/t / n_в) = 0.8·min(196/1.5; 412/3.0) = 0.8·min(130.7; 137.3)
ИСП-А	гидроиспытание	20	142,55	213,8	427,6	[σ]_и = η·Rp0.2/20 / n_т = 0.8·196/1.1
ИСП-Б	гидроиспытание	20	142,55	213,8	427,6	[σ]_и = η·Rp0.2/20 / n_т = 0.8·196/1.1

12Х18Н9ТЛ (отливка, ГОСТ 977-88) в приложениях А, Б ГОСТ 34233.1 отсутствует; [σ] — по п. 8.6 и ф. (2) (R_p1,0 нет → R_p0,2 = 196 МПа, n_т = 1,5; R_m/t по СТ ЦКБА 005.2-2004 табл. 13.14.3, n_в = 3,0) с η = 0,8 по п. 8.3 (100 % неразрушающий контроль каждой отливки); при гидроиспытании — ф. (6), n_т = 1,1. Конспект — `norm/03_gost34233_1-3.md`, разд. 1.3–1.8, 2.

6.2. Расчётная модель

Геометрия — тело корпуса из `cad/build_model.body()` (FreeCAD/OCC, тот же параметрический источник, что и для чертежей): 101 граней, 253 рёбер, объём 3049,0 см³, масса 24,09 кг (ρ = 7900 кг/м³). Резьбовые поверхности — цилиндры по внутреннему диаметру резьбы d1 (условно, как в модели); витки не моделируются, нагрузка с витков задаётся распределённой по цилиндру (см. 6.4). Литейные уклоны и прибавки на коррозию не учитываются (поверочный расчёт по номинальной геометрии; c = 0 — как в `out/calc/strength.json` для отливки после мехобработки).

Материал — 12Х18Н9ТЛ, линейно-упругий изотропный: E = 200000 МПа (ГОСТ 34233.1 табл. В.1, аустенитные стали, 20…100 °С — одно значение 2,00·10⁵), ν = 0,30, ρ = 7900 кг/м³.

Элементы — 10-узловые тетраэдры C3D10 (CalculiX 2.23), срединные узлы на прямых рёбрах (без искривления под геометрию — исключает отрицательные якобианы; погрешность аппроксимации кривых поверхностей ограничена размером по кривизне). Решатель статики — ITERATIVE CHOLESKY (ограничение ОЗУ), частоты — SPOOLES + ARPACK.

Грани для нагрузок и закреплений выбираются автоматически: по типу и параметрам поверхности FreeCAD (цилиндр резьбы M45×2 по d1, конус 45° уплотнения сопла, резьбовые отверстия M20 на Ø176, резьбовые отверстия 7/8”-9UNC входного фланца, плоскости Z = 0, Z = 185, X = тыльная сторона выходного фланца и т. п.) и по положению контрольной точки, смещённой от грани элемента на 0,3 мм в объём среды (смачиваемость). Теги поверхностей gmsh сопоставлены с гранями FreeCAD геометрически (макс. отклонение 0,034 мм); при изменении параметров модель пересобирается без ручного выбора.

Замечания к геометрии, выявленные автоматически (`fea/geom.py: geometry_checks`; модель не изменялась):

- ГЕО-2 [умеренно]: Мелкая плоская грань 26.8 мм² (1 шт., напр. у (-0.0, -34.0, 86.7)), смежные поверхности: плоскость Z=88; цилиндр R7.19 (ось Y) — серповидная площадка/острая кромка от пересечения отверстия с соседней поверхностью.
- ГЕО-2 [умеренно]: Мелкая плоская грань 0.7 мм² (4 шт., напр. у (29.2, -29.2, 43.4)), смежные поверхности: тор R44/r4; цилиндр R9.71 (ось Z) — серповидная площадка/острая кромка от пересечения отверстия с соседней поверхностью.
- ГЕО-4 [существенно]: Резьбовые отверстия 7/8”-9UNC входного фланца (насквозь, в модели Ø19.43 на Ø101.6) подрезают галтель R4 перехода шейки Ø80 в тарелку: кромка отверстия на r = 41.08 мм, шейка r = 40.0 мм (перемычка до шейки 1.08 мм, галтель до r = 44.0 мм). Отверстие выходит в галтель — острая кромка и тонкая перемычка у растянутой зоны шейки; нужно уменьшить Ø шейки до ≤ 70 мм (с галтелью R4 и зазором ≥ 2 мм) либо делать отверстия глухими.
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: конус 59.9° / цилиндр R8.65 (ось Z) (рёбер 24, длина 652 мм, напр. у (-62.2, -70.9, 153.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: плоскость Z=182 / цилиндр R69 (ось Z) (рёбер 1, длина 434 мм, напр. у (-69.0, 0.0, 182.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: плоскость Z=174 / цилиндр R57.5 (ось Z) (рёбер 1, длина 361 мм, напр. у (-57.5, 0.0, 174.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: конус 34.3° / цилиндр R60 (ось Z) (рёбер 1, длина 315 мм, напр. у (-60.0, 0.0, 118.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: конус 45° / плоскость X=152 (рёбер 1, длина 295 мм, напр. у (152.0, 0.0, 182.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: конус 42.3° / цилиндр R40 (ось Z) (рёбер 1, длина 251 мм, напр. у (-40.0, 0.0, 58.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: плоскость Z=6.35 / цилиндр R35.7 (ось Z) (рёбер 1, длина 224 мм, напр. у (-35.7, 0.0, 6.3))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: плоскость Z=84 / цилиндр R30 (ось Z) (рёбер 1, длина 188 мм, напр. у (-30.0, 0.0, 84.0))

- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: конус 45° / плоскость Z=82 (рёбер 1, длина 141 мм, напр. y (-22.5, 0.0, 82.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: плоскость Z=62 / цилиндр R21.4 (ось Z) (рёбер 1, длина 135 мм, напр. y (-21.4, 0.0, 62.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: конус 11.3° / цилиндр R105 (ось Z) (рёбер 2, длина 101 мм, напр. y (102.0, -24.8, 161.7))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: цилиндр R13 (ось X) / цилиндр R60 (ось Z) (рёбер 1, длина 82 мм, напр. y (-60.0, -0.0, 113.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: цилиндр R34 (ось X) / цилиндр R60 (ось Z) (рёбер 2, длина 73 мм, напр. y (57.1, -18.5, 106.5))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: цилиндр R13 (ось Y) / цилиндр R60 (ось Z) (рёбер 1, длина 59 мм, напр. y (-0.1, -60.0, 105.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: конус 34.3° / цилиндр R34 (ось X) (рёбер 2, длина 49 мм, напр. y (58.0, -33.3, 128.1))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: плоскость Z=140 / цилиндр R34 (ось X) (рёбер 2, длина 40 мм, напр. y (80.0, -33.6, 140.0))
- ГЕО-3 [концентратор]: Острое входящее ребро без галтели: тор R50/r10 / цилиндр R13 (ось Y) (рёбер 2, длина 23 мм, напр. y (-5.6, -59.1, 80.3))
- ГЕО-3: ещё 4 коротких (< 20 мм) входящих рёбер у пересечений отверстий/бобышек — см. `results.json`.

Острые входящие рёбра (ГЕО-3) в линейно-упругой модели дают сингулярные пики узловых напряжений; по п. 8.10 они не оцениваются (оцениваются линеаризованные значения), но для отливки и малоцикловой прочности на чертеже должны быть заданы радиусы: наружные литые переходы R ≥ 3…5 мм, внутренние обработанные углы R0,5…1 мм.

6.3. Сетка и сходимость

Сетка gmsh (Delaunay, детерминированный однопоточный режим) с полями размера: у острых входящих рёбер (без галтелей) и галтелей — h_f, у кромок пересечения каналов, канавок R-16 и J, резьбовых поверхностей — 1,2…1,8·h_f, рост размера до h_g с градиентом 0,5…0,7; вдоль каждой ЛКН — цилиндрическая зона с размером t/n (не менее n элементов 2-го порядка по толщине).

Сетка	h_g, мм	h_f, мм	n по ЛКН	Узлов	Элементов C3D10	q_min / q_ср	J_min	Время ссх, с
L0	11,0	3,4	4	96660	55167	0,074 / 0,62	1,000	313
L1	8,0	2,2	6	209827	124712	0,047 / 0,65	1,000	893
MOD0 (частоты, проверка)	17,0	7,5	—	35721	19495	0,026 / 0,58	1,000	—
MOD (частоты)	12,0	5,0	—	59484	33204	0,018 / 0,61	1,000	41

q = 6√2·V/l_rms³ (1 — правильный тетраэдр); J_min — минимум отношения якобиана квадратичного элемента к линейному.

Сходимость L0 → L1. Критерий задания — изменение пиковых (максимальных по варианту) линеаризованных напряжений < 5 %: худшее изменение **1,0 %**; дополнительно (строже) — изменение (σ)m и (σ)m+(σ)и по каждой определяющей ЛКН (коэффициент использования ≥ 0,5): худшее **2,1 %** → сходимость достигнута. По всем ЛКН, включая слабонагруженные, худшее изменение — 30,0 % (справочно).

Вариант	Пиковая ЛКН	Пик (σ)m+(σ)и: L0 → L1, МПа	Δ пика, %	Макс. Δ по определяющим ЛКН, %
РУ	D1	160,7 → 159,2	0,9	2,1
РУ+С	D1	160,7 → 159,2	0,9	2,1
ИСП-А	B	85,3 → 86,1	1,0	0,0
ИСП-Б	D1	200,2 → 199,1	0,5	0,0

Изменения по всем ЛКН ((σ)m / (σ)m+(σ)и, %; использование по сетке L1):

ЛКН	РУ	РУ+С	ИСП-А	ИСП-Б
A	3,1 / 3,8 (исп. 0,37)	3,1 / 8,7 (исп. 0,40)	3,6 / 0,5 (исп. 0,31)	3,5 / 3,2 (исп. 0,04)
B	0,9 / 0,3 (исп. 0,42)	0,9 / 0,3 (исп. 0,42)	0,9 / 1,0 (исп. 0,40)	1,7 / 0,7 (исп. 0,19)
C	1,5 / 2,0 (исп. 0,43)	1,5 / 2,0 (исп. 0,43)	1,8 / 2,4 (исп. 0,16)	1,6 / 2,1 (исп. 0,36)
D1	2,1 / 0,9 (исп. 0,51)	2,1 / 0,9 (исп. 0,51)	4,0 / 2,9 (исп. 0,19)	1,5 / 0,5 (исп. 0,47)
D2	3,5 / 1,2 (исп. 0,18)	3,7 / 1,1 (исп. 0,18)	2,3 / 2,1 (исп. 0,15)	1,5 / 1,4 (исп. 0,14)
E	4,3 / 2,5 (исп. 0,11)	4,4 / 2,6 (исп. 0,11)	10,8 / 10,5 (исп. 0,01)	2,2 / 1,6 (исп. 0,14)
F1	4,8 / 5,8 (исп. 0,20)	4,8 / 5,8 (исп. 0,20)	1,2 / 1,7 (исп. 0,16)	4,6 / 5,8 (исп. 0,15)
F2	3,2 / 1,9 (исп. 0,26)	3,1 / 1,9 (исп. 0,26)	3,9 / 2,3 (исп. 0,20)	2,1 / 1,6 (исп. 0,19)
G1	1,5 / 2,1 (исп. 0,34)	1,5 / 2,1 (исп. 0,34)	2,0 / 1,7 (исп. 0,15)	1,0 / 2,0 (исп. 0,28)
G2	1,0 / 1,5 (исп. 0,32)	0,9 / 1,5 (исп. 0,32)	1,4 / 1,1 (исп. 0,24)	2,8 / 1,6 (исп. 0,24)
H	8,2 / 13,2 (исп. 0,26)	8,0 / 12,7 (исп. 0,28)	2,3 / 1,6 (исп. 0,19)	30,0 / 8,5 (исп. 0,02)
K	3,2 / 5,4 (исп. 0,29)	3,4 / 5,3 (исп. 0,30)	1,5 / 1,7 (исп. 0,15)	5,3 / 6,7 (исп. 0,21)

ЛКН с изменением ≥ 5 % (A, E, F1, H, K) — слабонагруженные (использование < 0,5) либо проходящие у сингулярных кромок/зоны закрепления (H — у заделанных резьбовых отверстий входного фланца; K, F1 — у острых входящих углов); на вывод о прочности не влияют: их запасы многократно больше точности сетки.

6.4. Закрепления и нагрузки

Закрепление. Входной фланец: шпильки 7/8”-9UNC ввёрнуты в резьбовые отверстия корпуса (D-26) — на поверхностях этих отверстий UX = UY = UZ = 0 (1832 узлов, 8743 мм²); уплотнительный выступ вне канавки R-16 опирается на ответный фланец через кольцо — UZ = 0 (252 узлов, 1070 мм²). Податливость шпилек и ответного фланца не учитывается (жёсткая заделка; для статики — нейтрально/в запас для корпуса выше фланца, для частот — завышает жёсткость, см. 6.7). Зона закрепления и тарелка входного фланца из оценки исключены (рассчитаны по ГОСТ 34233.4, раздел 4).

Исходные данные нагрузок:

- давления: p_вх = 25,0 МПа, p_вых = 10,0 МПа (накопленное давление в полости при срабатывании, `out/calc/valve_calc.json` → p_out_design); пробные: вход 35,0 МПа (ГОСТ 356-80 табл. 10, PN 250), выход 15,0 МПа (1,5·p_вых.расч);
- смачиваемые поверхности: вход — проход Ø30, резьбовая зона сопла до среднего диаметра конического уплотнения Ø47, торец фланца внутри среднего диаметра кольца R-16 Ø50,8; выход — полость над уплотнением сопла, выходной канал, канавка J внутри D8 = 75, посадка направляющей, дно выточки до D_сп = 127 мм, отверстия стопорного винта и дренажа;
- сопло → корпус: $F_p = (p_{вх} - p_{вых})\cdot\pi/4\cdot 47^2$; на резьбу M45×2 — 1,3·F_p (+Z, с учётом затяжки), на конус уплотнения — 0,3·F_p (−Z, остаточный натяг, по нормали к конусу 45°); при F_p < 0 (ИСП-Б) — наоборот: конус 1,3·|F_p|, резьба 0,3·|F_p|. Нагрузка с витков — равномерная касательная по цилиндру d1 плюс распор витков (радиальная составляющая tg 30° от осевой для метрического профиля 60°). Допущение «вся осевая сила — через сопло» консервативно для резьбовой зоны: часть силы давления на золотник при закрытом клапане идёт через пружину в крышку;
- шпильки крышки 12×M20: усилие P_б — calc/gost34233_4.py → flange_joint (ввод calc/flange_calc.inputs, разъём корпус–крышка): затяжка P_б^м = 334,2 кН, рабочие условия P_б^р = 321,8 кН, испытание P_б^р = 315,6 кН; приложено равномерно по поверхности резьбовых отверстий на длине свинчивания 28 мм (+Z) с распором витков; реакция прокладки СНП R = P_б − Q_д(p_вых), $Q_д = 0{,}785\cdot D_{сп}^2\cdot p$ (ГОСТ 34233.4 ф. (9)) — давлением на дно выточки в полосе Ø120…Ø134 (−Z). Металлический контакт фланцев снаружи выточки не моделируется (пара «шпилька–прокладка» даёт наибольший изгиб фланца — в запас);
- выходной фланец: торцевая сила давления $p_{вых}\cdot\pi/4\cdot D8^2$ (+X) минус реактивная сила струи R = 14,09 кН (−X, по оси выхода, α1 = 0,9 — `valve_calc.json` → built_up.a0.9.F_R) и изгибающий момент трубопровода M = 768 Н·м (out/calc/flanges.json → allowable_moments.outlet.M_allow; вокруг −Y — в ту же сторону, что момент реакции относительно входа) — через опорные площадки гаек M20 на тыльной стороне тарелки (сила — равномерно, момент — линейно);
- пробки M16×1,5 (стопорный винт, дренаж): $p_{вых}\cdot\pi/4\cdot 16^2$ наружу по оси отверстия — касательной нагрузкой по резьбе;

- сейсмика (вариант РУ+С): a_г = 20 м/с², a_в = 14 м/с² (out/calc/loads.json → seismic (a_h, a_v); 10 баллов, установка на трубопроводе), горизонтально вдоль −X (в сторону реакции струи — наихудшее направление для шейки), вертикально вверх, плюс вес (g = 9,81 м/с²): инерционная нагрузка корпуса — объёмная (GRAV), верхнего узла (крышка с пружинным узлом и колпаком, 32,9 кг, ЦМ Z = 319 мм) — силой и моментом на плоскость разъёма, сопла с обтюратором и направляющей — на поверхности их посадки (ГОСТ 30546.1 п. 5.5, 5.9).

Комбинация РУ консервативна: реакция струи 14,1 кН на плече 135 мм даёт на входе момент ≈ 1,9 кН·м, что больше допускаемого момента входного соединения 553 Н·м (`out/calc/flanges.json`); т. е. вариант РУ огибает и нагрузку от трубопровода на входе, и случай сброса без опоры сбросной линии.

Результирующие приложенных нагрузок (сетка L1; F — Н, сумма по узлам):

РУ — Рабочие условия: срабатывание (p_вх, p_вых), реакция струи, момент трубопровода.

Нагрузка	Граней	Fx	Fy	Fz
Давление p_вх = 25 МПа: проход Ø30, резьбовая зона сопла до конуса Ø47, торец внутри R-16	3496	19	−1	7225
Давление p_вых = 10 МПа: полость, выходной канал, канавка J до D8, выточка до D_сп	10265	−42500	1537	−108274
Сопло → резьба M45×2 корпуса: 33.8 кН (+Z) + распор витков (tg30°)	866	−0	0	33831
Сопло → конус уплотнения 45°: 7.8 кН (−Z), по нормали	232	0	0	−7807
Шпильки крышки 12×M20: 321.8 кН (+Z) на длине свинчивания 28 мм + распор витков	3018	−857	74	322009
Реакция прокладки СНП на дне выточки: 195.2 кН (−Z)	527	0	0	−195188
Выходной фланец: p_вых·π/4·D8² − R = 44.2 − 14.1 = 30.1 кН (+X); M_тр = 768 Н·м (вокруг −Y)	90	30086	0	0
Пробка M16 (стопорный винт): 2.01 кН наружу по оси отверстия	249	−2015	−0	0
Пробка M16 (дренаж): 2.01 кН наружу по оси отверстия	294	−0	−2015	−74
Сумма приложенных (с GRAV)		−15267	−405	51722
Реакции опор (ссх)		15271	345	−51731

Проверка выбора смачиваемых граней (результирующая давления против «замыкающих крышек» по линиям уплотнений): p_вх: МКЭ (19; −1; 7225) / ожидаемо (0; 0; 7297) Н, расхождение 74 Н = 0,15 % от полной силы давления на торец по линии уплотнения; p_вых: МКЭ (−42500; 1537; −108274) / ожидаемо (−42555; 1623; −109327) Н, расхождение 1058 Н = 0,84 % от полной силы давления на торец по линии уплотнения. Невязка равновесия: 0,114 %.

РУ+С — Рабочие условия + сейсмическое воздействие (10 баллов) + вес.

Нагрузка	Граней	Fx	Fy	Fz
Давление p_вх = 25 МПа: проход Ø30, резьбовая зона сопла до конуса Ø47, торец внутри R-16	3496	19	−1	7225
Давление p_вых = 10 МПа: полость, выходной канал, канавка J до D8, выточка до D_сп	10265	−42500	1537	−108274
Сопло → резьба M45×2 корпуса: 33.8 кН (+Z) + распор витков (tg30°)	866	−0	0	33831
Сопло → конус уплотнения 45°: 7.8 кН (−Z), по нормали	232	0	0	−7807
Шпильки крышки 12×M20: 321.8 кН (+Z) на длине свинчивания 28 мм + распор витков	3018	−857	74	322009
Реакция прокладки СНП на дне выточки: 195.2 кН (−Z)	527	0	0	−195188
Выходной фланец: p_вых·π/4·D8² − R = 44.2 − 14.1 = 30.1 кН (+X); M_тр = 768 Н·м (вокруг −Y)	90	30086	0	0
Пробка M16 (стопорный винт): 2.01 кН наружу по оси отверстия	249	−2015	−0	0
Пробка M16 (дренаж): 2.01 кН наружу по оси отверстия	294	−0	−2015	−74
Сейсмика + вес: верхний узел 32.9 кг (ЦМ Z = 319) → плоскость разъёма: F = (-657; 0; 138) Н	1587	−657	−0	138
Сейсмика + вес: сопло, втулка регулировочная, золотник, обтюратор (1.20 кг)	866	−24	0	5
Сейсмика + вес: направляющая (0.76 кг)	2007	−15	0	3
Сумма приложенных (с GRAV)		−16446	−405	51969
Реакции опор (ccx)		16446	402	−51967

Проверка выбора смачиваемых граней (результирующая давления против «замыкающих крышек» по линиям уплотнений): p_вх: МКЭ (19; −1; 7225) / ожидаемо (0; 0; 7297) Н, расхождение 74 Н = 0,15 % от полной силы давления на торец по линии уплотнения; p_вых: МКЭ (−42500; 1537; −108274) / ожидаемо (−42555; 1623; −109327) Н, расхождение 1058 Н = 0,84 % от полной силы давления на торец по линии уплотнения. Невязка равновесия: 0,007 %.

ИСП-А — Гидроиспытание входной полости.

Нагрузка	Граней	Fx	Fy	Fz
Давление p_вх = 35 МПа: проход Ø30, резьбовая зона сопла до конуса Ø47, торец внутри R-16	3496	26	−1	10116
Сопло → резьба M45×2 корпуса: 78.9 кН (+Z) +	866	0	−0	78940

Нагрузка	Граней	Fx	Fy	Fz
распор витков (tg30°)				
Сопло → конус уплотнения 45°: 18.2 кН (−Z), по нормали	232	−0	−0	−18217
Шпильки крышки 12×M20: 334.2 кН (+Z) на длине свинчивания 28 мм + распор витков	3018	−890	77	334422
Реакция прокладки СНП на дне выточки: 334.2 кН (−Z)	527	0	0	−334206
Сумма приложенных (с GRAV)		−864	76	71054
Реакции опор (ссх)		878	−67	−71089

Проверка выбора смачиваемых граней (результирующая давления против «замыкающих крышек» по линиям уплотнений): p_вх: МКЭ (26; −1; 10116) / ожидаемо (0; 0; 10216) Н, расхождение 104 Н = 0,15 % от полной силы давления на торец по линии уплотнения. Невязка равновесия: 0,053 %.

ИСП-Б — Гидроиспытание выходной полости.

Нагрузка	Граней	Fx	Fy	Fz
Давление p_вых = 15 МПа: полость, выходной канал, канавка J до D8, выточка до D_сп	10265	−63751	2305	−162411
Сопло → резьба M45×2 корпуса: 7.8 кН (+Z) + распор витков (tg30°)	866	0	0	7807
Сопло → конус уплотнения 45°: 33.8 кН (−Z), по нормали	232	−0	−0	−33831
Шпильки крышки 12×M20: 315.6 кН (+Z) на длине свинчивания 28 мм + распор витков	3018	−840	73	315802
Реакция прокладки СНП на дне выточки: 125.7 кН (−Z)	527	0	0	−125679
Выходной фланец: p_вых·π/4·D8² − R = 66.3 − 0.0 = 66.3 кН (+X); M_тр = 0 Н·м (вокруг −Y)	90	66268	0	0
Пробка M16 (стопорный винт): 3.02 кН наружу по оси отверстия	249	−3023	−0	0
Пробка M16 (дренаж): 3.02 кН наружу по оси отверстия	294	−0	−3023	−112
Сумма приложенных (с GRAV)		−1346	−645	1576
Реакции опор (ссх)		1358	639	−1579

Проверка выбора смачиваемых граней (результирующая давления против «замыкающих крышек» по линиям уплотнений): p_вых: МКЭ (−63751; 2305; −162411) / ожидаемо (−63833; 2435; −163991) Н, расхождение 1587 Н = 0,84 % от полной силы давления на торец по линии уплотнения. Невязка равновесия: 0,653 %.

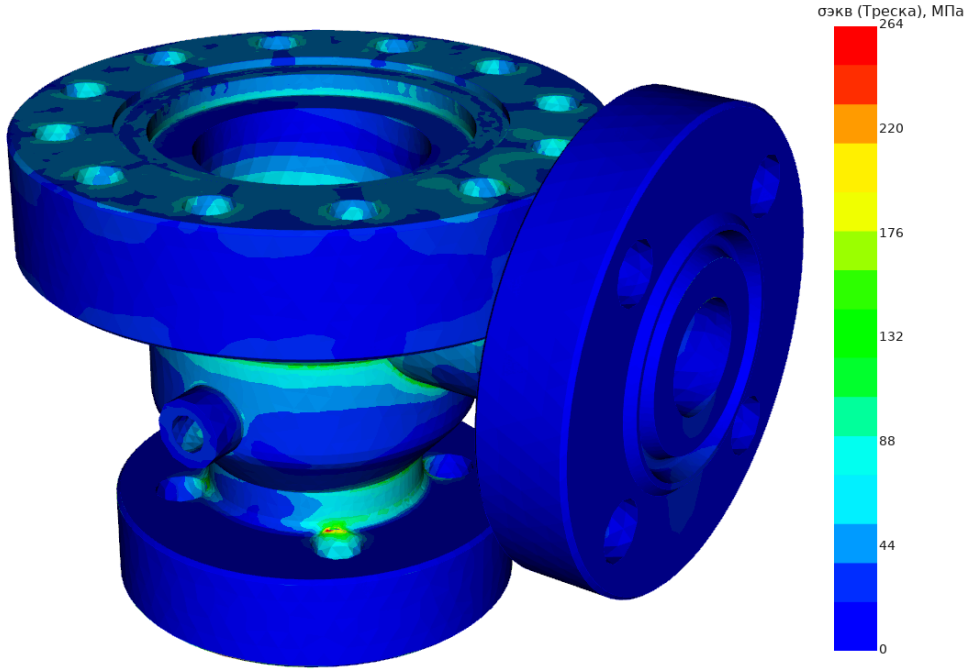
6.5. Результаты: поля эквивалентных напряжений

Вариант	max σэкв (узловое), МПа	где (x; y; z), мм	max
РУ	264	28; −31; 43	0,144
РУ+С	283	28; −31; 43	0,154
ИСП-А	175	−27; 31; 43	0,029
ИСП-Б	219	42; 0; 115	0,060

Узловые максимумы находятся у острых входящих рёбер без галтелей и у краёв зон приложения нагрузки (сингулярности линейно-упругой модели); по ГОСТ 34233.1 п. 8.10 оцениваются линеаризованные значения, пиковая составляющая — только для малоцикловой усталости (ГОСТ 34233.6, п. 8.9), здесь не требуется.

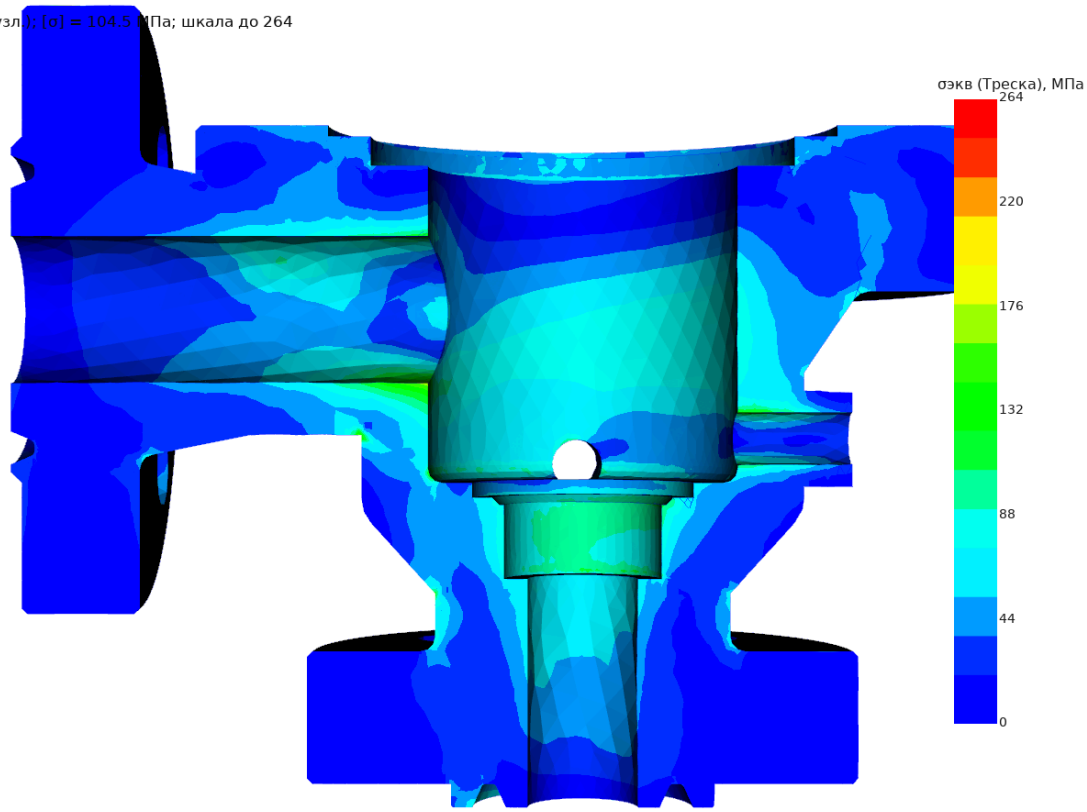
RU — Рабочие условия: срабатывание (p_вх, p_вых), реакция струи, момент трубопровода

max 264 МПа (узл.); [σ] = 104.5 МПа; шкала до 264



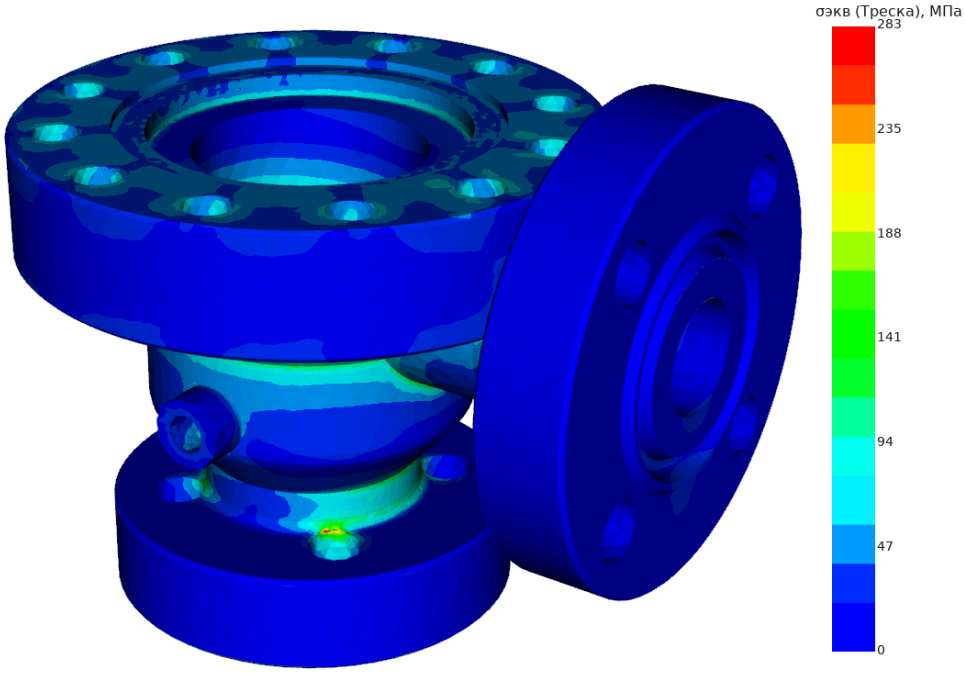
RU — Рабочие условия: срабатывание (p_вх, p_вых), реакция струи, момент трубопровода

max 264 МПа (узл.); [σ] = 104.5 МПа; шкала до 264



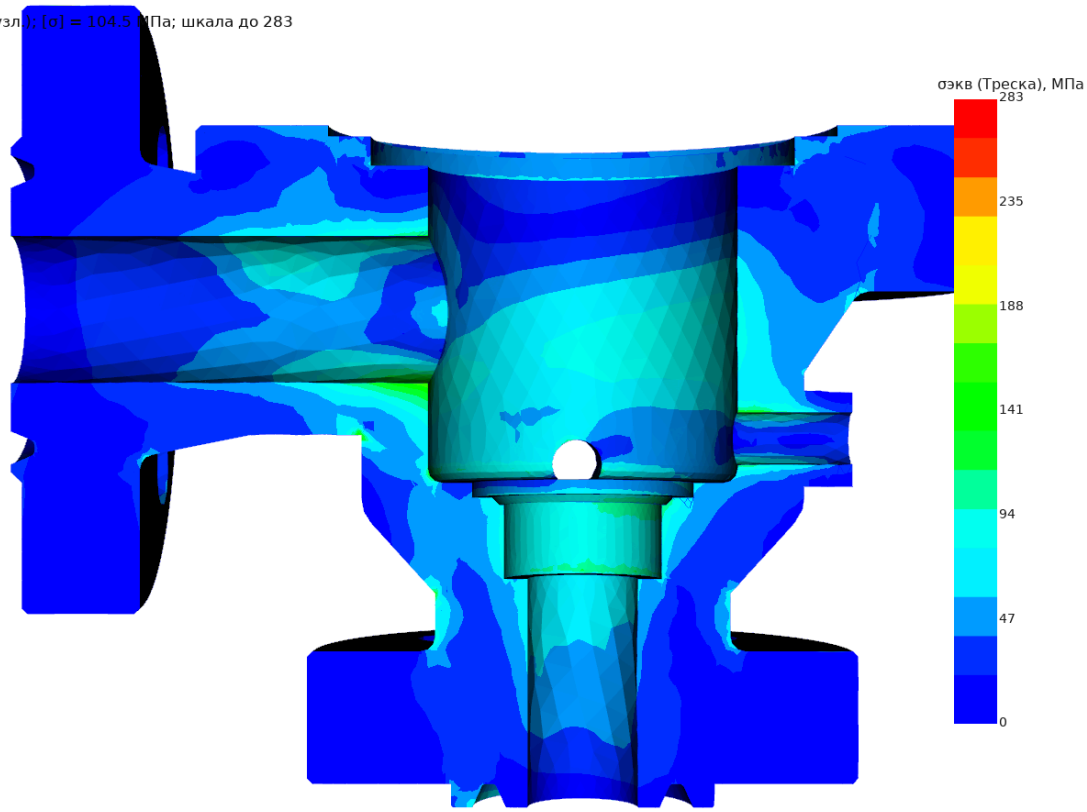
RU_S — Рабочие условия + сейсмическое воздействие (10 баллов) + вес

max 283 МПа (узл.); [σ] = 104.5 МПа; шкала до 283



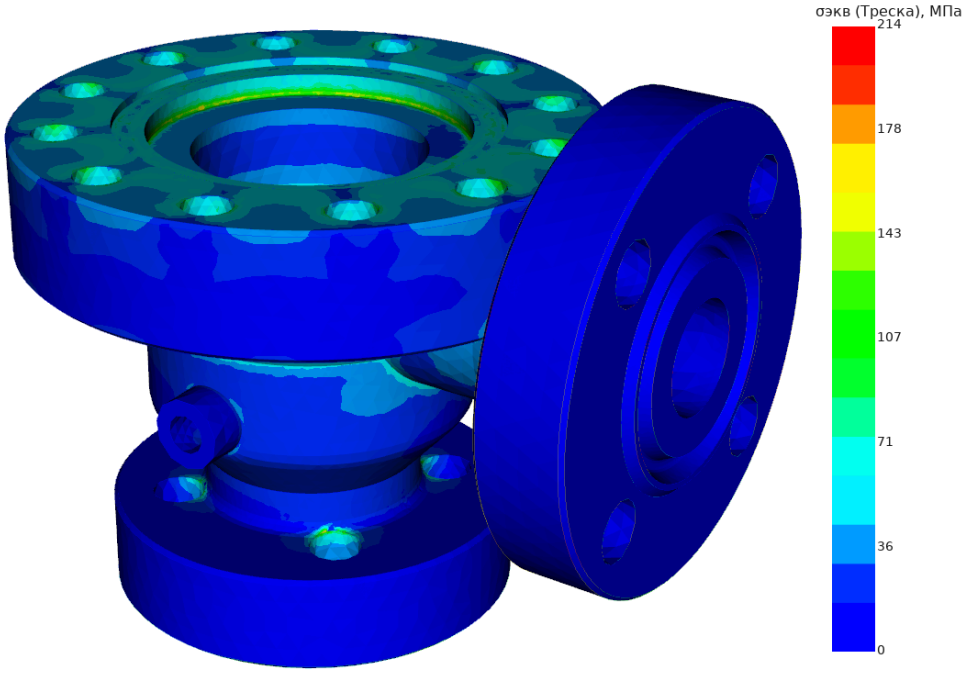
RU_S — Рабочие условия + сейсмическое воздействие (10 баллов) + вес

max 283 МПа (узл.); [σ] = 104.5 МПа; шкала до 283



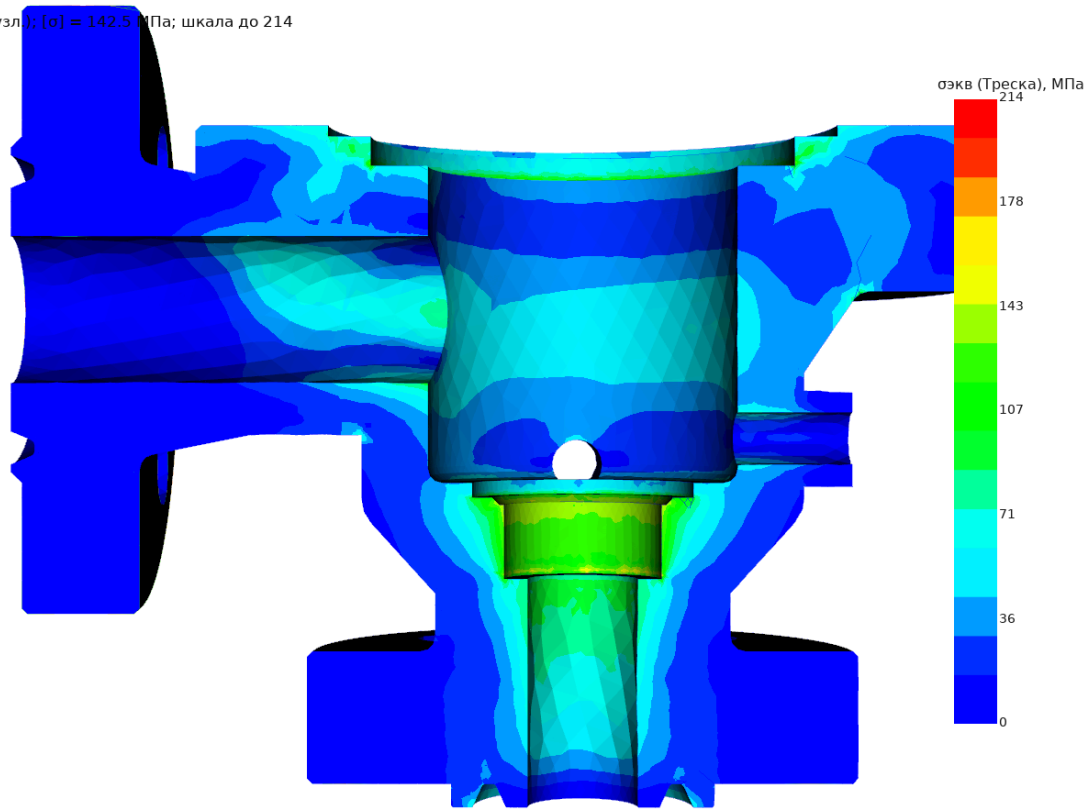
ISP_A — Гидроиспытание входной полости

max 175 МПа (узл.); [σ] = 142.5 МПа; шкала до 214



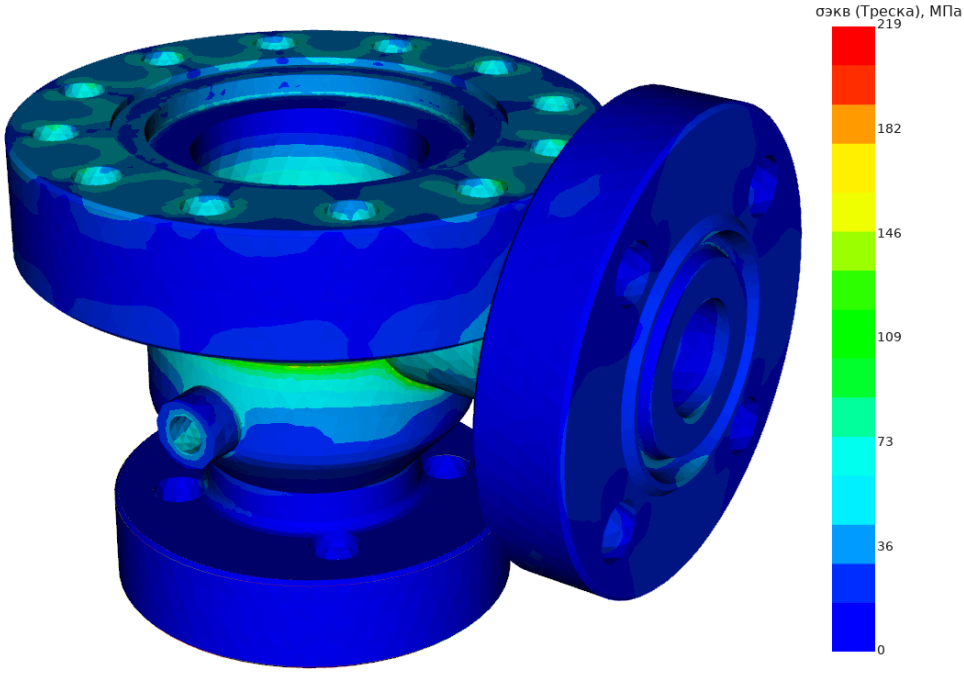
ISP_A — Гидроиспытание входной полости

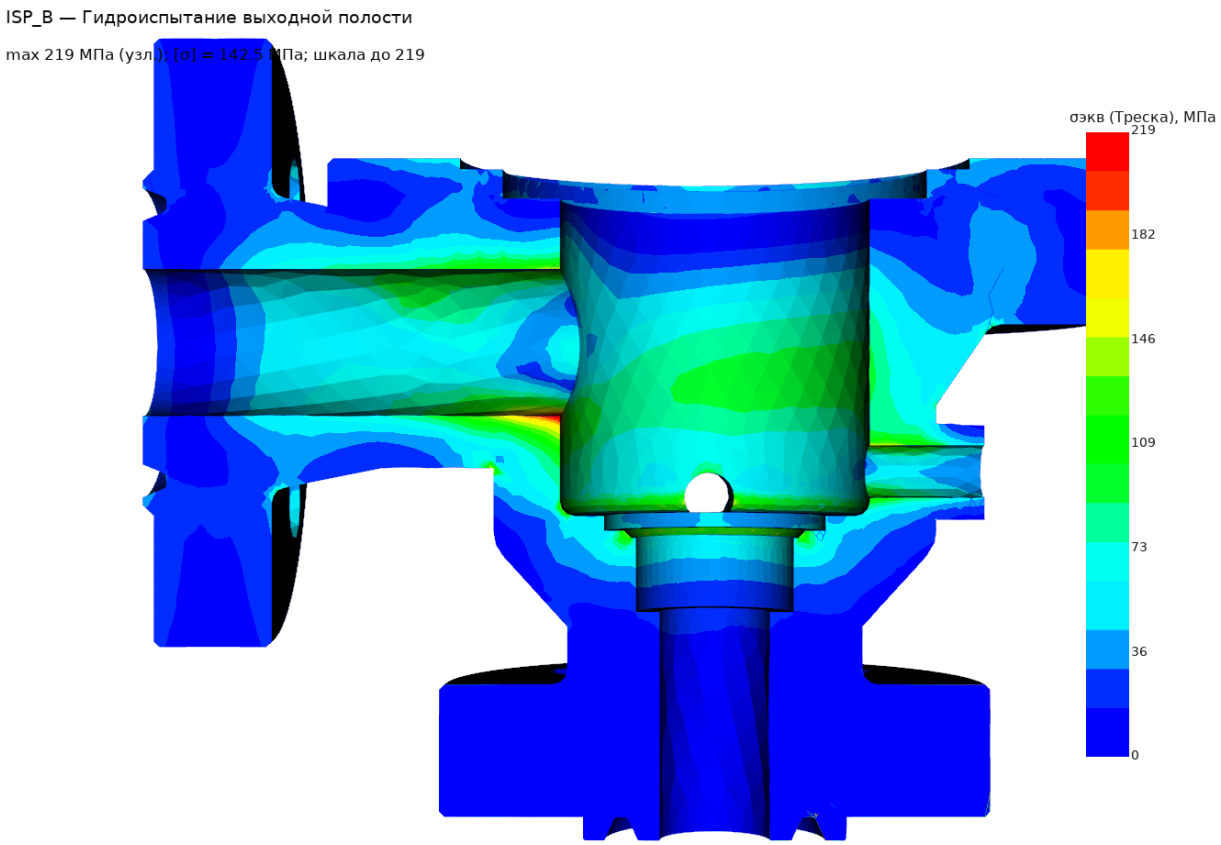
max 175 МПа (узл.); [σ] = 142.5 МПа; шкала до 214



ISP_B — Гидроиспытание выходной полости

max 219 МПа (узл.); [σ] = 142.5 МПа; шкала до 219

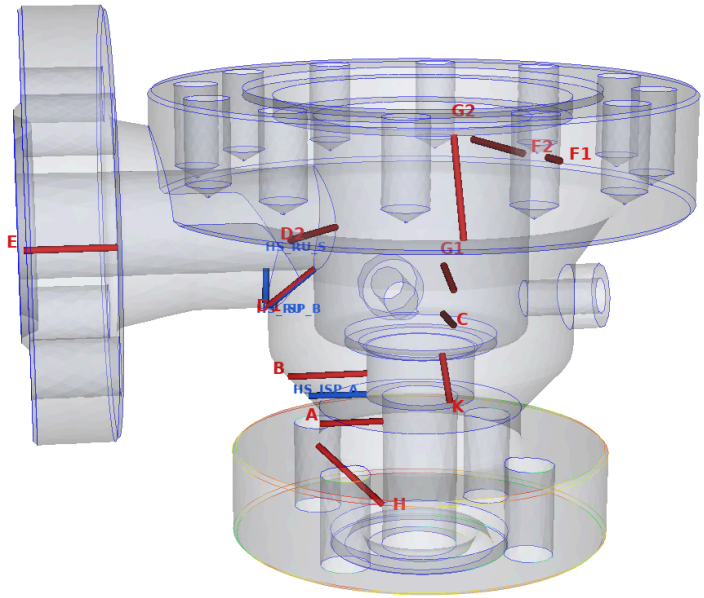




6.6. Линеаризация и оценка прочности по ГОСТ 34233.1 п. 8.10

Линеаризация по отрезку через толщину стенки (41 точка, интегрирование по Симпсону; напряжения в точках — по квадратичным функциям формы элемента от узловых значений ccx): σm = (1/t)∫σ dx, σи = (6/t²)∫σ·(t/2 − x) dx для всех шести компонент тензора; (σ)m = σ1 − σ3 тензора σm, (σ)m+(σ)и = max(σ1 − σ3) тензоров σm ± σи на концах отрезка (методика ASME VIII-2 прил. 5-А, согласуется с п. 8.10). Концы ЛКН — пересечение прямой с телом (ОСС), т. е. одинаковые на всех сетках.

Линии классификации напряжений: красные — заданные, синие — через зоны максимума σэкв



ЛКН

ЛКН	Сечение	t, мм	Категория	Обоснование категории
A	Стенка входной шейки Ø80/Ø30, Z = 52.2, +X	25,0	общие: σm ≤ [σ]; σm+σи ≤ 1,5[σ]	гладкая цилиндрическая стенка; мембранные — от давления и общего изгиба шейки моментом (первичные, общие); изгиб — в запас как первичный
B	Резьбовая зона сопла M45×2, Z = 72.0, +X	31,3	местные, изгиб первичный: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σи ≤ 1,5[σ]	зона передачи осевой силы сопла на корпус (местная нагрузка); изгиб кольца — первичный (уравновешивает силу сопла)
C	Стенка полости Ø84/ Ø120, Z = 105, +Y	18,0	общие: σm ≤ [σ]; σm+σи ≤ 1,5[σ]	гладкая стенка полости вне зон переходов
D1	Сопряжение выходного патрубка с корпусом — нижняя точка (плоскость XZ)	22,8	местные, изгиб краевой: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σиL ≤ 3[σ]	узел врезки патрубка (ГОСТ 34233.3 п. 4.7 → п. 8.10 ГОСТ 34233.1): мембранные — местные; изгиб в «шве» от давления — краевой эффект
D2	Сопряжение выходного патрубка с корпусом — боковая точка (Z = 135), +Y	30,6	местные, изгиб краевой: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σиL ≤ 3[σ]	то же, боковая точка сопряжения
E	Тарелка выходного фланца у ступицы (r = 46 от оси выхода), +Y	33,0	общие: σm ≤ [σ]; σm+σи ≤ 1,5[σ]	тарелка фланца: изгиб от шпилек фланца, давления и момента трубы — первичный; мембранные — как общие (в запас)
F1	Фланец разъёма: перемычка отверстие M20 — наружный диаметр (Z = 171, 105°)	8,4	общие: σm ≤ [σ]; σm+σи ≤ 1,5[σ]	перемычка фланца разъёма у резьбового отверстия: растяжение от распора витков и

ЛКН	Сечение	t, мм	Категория	Обоснование категории
				шпильки — как общее мембранное (в запас)
F2	Фланец разъёма: стенка полость — отверстие M20 (Z = 170, 105°)	37,4	общие: σm ≤ [σ]; σm+σи ≤ 1,5[σ]	кольцо фланца разъёма между полостью и отверстиями: изгиб кольца моментом шпильки–прокладки — первичный
G1	Переход стенки корпуса в ступицу фланца разъёма (Z = 118, острый угол), +Y	18,8	местные, изгиб краевой: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σиL ≤ 3[σ]	острый входящий угол перехода стенки в ступицу (без галтели): местные мембранные; изгиб — краевой
G2	Переход ступицы во фланец разъёма (галтель Ø150, Z = 140), +Y	39,1	местные, изгиб первичный: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σи ≤ 1,5[σ]	переход ступицы во фланец: изгиб от момента затяжки фланца — первичный (в запас)
H	Переход входной шейки в тарелку входного фланца (галтель, Z ≈ 42.4), +X	37,0	местные, изгиб первичный: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σи ≤ 1,5[σ]	переход шейки в тарелку входного фланца: местные мембранные; изгиб — первичный (момент трубы, в запас)
K	Дно полости корпуса (галтель Ø84, Z = 88), +Y	20,4	местные, изгиб первичный: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σи ≤ 1,5[σ]	дно полости (кольцевая пластина под давлением p_вых и силой сопла): изгиб — первичный
HS_RU	Зона максимума σэкв (RU), точка (42.0, 0.0, 115.0)	23,0	местные, изгиб краевой: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σиL ≤ 3[σ]	ЛКН через узел максимума σэкв (вне закреплений) по нормали к поверхности
HS_ISP_A	Зона максимума σэкв (ISP_A), точка (21.3, -2.1, 62.8)	22,9	местные, изгиб краевой: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σиL ≤ 3[σ]	ЛКН через узел максимума σэкв (вне закреплений) по нормали к поверхности
HS_ISP_B	Зона максимума σэкв (ISP_B), точка (42.0, 0.0, 115.0)	23,0	местные, изгиб краевой: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σиL ≤ 3[σ]	ЛКН через узел максимума σэкв (вне закреплений) по нормали к поверхности
HS_RU_S	Зона максимума σэкв (RU_S), точка (60.8, -3.8, 101.2)	14,0	местные, изгиб краевой: σmL ≤ 1,5[σ]; σmL+σиL ≤ 3[σ]	ЛКН через узел максимума σэкв (вне закреплений) по нормали к поверхности

РУ ([σ] = 104,53 МПа; сетка L1):

ЛКН	Кат.	(σ)m(L), МПа	доп.	(σ)m(L)+(σ)и, МПа	доп.	пик σэкв, МПа	запас n_min	Вывод
A	общ.	36,7	104,5	57,9	156,8	71	2,71	выполнено
B	мест., изг. перв.	37,2	156,8	65,7	156,8	83	2,39	выполнено
C	общ.	45,0	104,5	53,4	156,8	51	2,32	выполнено
D1	мест., изг. краев.	72,7	156,8	159,2	313,6	167	1,97	выполнено
D2	мест., изг. краев.	18,6	156,8	55,7	313,6	63	5,63	выполнено
E	общ.	5,9	104,5	16,5	156,8	16	9,51	выполнено
F1	общ.	17,7	104,5	31,9	156,8	37	4,92	выполнено
F2	общ.	16,3	104,5	41,0	156,8	47	3,83	выполнено
G1	мест., изг. краев.	52,7	156,8	81,4	313,6	94	2,97	выполнено

ЛКН	Кат.	(σ)m(L), МПа	доп.	(σ)m(L)+(σ)и, МПа	доп.	пик σэкв, МПа	запас n_min	Вывод
G2	мест., изг. перв.	18,1	156,8	50,4	156,8	85	3,11	выполнено
H	мест., изг. перв.	25,2	156,8	41,1	156,8	69	3,81	выполнено
K	мест., изг. перв.	26,2	156,8	45,6	156,8	74	3,43	выполнено
HS_RU	мест., изг. краев.	72,4	156,8	159,7	313,6	167	1,96	выполнено

Справочно, в запас (если считать изгиб в этих сечениях первичным): (σ)mL+(σ)и / 1,5[σ] = D1 — 1,02; D2 — 0,36; G1 — 0,52; HS_RU — 1,02.

РУ+С ([σ] = 104,53 МПа; сетка L1):

ЛКН	Кат.	(σ)m(L), МПа	доп.	(σ)m(L)+(σ)и, МПа	доп.	пик σэкв, МПа	запас n_min	Вывод
A	общ.	37,8	104,5	63,1	156,8	75	2,48	выполнено
B	мест., изг. перв.	37,7	156,8	66,2	156,8	83	2,37	выполнено
C	общ.	45,4	104,5	53,7	156,8	51	2,30	выполнено
D1	мест., изг. краев.	72,5	156,8	159,2	313,6	167	1,97	выполнено
D2	мест., изг. краев.	18,6	156,8	56,2	313,6	62	5,58	выполнено
E	общ.	5,9	104,5	16,5	156,8	16	9,51	выполнено
F1	общ.	17,7	104,5	31,9	156,8	37	4,92	выполнено
F2	общ.	16,3	104,5	40,9	156,8	47	3,83	выполнено
G1	мест., изг. краев.	53,0	156,8	81,6	313,6	94	2,96	выполнено
G2	мест., изг. перв.	18,2	156,8	50,4	156,8	85	3,11	выполнено
H	мест., изг. перв.	26,8	156,8	44,2	156,8	75	3,54	выполнено
K	мест., изг. перв.	26,8	156,8	47,0	156,8	76	3,34	выполнено
HS_RU_S	мест., изг. краев.	61,5	156,8	96,8	313,6	168	2,55	выполнено

Справочно, в запас (если считать изгиб в этих сечениях первичным): (σ)mL+(σ)и / 1,5[σ] = D1 — 1,02; D2 — 0,36; G1 — 0,52; HS_RU_S — 0,62.

ИСП-А ([σ] = 142,55 МПа; сетка L1):

ЛКН	Кат.	(σ)m(L), МПа	доп.	(σ)m(L)+(σ)и, МПа	доп.	пик σэкв, МПа	запас n_min	Вывод
A	общ.	35,0	142,5	67,1	213,8	86	3,19	выполнено
B	мест., изг. перв.	40,5	213,8	86,1	213,8	121	2,48	выполнено
C	общ.	22,7	142,5	27,4	213,8	26	6,27	выполнено
D1	мест., изг. краев.	36,3	213,8	81,1	427,6	91	5,27	выполнено
D2	мест., изг. краев.	24,8	213,8	62,4	427,6	76	6,85	выполнено
E	общ.	0,6	142,5	1,2	213,8	1	175,47	выполнено
F1	общ.	19,3	142,5	34,8	213,8	43	6,14	выполнено
F2	общ.	20,0	142,5	43,1	213,8	51	4,96	выполнено

ЛКН	Кат.	(σ)m(L), МПа	доп.	(σ)m(L)+(σ)и, МПа	доп.	пик σэкв, МПа	запас n_min	Вывод
G1	мест., изг. краев.	32,5	213,8	52,8	427,6	51	6,59	выполнено
G2	мест., изг. перв.	19,6	213,8	51,7	213,8	101	4,14	выполнено
H	мест., изг. перв.	23,2	213,8	41,5	213,8	46	5,15	выполнено
K	мест., изг. перв.	23,5	213,8	33,0	213,8	36	6,48	выполнено
HS_ISP_A	мест., изг. краев.	30,6	213,8	57,0	427,6	170	6,99	выполнено

Справочно, в запас (если считать изгиб в этих сечениях первичным): (σ)mL+(σ)и / 1,5[σ] = D1 — 0,38; D2 — 0,29; G1 — 0,25; HS_ISP_A — 0,27.

ИСП-Б ([σ] = 142,55 МПа; сетка L1):

ЛКН	Кат.	(σ)m(L), МПа	доп.	(σ)m(L)+(σ)и, МПа	доп.	пик σэкв, МПа	запас n_min	Вывод
A	общ.	5,5	142,5	8,2	213,8	11	25,84	выполнено
B	мест., изг. перв.	22,4	213,8	39,9	213,8	38	5,36	выполнено
C	общ.	50,8	142,5	63,3	213,8	62	2,81	выполнено
D1	мест., изг. краев.	93,7	213,8	199,1	427,6	218	2,15	выполнено
D2	мест., изг. краев.	21,9	213,8	61,6	427,6	66	6,94	выполнено
E	общ.	10,5	142,5	29,4	213,8	30	7,26	выполнено
F1	общ.	17,3	142,5	31,3	213,8	36	6,82	выполнено
F2	общ.	11,6	142,5	40,9	213,8	46	5,22	выполнено
G1	мест., изг. краев.	60,3	213,8	94,8	427,6	114	3,55	выполнено
G2	мест., изг. перв.	21,4	213,8	50,4	213,8	85	4,24	выполнено
H	мест., изг. перв.	3,3	213,8	3,7	213,8	4	58,23	выполнено
K	мест., изг. перв.	19,9	213,8	45,2	213,8	98	4,73	выполнено
HS_ISP_B	мест., изг. краев.	93,2	213,8	199,4	427,6	218	2,14	выполнено

Справочно, в запас (если считать изгиб в этих сечениях первичным): (σ)mL+(σ)и / 1,5[σ] = D1 — 0,93; D2 — 0,29; G1 — 0,44; HS_ISP_B — 0,93.

Сводка запасов (n = допускаемое / действующее, минимум по проверкам ф. (12)):

Вариант	[σ], МПа	min n	ЛКН	Вывод
РУ	104,53	1,96	HS_RU	прочность обеспечена
РУ+С	104,53	1,97	D1	прочность обеспечена
ИСП-А	142,55	2,48	B	прочность обеспечена
ИСП-Б	142,55	2,14	HS_ISP_B	прочность обеспечена

6.7. Собственные частоты сборки (сейсмостойкость)

Модель: корпус — объёмные элементы (сетка MOD), закрепление как в статике. Крышка с пружинным узлом, колпаком, рычагом и крепежом разъёма (поз. 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 24, 25; 32,86 кг, ЦМ (−3; −3; 319) мм) — жёсткое тело, связанное с плоскостью разъёма линейными уравнениями связи *EQUATION u = u_ц + θ×(x − x_ц) для 1476 узлов плоскости разъёма), с массой и тензором инерции, воспроизведёнными шестью

точечными массами в главных осях (погрешность тензора 0,000 %); мелочь < 10 г исключена (поз. 19 — 5 г, поз. 23 — 8 г). Сопло с втулкой, золотником и обтюратором (1,20 кг), направляющая (0,76 кг), стопорный винт и пробка — распределёнными массами на поверхностях посадки. Масса модели 59,2 кг (сборка по `out/cad/bom.json` — с корпусом). Обоснование жёсткого верхнего узла: крышка — толстостенная труба Ø130/Ø108 со фланцем 45 мм на 12 шпильках М20; её изгибная жёсткость до центра масс узла (консоль 134 мм, $k = 3EI/l^3$ = 1845820 Н/мм) в 31 раз выше эффективной жёсткости первой формы ($k = m_{эф}\cdot\omega^2$ = 59343 Н/мм), поэтому учёт податливости крышки понизил бы f1 лишь на ≈ 1,6 %.

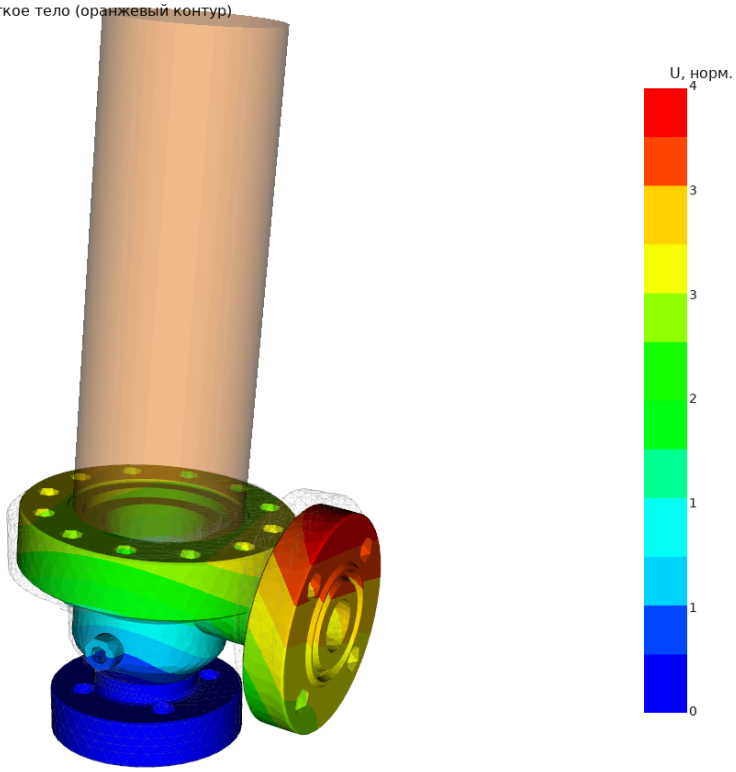
Форма	f, Гц (сетка MOD)	f, Гц (сетка MOD0)	Характер	Эфф. масса X / Y / Z, кг	доля от 59,2 кг, %
1	208,3	210,0	изгибная: качание верхнего узла вдоль X (поворот вокруг Y)	34,65 / 0,75 / 0,12	58,5 / 1,3 / 0,2
2	211,0	212,5	изгибная: качание верхнего узла вдоль Y (поворот вокруг X)	0,74 / 35,90 / 0,01	1,3 / 60,6 / 0,0
3	647,9	651,1	крутильная: поворот верхнего узла вокруг оси Z	0,01 / 1,23 / 0,00	0,0 / 2,1 / 0,0
4	1647,9	1663,2	продольная (вдоль оси Z)	5,46 / 0,05 / 36,29	9,2 / 0,1 / 61,3
5	1787,1	1799,6	изгибная: качание верхнего узла вдоль Y (поворот вокруг X)	4,95 / 8,61 / 4,57	8,4 / 14,5 / 7,7
6	1830,8	1844,2	продольная (вдоль оси Z)	6,60 / 5,05 / 10,45	11,1 / 8,5 / 17,6

Сходимость: f1 на сетках MOD0 и MOD различается на 0,83 %. Эффективные массы вычислены по диагональной (HRZ) матрице масс корпуса и массово-инерционным характеристикам верхнего узла (таблица участия ссх при связях через «узел поворотов» не используется).

Критерии «жёсткого» изделия: ГОСТ 30546.1 п. 5.1.4, 5.6 — отсутствие резонансов в диапазоне 1…30 Гц (тогда расчёт квазистатический с ускорением по таблице 1, без спектра ответа); ГОСТ 30546.2 п. 5.3 — динамические характеристики учитываются в диапазоне 1…35 Гц; распространённый в отраслевых нормах порог 33 Гц; ГОСТ 30546.2 п. 6.6.1 а) — при низшей частоте ≥ 45 Гц допускаются испытания методом 102-6 (`norm/06_sto_gazprom_seismic_tests.md`, разд. 2.4, 2.7). Низшая частота **f1 = 208,3 Гц** выше всех порогов (запас к 35 Гц — 6,0 раза): клапан — **жёсткое изделие**, сейсмический расчёт квазистатический (как принято в `out/calc/loads.json`: rigid = true).

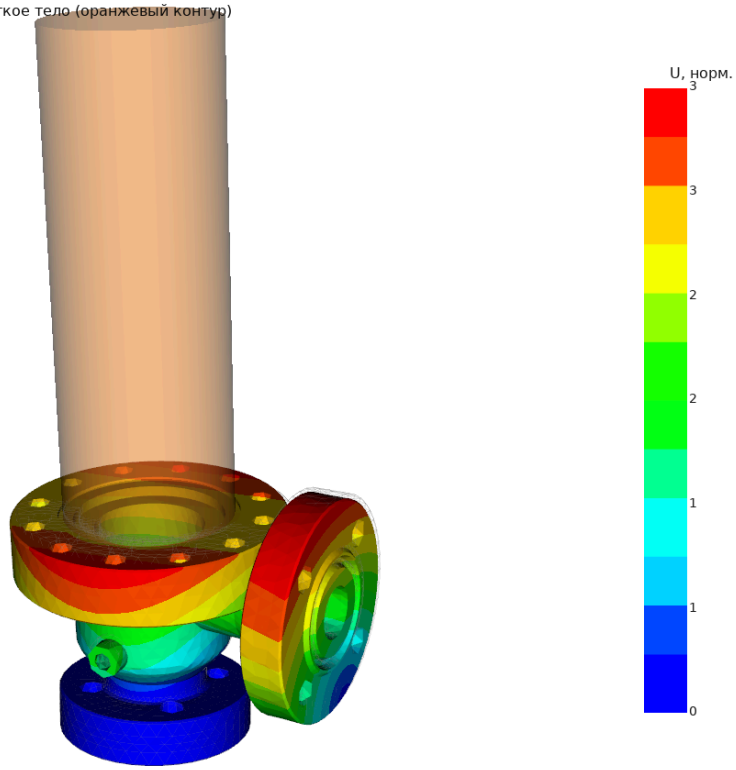
Форма 1: f = 208.3 Гц — изгибная: качание верхнего узла вдоль X (поворот вокруг Y)

масштаб перемещений ×4 (норм.); верхний узел — жёсткое тело (оранжевый контур)



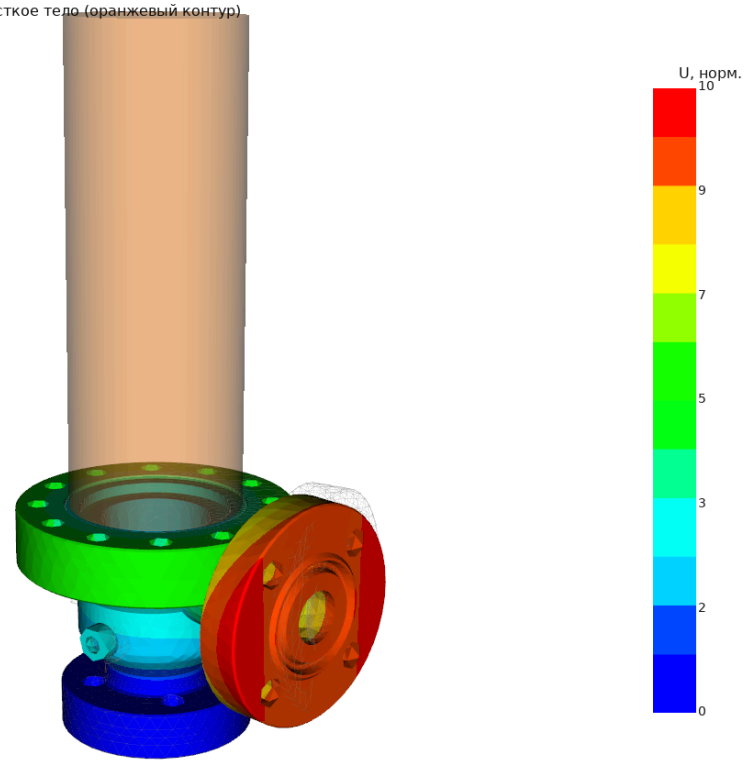
Форма 2: f = 211.0 Гц — изгибная: качание верхнего узла вдоль Y (поворот вокруг X)

масштаб перемещений ×4 (норм.); верхний узел — жёсткое тело (оранжевый контур)



Форма 3: f = 647.9 Гц — крутильная: поворот верхнего узла вокруг оси Z

масштаб перемещений ×4 (норм.); верхний узел — жёсткое тело (оранжевый контур)



6.8. Выводы

1. Сетка L1 (209827 узлов, 124712 элементов C3D10); изменение пиковых линеаризованных напряжений между сетками L0 и L1 — 1,0 %, по определяющим ЛКН — 2,1 % (< 5 %).
2. Условия прочности ГОСТ 34233.1 п. 8.10 ф. (12) по всем ЛКН выполнены; минимальные запасы: РУ — 1,96 (HS_RU); РУ+С — 1,97 (D1); ИСП-А — 2,48 (B); ИСП-Б — 2,14 (HS_ISP_B).
3. Низшая собственная частота сборки на входном фланце f1 = 208,3 Гц > 33 (35, 45) Гц — изделие жёсткое.
4. Замечания к геометрии (6.2) на прочность в пределах п. 8.10 не влияют, но острые входящие кромки литой поверхности (стык выходного патрубка и бобышек с корпусом, переход стенки в ступицу фланца на Z = 118) являются концентраторами и нетехнологичны для отливки — на чертеже следует задать литейные радиусы R ≥ 3…5 мм.

6.9. Допущения и ограничения

- Условно упругий расчёт (п. 4.5.7.1), малые перемещения; пластичность, контакт (сопло, прокладки, гайки) и трение не моделируются — контактные взаимодействия заменены распределёнными нагрузками заданной величины.
- Температура равномерная (100 °C для рабочих условий, 20 °C для испытаний) — температурных напряжений нет; переходные режимы (охлаждение газа при дросселировании до −14 °C в полости) на прочность литого корпуса не влияют, т. к. [σ] при t < 20 °C принимается как при 20 °C (п. 5.2).
- Резьбы — гладкие цилиндры по d1; нагрузка с витков распределена равномерно по длине свинчивания (реально — неравномерно, с максимумом на первых витках: местные пиковые напряжения у витков не оцениваются; прочность витков — в разделах 2 и 4).
- Нагрузка от шпилек крышки — из расчёта фланцевого соединения (ГОСТ 34233.4) без учёта податливости стыка; металлический контакт фланцев снаружи прокладки не моделируется (в запас для изгиба фланца).
- Опора по входному фланцу жёсткая (без податливости шпилек и ответного фланца): для частот это завышает жёсткость; при запасе f1/35 Гц ≫ 1 вывод о жёсткости не меняется.
- Реактивная сила струи и момент трубопровода выходного патрубка приложены одновременно (огибающая); при наличии опоры сбросной линии (ГОСТ 31294 п. 11.16.2) напряжения в шейке и у входного фланца меньше.

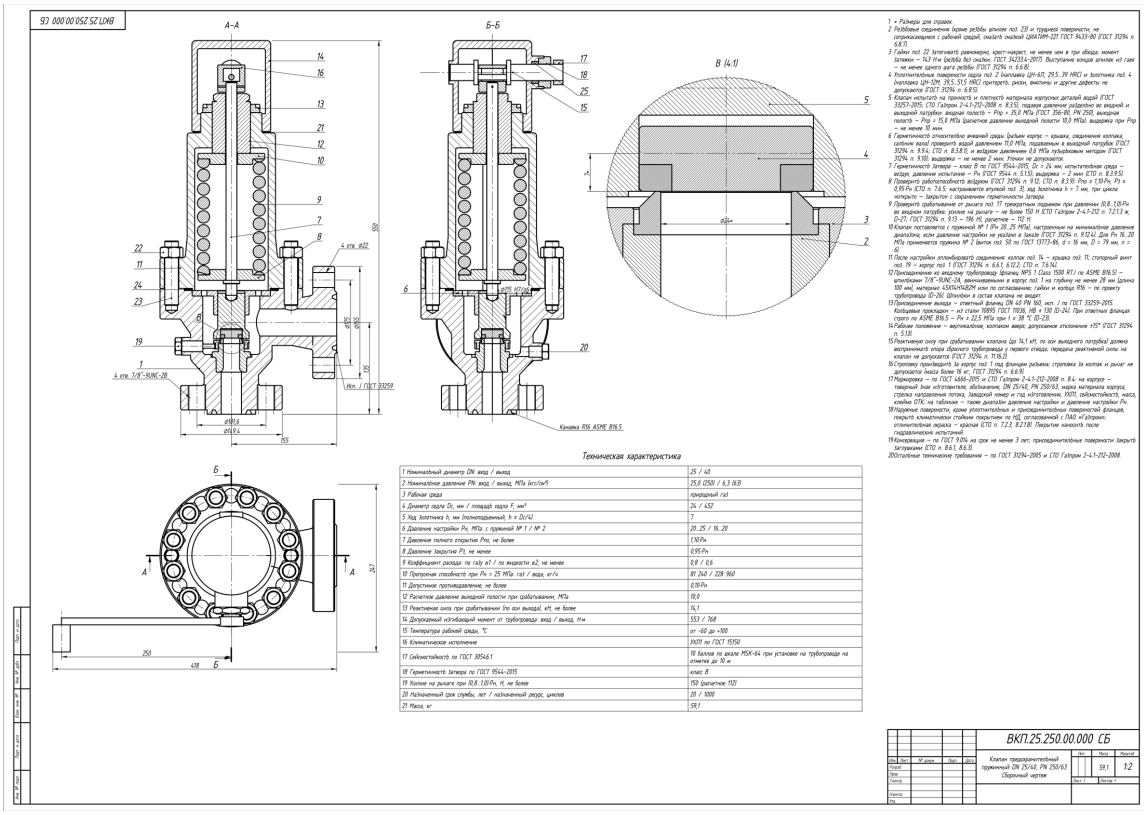
- Прибавки на коррозию/допуски литья не вычитались (номинальные размеры); при назначении прибавки с > 0 запасы уменьшаются примерно пропорционально толщине.
- Нагрузки от гидроиспытания приняты без реактивной силы и трубопроводных моментов (испытание на стенде с заглушками; торцевая сила заглушки выходного фланца учтена как $p \cdot \pi/4 \cdot D8^2$).

Файлы: `out/fea/results.json`; `out/fea/static_L1/static.inp|.frd|.dat`; `out/fea/modal/modal.inp|.frd|.dat`; `out/fea/mesh/*.msh`; рисунки `out/fea/img/` (mesh_iso, mesh_cut, stress_<вариант>_{iso,back,cut}, scl_front, scl_iso, mode1…3); поля `out/fea/vtk/*.vtk`.

7. Конструкторская документация (ЕСКД)

Чертежи генерируются из 3D-модели скриптом `drawings/make_drawings.py` (движок оформления по ЕСКД `drawings/sheet.py`): PDF, PNG и DXF в `out/drawings/`; сводный комплект — `out/drawings/ВКП.25.250.00.000_комплект.pdf`.

Документ	Файлы
ВКП.25.250.00.000 СБ — сборочный чертёж	`ВКП.25.250.00.000_СБ.pdf`
ВКП.25.250.00.000 — спецификация	`ВКП.25.250.00.000_спецификация.pdf`
ВКП.25.250.00.001 — корпус	`ВКП.25.250.00.001_корпус.pdf`
ВКП.25.250.00.002 — сопло	`ВКП.25.250.00.002_сопло.pdf`
ВКП.25.250.00.009 — пружина № 1	`ВКП.25.250.00.009_пружина.pdf`



Сборочный чертёж ВКП.25.250.00.000 СБ (уменьшено)

8. Заключение

Проверка	Показатель	Вывод
Функциональный расчёт (ГОСТ 12.2.085, 31294, 13764/13765, СТ ЦКБА 068)	20 проверок	выполнено
Прочность деталей под давлением (ГОСТ 34233.1–.3, Р 54522)	24 элементов × вариантов	выполнено
Фланец входа 1” Cl.1500 RTJ (ГОСТ 34233.4)	мин. запас 1.00 (при допускаемом моменте 553 Н·м; фланец корпуса при моменте	выполнено

Проверка	Показатель	Вывод
	трубы — 1.40)	
Фланец выхода DN 40 исп. J (ГОСТ 34233.4)	мин. запас 1.00 (при допускаемом моменте 768 Н·м; фланец корпуса при моменте трубы — 1.37)	выполнено
Разъём корпус–крышка (ГОСТ 34233.4)	мин. запас 1.11	выполнено
Входная шейка: наружное волокно, Треска (σm + изгиб от трубы и сейсмики)	20.1 / 104.5	выполнено
Входная шейка: внутреннее волокно, Треска (σm + σи по толщине)	65.5 / 156.8	выполнено
Резонансные частоты вне 1…30 Гц (жёсткое изделие)	208.3 / 30.0	выполнено
МКЭ корпуса, рабочие условия (ГОСТ 34233.1 п. 8.10)	мин. запас 1.96	выполнено
МКЭ корпуса, РУ + сейсмика (ГОСТ 34233.1 п. 8.10)	мин. запас 1.97	выполнено
МКЭ корпуса, испытание входа (ГОСТ 34233.1 п. 8.10)	мин. запас 2.48	выполнено
МКЭ корпуса, испытание выхода (ГОСТ 34233.1 п. 8.10)	мин. запас 2.14	выполнено
Низшая собственная частота сборки (МКЭ)	208 Гц	жёсткое изделие (> 30 Гц)
3D-модель: пересечения деталей (кроме условных резьб)	0	нет

Основные результаты. Спроектирован угловой полноподъёмный пружинный предохранительный клапан закрытого типа DN 25/40, PN 250/63 с узлом ручного подрыва; масса 59.1 кг. Пропускная способность по метану при Рн = 25 МПа — 81241 кг/ч (α1 = 0,8), по воде — 228958 кг/ч (α2 = 0,6). Пружины подобраны по ГОСТ 13764/13765/13773 (класс II, разряд 4, сталь 50ХФА). Все условия прочности по ГОСТ 34233.1–.4 и Р 54522 выполнены при принятых решениях (журнал D-01…D-28).

Вопросы, требующие решения заказчика (подробно — в журнале решений): 1. Накопленное давление в выходной полости при срабатывании ≈ 8.6 МПа при PN 63 выхода (следствие седла Ø24 при 25 МПа и выхода DN 40): полость, крышка и разъём рассчитаны на 10 МПа, ответный фланец выхода — PN 160; полный подъём при таком противодавлении подтверждается испытаниями опытного образца. Рекомендация — выход DN 50 (D-09, D-28). 2. Рейтинг ASME B16.5 Class 1500 для аустенитных сталей (248,2 бар при 38 °C) ниже PN 250: с ответными фланцами строго по ASME — Рн ≤ 22,5 МПа (D-23). 3. Требования СТО Газпром строже ГОСТ 31294: Рз ≥ 0,95·Рн, усилие на рычаге ≤ 150 Н (D-27); 10 баллов MSK-64 в нормах отсутствуют — принято удвоение ускорений (D-21); уровень установки клапана уточнить. 4. Реактивную силу при срабатывании (до 14.1 кН) должна воспринимать опора сбросного трубопровода (D-22).

Журнал проектных решений (D-NN)

Каждое решение: что принято → почему (норма/расчёт) → где отражено. Числа берутся из `valve/params.py`, `out/calc/*.json`; ссылки на нормы — на конспекты `norm/*.md` (там же — локальные сканы первоисточников).

№	Решение	Обоснование	Где отражено
D-01	Расчётная среда — природный газ (метан); проверочная жидкость — вода 20 °C	ТЗ: объекты ПАО «Газпром» (СТО Газпром 2-4.1-212-2008), заданы α1 (газ) и α2 (жидкость)	`calc/valve_calc.py` разд. 2.2
D-02	Расчётное давление входной полости 25,0 МПа (PN 250); максимальное давление настройки Рн = 25 МПа	ТЗ; ГОСТ 31294 табл. А.1: PN 250 — Рн 16…25 МПа (`norm/02_psv_standards.md` 2.3). Рейтинг фланца 1” Cl.1500 для аустенитных групп при 38 °C — 248,2 бар (`norm/01_flanges.md` разд. 3): соединение проверено расчётом по ГОСТ 34233.4	`params.DESIGN`, `calc/flange_calc.py`

№	Решение	Обоснование	Где отражено
D-03	Давление полного открытия Рпо = 1,10·Рн; Р1 — абсолютное	ГОСТ 12.2.085-2017 (Д.5; нормы превышения — `norm/02_psv_standards.md` 1.4)	`params.DESIGN["overpressure"]`
D-04	Температура среды −60…+100 °С; расчётная температура стенки 100 °С	УХЛ1 (нижнее значение −60 °С); газ на объектах — не выше 100 °С (принято); [σ] при t < 20 °С = [σ] при 20 °С (ГОСТ 34233.1 п. 5.2)	`params.DESIGN`, `calc/strength_calc.py`
D-05	Две пружины: № 1 — Рн 20…25 МПа (рабочая, на сборочном чертеже), № 2 — 16…20 МПа (с проставкой)	ГОСТ 31294 п. 9.12.4 (настройка на диапазон пружины); ход регулировочного винта на диапазон ≈ 9 мм	`out/calc/valve_calc.json` springs
D-06	Корпус и крышка — отливки 12Х18Н9ТЛ ГОСТ 977-88, группа 3, **100 % НК каждой отливки** → η = 0,8; альтернатива — поковка 12Х18Н10Т (расчёт по отливке консервативен)	ТЗ (12Х18Н9ТЛ/12Х18Н10Т); ГОСТ 34233.1 п. 8.3 (η = 0,8 при индивидуальном НК, иначе 0,7); ГОСТ 33260 табл. 2 — PN для 12Х18Н9ТЛ не ограничено (ограничения литья — св. 35 МПа, п. 5.2). ГОСТ 33259 табл. 11 рекомендует 12Х18Н9ТЛ для фланцев до PN 200 — но входной фланец выполнен по ASME B16.5, а прочность подтверждена расчётом	ТТ чертежа корпуса; `calc/strength_calc.py`
D-07	Плоское уплотнение «металл по металлу»: d0 = 24, ширина пояска b = 1,0 мм (Dm = 25)	СТ ЦКБА 068 табл. 11: q при F1 без давления 156 МПа ≤ 800 МПа (ЦН-6Л/ЦН-12М); узкий поясок — для герметичности притёртого затвора ПК	`params.SEAT`, расчёт 2.5
D-08	Схема «полное сопло»: сменное сопло-седло из поковки 12Х18Н10Т с наплавкой ЦН-6Л (≥ 6 мм после обработки), ввёрнуто в корпус (М45×2), уплотнение — металлический конус; регулировочная втулка на сопле со стопорным винтом; входной фланец — толщина 28,4 + выступ 6,35 под кольцо	Высокое давление 25 МПа действует только в сопле и шейке корпуса; наплавка на малой детали без подогрева > 2 кг (ГОСТ 33258 табл. 4); ремонтопригодность; ГОСТ 31294 п. 6.6.7 (вставное седло допускается)	`cad/build_model.py` поз. 2, 3, 20
D-09	**Выходная полость корпуса, крышка, колпак и разъём корпус–крышка рассчитаны на p_вых = 10 МПа** (накопленное давление при срабатывании); присоединение к сбросной линии — PN 63 по ТЗ; гидроиспытание выходной полости 15 МПа	Расчёт 2.3: при Рн = 25 МПа и седле Ø24 давление торможения в полости при полном расходе через патрубок Ø40 — 8,6 МПа (α1 = 0,8) … 9,7 МПа (α1 = 0,9) > PN 63. Рекомендация заказчику: выход DN 50 снизил бы Pb примерно в 1,5 раза; суммарное противодавление указать в ТУ (ГОСТ 31294 п. 7.5.2 в ред. Изм. № 3)	`out/calc/valve_calc.json` p_out_design
D-10	Пружины класса II, разряда 4 по ГОСТ 13764 из стали 50ХФА; F2/F1 ≈ 1,15; ограничения D1 ≤ 100 мм, n ≥ 4	Статическая длительно сжатая пружина — класс II (прил. 1 ГОСТ 13764); 50ХФА — ГОСТ 33260 табл. 11 «ПК при вибрации и пониженной температуре», −180…+250 °С; D1 — габарит крышки, n — точность настройки	`calc/valve_calc.py` spring_design
D-11	Герметичность затвора обеспечивается притиркой (Ra ≤ 0,16…0,32) и подтверждается испытанием по ГОСТ 9544; формула q_y	СТ ЦКБА 068 — стандарт на запорные клапаны: для ПК при 0,9·Рн остаточное удельное давление по определению мало (15,6 МПа); норма — класс	ТТ сборочного чертежа

№	Решение	Обоснование	Где отражено
	СТ ЦКБА 068 приведена справочно	герметичности по ГОСТ 9544 (ГОСТ 31294 п. 6.4 в ред. Изм. № 3)	
D-12	Разъём корпус–крышка: 12 шпилек М20 из 45Х14Н14В2М на Ø176, гайки 12Х18Н10Т, фланцы Ø210 × 36, прокладка СНП 116/120/134/136	Ø210 — предел по месту (гайки выходного фланца); ГОСТ 33260 табл. 4: 45Х14Н14В2М −70…600 °С, PN не регламентируется; КЛР той же группы, что у корпуса (п. 5.5: разница ≤ 10 %); 14Х17Н2 — только до PN 2,5 МПа	`params.BODY`, `calc/flange_calc.py`
D-13	Верхняя стенка крышки 22 мм, днище колпака 12 мм	ГОСТ 34233.2 разд. 7 (тип 9): требуется 16,8 мм (с силой пружины) и 8,7 мм соответственно (+ прибавки)	`calc/strength_calc.py`
D-14	Прибавки: отливки c = 1,0 мм, прокат/поковки c = 0,5 мм	Коррозионно-стойкие стали в природном газе — эрозия и технологические допуски (ГОСТ 34233.1 разд. 12)	`calc/strength_calc.py`
D-15	Толстостенные элементы ((s−c)/D > 0,3) — по ГОСТ Р 54522	ГОСТ 34233.2 п. 5.2.1 неприменим; Р 54522 п. 5.1 — логарифмическая формула (для p = 10 МПа — на границе области действия, используется как более строгий метод)	`calc/strength_calc.py`
D-16	Узел ручного подрыва: эксцентриковый вал (e = 7 мм, палец Ø8) в окне головки подъёма; зазор 9 мм (≥ h + 2); сальник — кольца ТРГ, нажимная втулка М42×1,5; рычаг 250 мм	ГОСТ 31294 п. 9.13: ≤ 196 Н при 0,8…1,0·Рн → расчёт 112 Н; п. 6.6.10 — герметичность узла подрыва	расчёт 2.6, поз. 14–19
D-17	Закрытая крышка (газ); отверстия в фланце направляющей выравнивают давление в крышке с полостью	ГОСТ 31294 п. 6.6.11 (клапаны закрытого типа герметичны относительно внешней среды)	поз. 6, 11
D-18	Обтюратор и шток — 14Х17Н2, направляющая — 12Х18Н10Т; тарелки, винт — 14Х17Н2; требование KCU 14Х17Н2 при −60 °С — в КД	СТ ЦКБА 057 табл. 5.2 (пара 14Х17Н2 — 08Х18Н10Т, 30 МПа, μ 0,2…0,3); ГОСТ 33260: 14Х17Н2 −70…350 °С; справочное падение KCU 14Х17Н2 ниже −50 °С (`norm/07` 6.5)	спецификация
D-19	Модель, расчёты и чертежи строятся скриптами (FreeCAD 1.1.4 Python API, headless); MCP-сервер FreeCAD (freecad-mcp 0.1.32) — для интерактивной работы и снимков	Воспроизводимость (требование заказчика): `make all` пересобирает всё из параметров	`Makefile`, `.mcp.json`
D-20	Пропускная способность газа — прямое интегрирование по изоэнтропе реального газа (ГОСТ 12.2.085 прил. Е.1), свойства — уравнение Пенга–Робинсона; метод с n = 1,30 — для сравнения	ГОСТ 12.2.085 табл. Д.2: при Tr ≈ 1,5 и Pr ≈ 6 (зона быстрого изменения n) рекомендуется омега-метод или прямое интегрирование; идеально-газовый расчёт занижает G на ~18 %	`calc/gas_pr.py`, расчёт 2.2
D-21	Сейсмика 10 баллов MSK-64: a_h = 20 м/с², a_v = 14 м/с² (5 м/с² × 2 (трубопровод) × 2 (9 → 10 баллов)); уровень установки 0…10 м	ГОСТ 30546.1 п. 5.6–5.8, 4.4.3, табл. 1; для 10 баллов в стандарте и СТО (до 9 баллов) нормы нет — удвоение на балл по шагу табл. 1 и прил. Д (`norm/06` разд. 2.5–2.6). Для	`calc/seismic_calc.py`

№	Решение	Обоснование	Где отражено
		отметок выше 10 м — пересчёт с коэффициентом табл. 1	
D-22	Внешние нагрузки на присоединения — изгибающий момент, равный несущей способности присоединяемой трубы ([σ]тр·Wтр: вход 1” XXS, выход 48,3 × 5,08), + сейсмика; **реактивную силу при срабатывании (до 14 кН) воспринимает опора сбросного трубопровода**	Реакция на плече до входной шейки дала бы момент, в 2,9 раза превышающий несущую способность самой входной трубы 1” XXS — схема без опоры невозможна независимо от клапана; ГОСТ 31294 п. 11.16.2 (крепление отводящего трубопровода от реактивной силы). Требование — в ТТ сборочного чертежа и РЭ	`out/calc/loads.json`, ТТ
D-23	Рейтинг входного фланца: Class 1500 для аустенитных групп ASME — 248,2 бар при ≤ 38 °C (204…221 бар при 100 °C) < PN 250. Соединение рассчитано по ГОСТ 34233.4 при 25 МПа / 100 °C с фланцем корпуса толщиной 36 мм (запас 1,41 при предельном моменте трубы); **в ТУ указать: при применении ответных фланцев строго по ASME B16.5 Рн ≤ 22,5 МПа при t ≤ 38 °C (Рпо = 1,1·Рн ≤ 248,2 бар)**, при Рн до 25 МПа — ответный фланец по расчёту	дайджест п. 7.1; `norm/01_flanges.md` разд. 3 (рейтинги, группы 2.1/2.4); `calc/flange_calc.py`: ответный WN по ГОСТ 34233.4 проходит при давлении (запас 1,22), но не при полном моменте трубы	ТУ, ТТ СБ
D-24	Кольцевые прокладки R-16 и 1-1-40-63 — из мягкого железа 10895 ГОСТ 11036 (НВ ≤ 130), в расчёте — как сталь 05кп (табл. И.1); твёрдость канавок корпуса ≥ 150 НВ	ГОСТ 34655 п. 5.8 (разность твёрдости фланца и прокладки ≥ 20 НВ), табл. 3 (10895: −60… 450 °C); кольцо из аустенита (≤ 150…160 НВ) не обеспечивает разности с литой аустенитной канавкой	ТТ, спецификация
D-25	Фланцы разъёма корпус–крышка: толщина 45 мм, ступицы — корпус Ø150 (от Z 118), крышка Ø136 × 30 (в зазоре до гаек М20)	ГОСТ 34233.4: при толщине 28/36 мм и гладких стенках 18/11 мм напряжения во фланцах превышали допускаемые (запас 0,55); затяжку определяет гидроиспытание полости 15 МПа	`params.BODY/BONNET`, `calc/flange_calc.py`
D-26	Входной фланец корпуса: тарелка 36 мм (≥ 28,4 по B16.5), **резьбовые отверстия 4 × 7/8”-9UNC-2B насквозь** (шпильки ввёртываются в корпус, гайки — на ответном фланце), шейка Ø80; выходной фланец: тарелка 32 мм (≥ 25 по табл. 7 ГОСТ 33259); **ответный фланец выхода — DN 40 PN 160 исп. J** (присоединительные размеры как у PN 63); **допускаемые изгибающие моменты от трубопровода: вход 553 Н·м, выход 768 Н·м**	Гайки 7/8” над фланцем ограничивали шейку Ø54 → фланец корпуса не проходил по ГОСТ 34233.4 (запас 0,63); резьба в отверстиях допускается ГОСТ 33259 п. 7.1 и ASME B16.34; при p_вых = 10 МПа ответный PN 63 перегружен (запас 0,85)	модель, `out/calc/flanges.json` allowable_moments, ТТ

№	Решение	Обоснование	Где отражено
D-27	Давление закрытия Рз ≥ 0,95·Рн (настройкой регулировочной втулки на стенде); усилие ручного подрыва ≤ 150 Н	СТО Газпром 2-4.1-212 п. 7.6.5 и п. 7.2.1.3 ж — строже ГОСТ 31294 (0,8·Рн; 196 Н); для полноподъёмного газового ПК Рз = 0,95·Рн — риск, подтверждается испытаниями	ТТ СБ, расчёт 2.6
D-28	**Противодавление:** динамическое противодавление неразгруженного ПК — не более 0,10·Рн (ГОСТ 12.2.085 табл. Б.1); собственное накопленное давление в полости корпуса при полном расходе ≈ 0,31·P1 (Pb/P1) — полный подъём при таком соотношении обеспечивается реакцией струи на обтюратор (камера подъёма) и **подлежит подтверждению испытаниями опытного образца** (ГОСТ 31294 п. 8.2); допустимое внешнее противодавление указывается в ТУ ≤ 0,1·Рн; рекомендация заказчику — выход DN 50	Следствие ТЗ (седло Ø24 при 25 МПа и выход DN 40); альтернативы — разгруженный (поршневой) затвор, увеличение выхода	ТУ, ТТ, отчёт разд. 2.3

Приложение В. Нормативные документы (локальные копии)

Скачанные первоисточники лежат в `norm/src/<группа>/<документ>/`, у каждого файла в `MANIFEST.tsv` — URL, дата загрузки и sha256; конспекты со ссылками на страницы — `norm/01…07_*.md`.

Группа	Документы (каталоги)
flanges	asme_b16_5_refs, gost24705-2004, gost33259-2015, gost34655-2020
gost34233_1-3	gost34233.1-2017, gost34233.2-2017, gost34233.3-2017, gost34233.4-2017, gost34233.6-2017, gost34283-2017, gostR54522-2011
gost34233_4	gost34233.4-2017, popravka_2023
materials	gost10051-75, gost20700-75, gost23304-78, gost25054-81, gost33258-2015, gost33260-2015, gost5632-2014, gost5949-2018, gost7350-77, gost9066-75, gost977-88, st_ckba_005.2-2004, st_ckba_010-2004, st_ckba_012-2005, st_ckba_014-2004, st_ckba_016-2005, st_ckba_053-2008, st_ckba_057-2008, st_ckba_060-2008, st_ckba_068-2008, st_ckba_073-2009
psv	gost12.2.063-2015, gost12.2.085-2017, gost31294-2005, gost33257-2015, gost9544-2015
springs	gost12.2.085-2017, gost13764-86, gost13765-86, gost13769-86, gost13773-86, gost13776-86, gost14959-2016, gost14959-79, gost16118-70, gost2.401-68, gost31294-2005, gost33260-2015, stckba030-2006, stckba044-2010, stckba052-2008
sto_seismic	gost15150-69, gost30546.1-98, gost30546.2-98, gost30546.3-98, gost33257-2015, gost34511-2018, gost356-80, gost9544-2015, gost_r_57546-2017, sp14.13330.2018, sto_gazprom_2-4.1-212-2008

Приложение А. Дайджест нормативных требований

Изделие: клапан предохранительный пружинный прямого действия, угловой, полноподъёмный; вход DN 25 PN 250 (фланец 1” Class 1500 RTJ, ASME B16.5), выход DN 40 PN 63 (ГОСТ 33259, исп. J); седло d0 = 24 мм; α1 ≥ 0,8, α2 ≥ 0,6; ручной подрыв; корпус 12Х18Н9ТЛ / 12Х18Н10Т; ЦН-6Л / ЦН-12М; УХЛ1; до 10 баллов MSK-64; СТО Газпром 2-4.1-212-2008.

Составлено 2026-11-23 по локальным копиям. Пути — от `norm/`. `pNNN.png` / `p-NN.png` — страница PDF-файла. Пометки: **[C]** — сверено со сканом при составлении дайджеста; **[K]** — взято из конспекта `norm/0x_*.md` (там указан скан); **[P]** — расчёт составителя; **НЕ ПОДТВ.** — нет подтверждения первоисточником. Подробности и цитаты — `norm/01_flanges.md`, `norm/02_psv_standards.md`, `norm/06_sto_gazprom_seismic_tests.md`.

0. Присоединения (сводка `norm/01_flanges.md`)

Параметр	Значение	Источник
Вход: NPS 1 Class 1500, O / tf / окружность болтов	149,4 (табл. мм 150) / **28,4** (без кольцевого выступа) / **101,6 мм**	01, п. 3.2 — wermac + Texas Flange [2×]
Вход: отверстия / шпильки / длина шпилек RTJ	4 × Ø25,4 / 4 × 7/8” / 5” (127; метрич. табл. 125 мм)	01, п. 3.2 [2×]
Вход: X (ступица) / Y (WN)	52,3 (52) / 73,2 (73) мм	01, п. 3.2 [2×]
Канавка R16: P / E / F / R / угол / K	50,80 / 6,35 / 8,74 / 0,8 мм / 23° / 71,5 (2-13/16” = 71,4) мм; выступ = E = 6,35	01, п. 3.3 [2×]; X ≈ 4 мм — **НЕ ПОДТВ.** ([P] 4,4 мм окт.)
Кольцо R-16 (B16.20): P / A / B овал / H окт. / C / R1	50,80 / 7,95 / 14,2 / 12,7 / 5,23 / 1,5 мм; ≤ 160 HB (S304/S316)	01, п. 3.4; ГОСТ 34655 табл. 1 «по [1]» **[П]**
Гайка 7/8” heavy hex: S / H	1-7/16” = 36,5 (35,4…36,5) / 55/64” = 21,8 (21,2…22,5) мм	01, п. 3.5 [2×]
Выход DN 40 PN 63 (ГОСТ 33259 тип 21, ряд 1): D / D1 / n × d / резьба / b	165 / 125 / 4 × 22 / M20 / 25 мм	01, п. 1.2–1.3 **[П]**
Выход, исп. J: D8 / D9 / b2 / h3 / h / угол	75 ± 0,15 / 88 js16 / 9 ± 0,2 / 6,5 +0,4 / 3 −1 мм / 23° ± 30′, R1,5	01, п. 1.5 **[П]**
Прокладка выхода (ГОСТ 34655, тип 1 овальная): D / A / R / h	75 / 8 / 4 / 14 мм	01, п. 2.3 **[П]**
Резьба M20 (P 2,5): d2 / d1 / d3	18,376 / 17,294 / 16,933 мм (прочие — 01, разд. 4)	ГОСТ 24705-2004 табл. 1, `src/flanges/gost24705-2004/pages/p-08.png` **[C]**
Рейтинг Class 1500, гр. 1.1, бар: −29…38 / 50 / 100 / 150 / 200 °C	255,3 / 250,6 / 233,0 / 225,4 / 219,0	01, п. 3.6 (wermac + engineeringtoolbox) [2×]
То же, гр. 2.1 / 2.2 / 2.4 (аустенит)	−29…38 °C: **248,2** (= 3600 psig, [2×]); 50…200 °C — [P]: 2.1: 239,1 / 204,3 / 185,2 / 171,5…172,5; 2.2: 240,6 / 210,9 / 192,4 / 178,4; 2.4: 242,6 / 220,6 / 204,8 / 191,5	01, п. 3.6 — метрические значения B16.5 для 2.x **НЕ ПОДТВ.**
Группы ASME	12Х18Н10Т ≈ F321 → **2.4** [2×]; 12Х18Н9ТЛ: Ti-стаб. литья в A351 нет; CF8 → 2.1 [2×], CF8C → 2.11 [1×] → принимать **2.1**	01, п. 3.7

1. ГОСТ 12.2.085-2017 (выбор и расчёт пропускной способности)

Требование	Значение	Пункт	Файл/страница
Давления Рн, Рно, Рпо, Рз, Рп, Рр, Р	**избыточные**	3.1, 3.4	`src/psv/gost12.2.085-2017/p007–p011` **[C]**
Р1 в формулах (прил. Д, Е)	**абсолютное: Р1 = Рпо + Ратм**; Р2 = Рп + Ратм; Ратм = 101 320 Па	3.4	`p011` **[C]**
Двухпозиционный ПК	подъём скачком в пределах 5 % Рн от Рно	3.1.14	`p009`
Рпо, не более	Рн < 0,3 МПа: Рн + 0,05 МПа; 0,3…6,0 МПа: **1,15·Рн**; **> 6,0 МПа: 1,1·Рн** (одинаково для газа и жидкости; иные — при соблюдении 5.1)	5.4, ф. (1)–(3)	`p017` **[C]**
→ наш ПК (Рн 16–25 МПа)	Рпо ≤ 1,1·Рн; Р1 = 1,1·Рн + 0,1013 МПа (при Рн = 25 МПа — 27,60 МПа абс.)	[P]	—
Рно и расчётное давление	Рно ≤ Р (Рраз); до 1,1·Р, если Р = Рр; табл. 3: Рн > Рр; Рпо ≤ Рав max; Рав max ≤ 1,1·Р (по API 520)	5.3, табл. 3	`p016`, `p017` **[C]**

Требование	Значение	Пункт	Файл/страница
Kt (если нет данных изготовителя)	1,000 (≤ 100 °C); 1,020 (100–250 °C); 1,025 (250–300 °C)	5.12	`p018` **[C]**
Стендовая настройка	Рн исп = Рн·Kt; неразгруж. ПК при пост. Рп ст: Рн исп = (Рн − Рп ст)·Kt	5.13	`p018`, `p019` **[C]**
Содержание ЭД	DN1/DN2, PN1/PN2, α1, α2, F, диапазон Рн, Рн/Рно, Рпо, Рз, Рп, Kt, t, среда	5.11	`p018` **[C]**
Подводящий трубопровод	Dвн ≥ Dвн входного патрубка; **ΔРвх ≤ 3 % Рн** при макс. расходе; иначе — проверка динамической устойчивости и учёт ΔРвх	8.2.1	`p021` **[C]**
Отводящий трубопровод	Dвн ≥ Dвн выходного патрубка; противодавление при макс. расходе ≤ допустимого по РЭ	8.2.2	`p021` **[C]**
Рп дин для неразгруж. двухпоз. ПК (табл. Б.1)	**≤ 0,10·Рн при Рпо ≤ 1,1·Рн**; ≤ 0,15·Рн при Рпо > 1,1·Рн; не рекомендуется при Рп ≥ 0,10·Рн (Рпо = 1,1Рн)	4.1.1, Б.3.3, табл. Б.1	`p013`, `p025` **[C]**
Разгруженные ПК	при Рп ≤ 50 % Рно; при переменном Рп — только разгруженные	4.1.3, 5.15	`p013`, `p019`
Крепление ПК и трубопроводов	расчёт со статическими нагрузками и **динамическими усилиями при срабатывании**	8.1.3	`p021` **[C]**
Реактивная сила	**формулы в стандарте нет**; по требованию заказчика величина при макс. расходе, подтверждённая расчётом, указывается в ТУ и ЭД	5.11	`p018` **[C]**
Принудительное открытие	обязательно для пружинных ПК; **при давлении ≥ 80 % Рн**; без него — только если недопустимо по среде (тогда проверка ≥ 1 раз в 6 мес)	6.3	`p019` **[C]**
Защита пружины	от недопустимого нагрева/ охлаждения и прямого воздействия среды (если оно постоянное)	6.4	`p019` **[C]**
Дренаж	удаление конденсата из мест скопления в корпусе и отводящих трубопроводах	6.5	`p019` **[C]**
Регулировки/пломбы	исключить выброс подвижных частей и произвольное изменение регулировок; пломбируемый ограничитель подъёма — по заказу (двухпоз.)	5.6, 6.7.1	`p017`, `p019`
Запрет	запорная арматура до и после ПК; регулирование давления ПК	5.10	`p018`
Связанные: ГОСТ 12.2.063-2015	превышение давления в сосуде: ≤ 15 % (0,3–6 МПа), **≤ 10 % (> 6 МПа)**; пропускная способность ≤ 1,4·Gав; принуд. открытие при 80 % Рн	8.4, 8.5, 6.2.4	`src/psv/gost12.2.063-2015/p014`, `p021` [K]

2. ГОСТ 31294-2005 (с Изм. 1–3) и ГОСТ 9544-2015

Требование	Значение	Пункт (редакция)	Файл/страница
Рпо	по ГОСТ 12.2.085 (разд. 1)	5.6 (Изм. 3)	`src/psv/gost31294-2005/p011`, `p039` [K]

Требование	Значение	Пункт (редакция)	Файл/страница
Рз	**≥ 0,8·Рн**	5.7 (Изм. 3)	`p011`, `p039` [К]
α1 полноподъёмного	**≥ 0,8** (среднеподъёмного ≥ 0,3); норматива α2 нет (по КД)	5.14, 5.18	`p012` [К]
Классификация по подъёму	малоподъёмный h ≤ dc/20; среднеподъёмный dc/20 < h < dc/4; **полноподъёмный h ≥ dc/4** → для d0 = 24: **h ≥ 6,0 мм**	3.1.34–3.1.36 (исх. ред.; исключены Изм. 3 → ГОСТ 24856 — **НЕ ПОДТВ.**)	`p009` [К]
Пределы Рн для PN 250	16–25 МПа (DN вх 10…50)	прил. А, табл. А.1	`p024` [К]
Фиксация Рно на стенде	хлопок / рост утечки / индикатор; перемещение ЗЭл ≤ 0,1 мм	9.12.1 (Изм. 3)	`p043` [К]
Ручной подрыв	З подъёма рычага, **усилие ≤ 196 Н (20 кгс)**, при **0,8–1,0·Рн** на входе; открытие рычагом, закрытие пружиной; затем утечка при Рн ≤ КД	9.13 (+ поправка, Изм. 3)	`p020`, `p004`, `p043` [К]
Уплотнение узла подрыва	герметично наружу; втулка сальника входит ≤ 30 % высоты, ≥ 2 мм; стыки колец под 90° ± 5°	6.6.10	`p013` [К]
Положение	вертикальное колпаком вверх, ± 15°; рычаг не должен давить на подвижные части	5.13	`p012` [К]
Пробные давления	по ГОСТ 356; Рпр входа и выхода — **раздельно** по PN входа и выхода; в ТТ чертежей	5.3, 3.1.15	`p011` [К]
Прочность/плотность	по ГОСТ 33257 (клапан в сборе — п. 8.5.6)	9.7, 9.8 (Изм. 3)	`p042` [К]
Плотность воздухом (газ)	ПСИ: **0,6 МПа** (для ПК > 0,6 МПа); периодические: PN (Рр); пузырьковый метод, пропуск не допускается	9.10	`p019`, `p020`, `p042` [К]
Герметичность затвора	**по ГОСТ 9544, класс — в КД**; испытание затвора и функционирования **воздухом** (газ)	6.4 (Изм. 3), 9.12.3	`p040`, `p042` [К]
ГОСТ 9544: давление для ПК	Рисп = **Рн** (или 0,9·Рно); норма — с заменой **DN на диаметр седла Dc**	табл. 1, 5.1.5	`src/psv/gost9544-2015/p010`, `p012` [К]
Класс А	отсутствие видимых утечек (вода и воздух)	табл. 2	`p011` **[С]**
Класс В: вода / воздух 0,6 МПа	**0,01·DN** мм³/с / **0,30·DN** мм³/с → DN 25: **0,25** / **7,5** мм³/с (0,015 / 0,45 см³/мин); Dc 24: 0,24 / 7,2	табл. 2	`p011` **[С]**, [Р]
Класс С: вода / воздух 0,6 МПа	**0,03·DN** / **3,00·DN** мм³/с → DN 25: **0,75** / **75** мм³/с (0,045 / 4,5 см³/мин); Dc 24: 0,72 / 72	табл. 2	`p011` **[С]**, [Р]
Воздух при Рисп = Рн в диапазоне PN 250	только классы А, АА, В; класс В, Dc 25: 250 мм³/с (15 см³/мин), Dc 24 ≈ 235 [Р]; АА: 150 (Dc 24 ≈ 141)	5.1.4, табл. Г.1, Г.2	`p012`, `p026`, `p031` [К]
Природный газ	допустимая утечка = утечка воздуха × 1,32	6.5	`p014` [К]

3. ГОСТ 356-80 и ГОСТ 33257-2015 (давления и испытания)

Требование	Значение	Пункт	Файл/страница
Табл. 10 ГОСТ 356 — марки	08Х18Н10Т, **12Х18Н10Т**, 12Х18Н12Т, … (ГОСТ 5632), литьё **10Х18Н9Л**, 14Х18Н4Г4Л (ГОСТ 977); **12Х18Н9Т и 12Х18Н9ТЛ не названы** — по	табл. 10, прим. 2	`src/sto_seismic/gost356-80/png/p-15.png`, `p-17.png` **[С]**

Требование	Значение	Пункт	Файл/страница
	прим. 2 (другие марки с не худшими свойствами)		
PN 63: Рпр / Рр при ≤ 200 °C / 300 °C	**9,50 МПа** (95 кгс/см²) / **6,30** / 5,40 МПа	табл. 10	`p-15.png` **[C]**
PN 250: Рпр / Рр при ≤ 200 °C / 300 °C	**35,00 МПа** (350 кгс/см²) / **25,00** / 23,00 МПа	табл. 10	`p-15.png` **[C]**
20…200 °C	первая графа табл. 10 — 200 °C, Рр = PN; для t ниже табличных — «по НТД»; первая ступень действует при t среды ≥ **−80 °C**	п. 6, прим. 4	`p-03.png`, `p-17.png` **[C]**; сводная ред. `meganorm_megadoc_gost356-80.txt`
Условия Рпр	вода 5…70 °C; отклонение ± 5 %; Рпр сверх таблицы — допускается	пп. 3, 11	`p-02.png`, `p-03.png` [OCR]
Пробное давление на нестандартные Рр	Рпр = K·Рр·[σ20]/[σ]; K = 1,5 (≤ 20 МПа), 1,4 (20–56), 1,3 (56–65), 1,25 (> 65)	п. 12, табл. 1	`p-03.png` [OCR]
ГОСТ 33257: давление испытаний корпуса (табл. 3)	прочность — вода **Рпр (Ph) по ГОСТ 356**; плотность — **PN (Рр)** водой; воздухом при PN > 0,6 МПа: **0,6 МПа (ПСИ)**, PN (Рр) — периодические	табл. 3	`src/sto_seismic/gost33257-2015/png/p-17.png` **[C]**
Затвор ПК (табл. 3)	вода или воздух при **Рн** или **0,9·Рно**	табл. 3	`p-18.png` **[C]**
Выдержка (табл. 4), **DN ≤ 50**	прочность/плотность: **15 с** до контроля + осмотр после снижения до PN (≥ 60 с); герметичность наружу: 15 с + ≥ 60 с; затвор: вода/воздух 60 с + контроль 15 с (класс А — ≥ 180 с)	табл. 4	`p-18.png` **[C]**
ПК с подачей под ЗЭл (наш) — раздельно вход/выход	ЗЭл закрыт пружиной и дополнительно поджат приспособлением (без смятия уплотнений); вода **Рпр вх** во вход; затем вода **Рпр вых** в выход	8.5.6.1	`src/sto_seismic/gost33257-2015/text_layout.txt` (PDF с. 20) [OCR]
→ для нашего ПК	**Рпр вх = 35,0 МПа (PN 250)**; **Рпр вых = 9,5 МПа (PN 63)**; плотность — 25,0 / 6,3 МПа	[Р] по ГОСТ 356 табл. 10	—
Рно при статическом испытании (если в КД нет иного)	Рн ≤ 0,3: Рн + 0,02 МПа; ≤ 6,0: 1,07·Рн; **> 6,0 МПа: Рно ≤ 1,05·Рн**	8.8.2.7, табл. 5	`p-26.png` **[C]**
Функционирование ПК	воздух (газ); утечка при Рн (или 0,9·Рно); Рно (статика); ход или α при Рпо и Рз (расходный стенд); 3 срабатывания	8.8.5.2–8.8.5.5	`p-27.png` **[C]**

4. СТО Газпром 2-4.1-212-2008 (применимые к ПК пункты)

Требование	Значение	Пункт	Файл/страница
Область	DN **50**–1400 → DN 25 вне области; применяется по требованию ТЗ; сейсмика в СТО — до **9** баллов	1, 5.6, 7.2.3.1	`src/sto_seismic/sto_gazprom_2-4.1-212-2008/png/p-06.png`, `p-26.png` [K]
Среда / t среды / t воздуха	природный газ, H_2S ≤ 1 мг/м³; −10…+80 °C (кратко 100 °C); холодный климат −60…+45 °C	5.1, 5.3, 5.5	`p-16.png`, `p-17.png` [K]
Превышение давления в сосуде	≤ 15 % (0,3–6 МПа), **≤ 10 % (> 6 МПа)**	7.6.1	`p-39.png` [K]
Пропускная способность	≤ 1,4·Gав; Рпо и расчёт — по ГОСТ 12.2.085	7.6.3, 7.6.4	`p-39.png` [K]

Требование	Значение	Пункт	Файл/страница
Закрытие	**при давлении ≥ 0,95·Рн**	7.6.5	`p-39.png` [К]
α полного подъёма	**≥ 0,8** при площади седла ≥ «0,65 %» площади входа [так в оригинале — опечатка?]	7.6.6	`p-39.png` [К]
Принуд. открытие / узел подрыва	при **80 % Рн**; уплотнение узла герметично наружу	7.6.7, 7.6.8	`p-39.png` [К]
Пружина	защита от нагрева/охлаждения и среды; поднастройка «+7 %» Рн без давления; пружины — ГОСТ Р 50753, ГОСТ 16118	7.6.9, 7.6.10, 7.2.2.10	`p-39.png`, `p-40.png` **[С]**, `p-26.png`
Настройка	исключить изменение без распломбирования и разборки; удлинённые шпильки для натяга пружины	7.6.14, 7.6.16	`p-40.png` **[С]**
Срок службы / ресурс	срок службы до списания **≥ 30 лет**; ресурс до списания **≥ 240 000 ч (1 500 циклов)**; **назначенный срок службы 20 лет**; **назначенный ресурс 1 000 циклов**; ВБР ≥ 0,95; Ког ≥ 0,9999	7.6.18	`p-40.png`, `p-41.png` **[С]**
Ударная вязкость	детали под давлением, силовые и **обеспечивающие сейсмопрочность**: при мин. t эксплуатации (**−60 °С** для УХЛ1) **KCU ≥ 30 Дж/см²** или **KCV ≥ 25 Дж/см²** (ГОСТ 9454); то же — металл швов	8.3.1.3, 8.3.2.8	`p-69.png` **[С]**, `p-70.png`
Контроль отливок	при **PN > 6,4 МПа** — обязательный НК (РК, УЗК) по ПНАЭ Г-7-025-90	8.3.1.1	`p-69.png` **[С]**
Контроль поковок/проката	при **PN > 10 МПа — УЗК 100 %**	8.3.1.2	`p-69.png` **[С]**
Твёрдость	измерять твёрдость уплотнительных поверхностей ЗЭл и седла; «металл по металлу» — ГОСТ 9013 (20–70 HRC); наплавка — РД РТМ 26-07-246-80; наплавочные материалы — ГОСТ 10051, ГОСТ 9466	8.3.2.2, 8.3.2.5, 8.3.2.6, 7.1.4.3	`p-70.png`, `p-22.png` [К]
Материалы	искробезопасность соударяющихся деталей; расчётная мин. t — абсолютный минимум района, если стенка может быть < 0 °С	7.1.1.3, 7.1.1.4	`p-20.png`, `p-21.png` [К]
Обязательные расчёты	прочность корпуса и основных элементов с нагрузками **сейсмическими, от трубопровода, от перепада давления**; пропускная способность (ГОСТ 12.2.085); сейсмостойкость **расчётом и испытаниями** (ГОСТ 30546.1/.2); показатели надёжности	7.2.1.3 б, 9.1.2, 7.6.4, 7.2.3.1, 6.3.2	`p-22.png`, `p-81.png`, `p-26.png` [К]
Пробные давления	по ГОСТ 356, в ТТ чертежей; прочность — вода Рпр попеременно во вход и выход, **выдержка ≥ 10 мин**; остановки через каждые 5 МПа при Рр > 10 МПа	7.2.2.3, 8.3.5.3–8.3.5.7	`p-25.png`, `p-72.png` [К]

Требование	Значение	Пункт	Файл/страница
Плотность / разъёмы	Рр, выдержка ≥ **2 мин** (DN ≤ 100); разъёмные соединения и сальники — **1,1·Рр**	8.3.6.2–8.3.6.3, 8.3.8.1	`p-73.png`, `p-74.png` [К]
Затвор и работоспособность ПК	**воздух**; утечка при Рн ≤ КД, **выдержка 2 мин** (DN ≤ 100); 3 цикла; Рз, ход/α при Рпо; подрыв — рычаг ≤ 20 кгс при (0,8–1)·Рн; класс герметичности СТО **не задаёт**	8.3.9.3–8.3.9.8, 8.2.2.11	`p-75.png`–`p-77.png` [К]
Наружная герметичность	утечки не допускаются	10.1, 9.1.3	`p-82.png`, `p-81.png` [К]
Покрытия / окраска	заводское климатостойкое покрытие на весь срок; ПК — **красный** (изменение — по согласованию)	7.2.3.5, 7.2.3.7, 8.2.1.8	`p-26.png`, `p-27.png`, `p-63.png` [К]
Маркировка	ГОСТ 4666; для DN < 50 — когда установлено ТУ/КД (для DN ≥ 50: материал, PN, DN, УХЛ1, **сейсмостойкость**, масса, стрелка, клеймо ОТК, зав. №)	8.4.1, 8.4.2, 8.4.7	`p-77.png`–`p-79.png` [К]
Документация	паспорт (α и площадь, к которой отнесён; назначенные показатели; материалы; НК; ПСИ), РЭ (отказы, предельные состояния), упаковочный лист; на русском	8.5.3, прил. Б	`p-79.png`, `p-86.png`, `p-87.png` [К]
Приёмка	приёмочные испытания опытных образцов; дополнительно — на стенде ОАО «Газпром»; периодические — ≥ 1 раз в 3 года; консервация ≥ 3 лет	8.1.1, 8.1.13, 8.2.3.2, 8.6.1	`p-60.png`–`p-63.png`, `p-80.png` [К]
Манометры	класс ≤ 1,5; измеряемое — во 2-й трети шкалы	8.2.5.2	`p-68.png` [К]
Проушины	при массе > 16 кг	7.2.1.16	`p-24.png` [К]

5. Сейсмостойкость (ГОСТ 30546.1-98 с Изм. 1; ГОСТ 30546.2-98)

Параметр	Значение	Пункт	Файл/страница
Коэффициенты уровня (табл. 1, Изм. 1)	9 баллов: **1** (0–10 м и ниже 0), 2 (> 10–35 м), 2,5 (> 35–70 м); 8 б.: 0,5 / 1 / 1,25; 7 б.: 0,25 / 0,5 / 0,6; **10 баллов в таблице нет**	4.2, табл. 1	`src/sto_seismic/gost30546.1-98/png/p-25.png` **[С]**
Ускорение «жёсткого» изделия (без резонансов 1–30 Гц)	**5 м/с² (0,5 g)** горизонт. для 9 баллов, отм. 0; × коэффициент табл. 1 (интерполяция допускается)	5.6, 5.7	`p-12.png` **[С]**
Вертикаль	**0,7** от горизонтали	5.8 (и 4.2)	`p-12.png` **[С]**
9 баллов, отм. 0 и до 10 м	**гориз. 5,0 / верт. 3,5 м/с²**; > 10–35 м: 10,0 / 7,0	[Р] из 5.6–5.8, табл. 1	—
10 баллов, отм. 0 и до 10 м	**10,0 / 7,0 м/с²** (×2 к 9 баллам; > 10–35 м: 20 / 14) — **экстраполяция, НЕ ПОДТВ., согласовать с заказчиком**	06, п. 2.6	`norm/06_…md`
ПК на трубопроводе (промежуточная конструкция)	×**2** при отсутствии резонансов трубопровода в 1–30 Гц: 9 б. → 10 / 7; 10 б. → 20 / 14 м/с² (отм. 0–10 м)	4.4.3 (Изм. 1)	`p-28.png` [К]
Спектр ответа (рис. 2), демпф. 5 %	10 м/с² на 2–10 Гц, линейно до **4 м/с² (ЭПУ) при 30 Гц**; 2 % — 16, 1 % — 20 м/с² на плато	рис. 2	`p-10.png`, `crops/fig2_*` [К]

Параметр	Значение	Пункт	Файл/страница
Спектр воздействия (рис. 1)	2,5 м/с² на 2–10 Гц, 1 м/с² при 30 Гц; A_в = 0,25·A_от(5 %)	рис. 1, В.1	`p-26.png`, `p-37.png` [К]
Коэффициент динамичности	**β = 2,5** на плато (точка перегиба 10 Гц), **β = 1 при 30 Гц**	Е.3.2	`p-56.png` [К]
Критерий «жёсткого» изделия	нет собственных частот в **1–30 Гц** (расчёт без испытаний допускается для изделий без приборов — 5.2); метод 102-6 — при низшей частоте ≥ **45 Гц**	5.1.4, 5.2, 5.6; ГОСТ 30546.2 п. 6.6.1	`p-11.png`, `p-12.png`; `gost30546.2-98/png/p-10.png` [К]
Сочетание направлений	**одновременно вертикаль + одна горизонталь** (наиболее жёсткое направление) + рабочие нагрузки; по формам — √Σσ²	5.5, 5.12 (3)	`p-12.png` **[С]**, `p-13.png`
Нагрузка	эквивалентная статическая сила = ускорение × масса, в центре масс	5.9	`p-12.png` **[С]**
Критерий прочности	**статические** прочностные характеристики материалов (5.13); допускаемые напряжения ГОСТ 30546.1 **не задаёт** — по нормам расчёта изделия	5.13	`p-13.png` [К]
Демпфирование (табл. 2)	сварные: 1 / 2 / 4 %; сборочные узлы 1 / 2 / 7 %; трубы ≤ 300 мм 1 / 1 / 2 % (при 0,25 / 0,5 / 1,0 σт)	5.11	`p-12.png` **[С]**
Воздействие	≡ синусоидальная вибрация **1 мин**; в местах крепления	4.1 (Изм. 1)	`p-23.png` [К]
Запись в ТУ	«… ___ баллов MSK-64 при установке над нулевой отметкой ___ м» — уровень установки запросить у заказчика	прил. Г	`p-19.png`, `p-46.png` [К]

6. ГОСТ 15150-69, исполнение УХЛ1

Параметр	Значение	Источник
Рабочая температура воздуха: верхняя / нижняя	**+40 / −60 °С**	табл. 3, `src/sto_seismic/gost15150-69/png/p-09.png` **[С]**
Предельная рабочая: верхняя / нижняя	**+45 / −70 °С**	табл. 3, `p-09.png` **[С]**
Расчётная минимальная t стенки (СТО 7.1.1.3)	абсолютный минимум района, если стенка может быть < 0 °С → испытания KCU/KCV при −60 °С (СТО 8.3.1.3)	`sto…/png/p-20.png`, `p-69.png`

7. Противоречия и риски

1. **Рейтинг входного фланца.** Class 1500 для аустенитных групп при −29…38 °С = **248,2 бар < 25 МПа (PN 250)**; при 100 °С ≈ 204 (гр. 2.1) … 221 (гр. 2.4) бар; Рпо = 1,1·Рн = 27,5 МПа его превышает. Нужно: ограничить Рн по рейтингу (при 38 °С и Рпо ≤ рейтинга: Рн ≤ 22,6 МПа — [Р]) либо обосновать фланец расчётом (ГОСТ 34233.4) и согласовать.
2. **12Х18Н9ТЛ для фланцев — до PN 200** (ГОСТ 33259 табл. 11, рекомендуемая), вход PN 250. ГОСТ 356 табл. 10 не называет 12Х18Н9Т/12Х18Н9ТЛ (только 12Х18Н10Т, 10Х18Н9Л) — применение по прим. 2 через равенство свойств.
3. **Аналог 12Х18Н9ТЛ в ASTM отсутствует** (Ti-стабилизированного литья в A351 нет); рейтинг B16.5 — «по аналогу» (принять гр. 2.1); метрические рейтинги B16.5 для групп 2.х локально **не подтверждены** двумя источниками (даны [Р] из psig).
4. **Рз:** СТО 7.6.5 — **≥ 0,95·Рн** против ГОСТ 31294 5.7 — ≥ 0,8·Рн; для полноподъёмного газового ПК (дисбаланс ≤ 5 %) — конструктивный риск (регулировочная втулка, испытания).

5. **Рно:** ГОСТ 33257 табл. 5 — Рно ≤ 1,05·Рн при Рн > 6 МПа (статика); при Рпо ≤ 1,1·Рн это оставляет ≤ 5 % на подъём.
6. **Сейсмика 10 баллов:** нет ни в СТО (до 9), ни в ГОСТ 30546.1 (табл. 1 — 5…9 баллов), ни в СП 14 (7–9). Принятое ×2 — вывод, не норма; уровень установки и «промежуточная конструкция» (×2) — запросить у заказчика. СТО требует подтверждения **расчётом и испытаниями**, ГОСТ 30546.1 п. 5.2 допускает только расчёт — действует более строгое (СТО).
7. **Время выдержки:** СТО — прочность ≥ 10 мин, плотность ≥ 2 мин, затвор 2 мин; ГОСТ 33257 табл. 4 (DN ≤ 50) — 15 с / 60 с — применять СТО.
8. **Область СТО:** DN 50–1400; DN 25 — вне области, СТО применяется только по ТЗ; по умолчанию СТО для PN > 200 — фланцы ГОСТ 9399, а не ASME (зафиксировать в ТУ).
9. **Опечатки СТО:** «0,65 %» площади входа (7.6.6) и поднастройка «+7 %» (7.6.10) — трактовки **НЕ ПОДТВ.**, согласовать.
10. **Усилие на рычаге:** ГОСТ 31294 9.13 и СТО 8.3.9.8 — ≤ 196 Н (20 кгс); СТО 7.2.1.3 ж — ≤ 150 Н для ручных приводов → консервативно проектировать рычаг на ≤ 150 Н.
11. **Ударная вязкость литья:** ГОСТ 977 не нормирует KCU при −60 °С для 12Х18Н9ТЛ (KCU ≥ 59 Дж/см² только при +20 °С) — норму KCU ≥ 30 / KCV ≥ 25 Дж/см² при −60 °С вписать в КД и подтверждать испытаниями (детали под давлением, крепёж, сейсмонесущие).
12. **Твёрдость RTJ:** кольцо S304/S316 до 160 НВ; ГОСТ 34655 п. 5.8 требует фланец твёрже прокладки на ≥ 20 НВ — для литой аустенитной канавки не гарантировано (контроль твёрдости или мягкое кольцо с учётом коррозии/−60 °С).
13. **Класс герметичности затвора** СТО не задаёт; при испытании воздухом на Рн в диапазоне PN 250 по ГОСТ 9544 допустимы только А, АА, В — выбрать в КД (рекомендуемо В или АА; для газа ×1,32).
14. **Реактивная сила:** методики в ГОСТ 12.2.085 нет, а расчёт крепления с динамическими усилиями обязателен (8.1.3; ГОСТ 12.2.063 8.10) — нужна внешняя методика (API 520 ч. II / ISO 4126-9 — локально **не скачаны**).
15. **Окраска:** СТО — ПК красного цвета, исключения для нержавеющего корпуса нет — согласовать.
16. **Опечатки ГОСТов:** ГОСТ 12.2.085 табл. Б.1 «≥ 0,10·Рн» для «на ЗЭл, крит.» (по смыслу ≤ βкр·Р1); ГОСТ 33257 8.8.5.3 «давления закрытия Рно».
17. **Неподтверждённое по фланцу Class 1500:** X ≈ 4 мм, допуски канавки, резьба 7/8”-9 UNC, длина шпилек 125 мм vs 5” — см. `norm/01_flanges.md`, разд. 5.

Приложение Б. Воспроизводимость

Все результаты пересобираются из исходных данных командами (корень проекта):

```
make tools      # FreeCAD 1.1.4 AppImage (SHA256 сверяется), ezdxf, venv (vtk-osmesa, freecad-mcp 0.1.32)
make all        # calc → cad → fea → drawings → report
make test       # тесты расчётных модулей ГОСТ 34233
make gui        # FreeCAD GUI + MCP: загрузка модели, снимки
```

Версии: FreeCAD 1.1.4 | OCC 7.8.1 | numpy 1.26.4 | scipy 1.16.3; CalculiX 2.23; gmsh 4.15.0; pandoc 3.1.3. Источник истины параметров — `valve/params.py` (проектные решения) и `valve/norms.py` (выписки из ГОСТ со ссылками на локальные сканы `norm/src/...`); конспекты нормативных документов — `norm/01…07_*.md`; журнал решений — `docs/02_decisions.md`.