

A photograph of a large industrial chemical plant with various towers, pipes, and scaffolding under a clear blue sky. The text is overlaid on this image.

**В. П. Миронов, С.В. Натареев, И. В. Постникова**

# **Расчет и проектирование машин и аппаратов химических производств**

**Алгоритмы и программы расчета**

**Учебное пособие**

**Иваново - 2015**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Ивановский государственный химико-технологический университет

В.П. Миронов, С.В. Натарева, И.В. Постникова

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИН И АППАРАТОВ  
ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ  
Алгоритмы и программы расчета**

Учебное пособие

Иваново 2015

УДК 66.002.5.0012.(07)

Миронов В.П., Расчет и проектирование машин и аппаратов химических производств. Алгоритмы и программы расчета, : учеб. пособие / В.П. Миронов, С.В. Натарева, И.В. Постникова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - Иваново, 2015. - 181 с.

В учебном пособии рассмотрены наиболее распространённые конструкции технологического оборудования из стали и пластических масс для химических производств и теоретические основы их расчета на прочность, устойчивость и долговечность. Приводятся алгоритмы расчета, на основании которых выполнены прочностные и проверочные расчеты емкостного и колонного оборудования с применением системы Mathcad 15.

Предназначено для бакалавров, магистров, обучающихся по направлению «Технологические машины и оборудование», а также для аспирантов и научных сотрудников, занимающихся проектированием и расчетом аппаратов химических производств.

Табл. 2. Ил. 16. Библиогр.: 16 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

доктор технических наук Е.Н. Калинин (Ивановский государственный политехнический университет);

доктор технических наук В.П. Жуков (Ивановский государственный энергетический университет).

© Миронов В.П., Натарева С.В., Постникова И.В., 2015

©ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-

технологический университет», 2015

## Оглавление

Введение	4
Основные технические величины и их условное обозначение	6
Глава 1. Требования к технологическому оборудованию и готовой продукции	12
1.1. Общие положения	12
1.2. Показатели качества продукции	14
1.3. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением ПБ 03-576-03 (выписка)	15
1.4. Нормативная документация на расчет сосудов и аппаратов	32
Глава 2. Горизонтальные аппараты	35
2.1. Типы горизонтальных аппаратов	35
2.2. Расчет горизонтального аппарата с кольцами жесткости	36
Глава 3. Колонные аппараты	67
3.1. Типы колонных аппаратов	67
3.2. Расчет колонного аппарата	67
Глава 4. Аппараты высокого давления	102
4.1. Типы аппаратов высокого давления	102
4.2. Расчет аппарата высокого давления	105
Глава 5. Аппараты из пластических масс	133
5.1. Изготовление аппаратов из стеклопластика	133
5.2. Расчет тарельчатой колонны	137
Список литературы	164
Приложение	166

## Введение

Проектирование безотходных химико-технологических и пищевых производств с использованием уникального высокопроизводительного оборудования (например, центробежных и поршневых компрессоров и насосов, крупногабаритных массообменных колонн и аппаратов высокого давления, мощных гидравлических и механических прессов, высокоскоростных центрифуг, шнековых, винтовых и червячных машин, печей и котлов для сжигания газообразного и твердого топлива), его изготовление, монтаж и эксплуатация требует высоких знаний как в области фундаментальных, так и прикладных наук.

Химико-технологические процессы, как правило, протекают при высоких относительных скоростях движения взаимодействующих фаз (газовой, жидкой и твердой) и температурах от  $-180^{\circ}\text{C}$  до  $5000^{\circ}\text{C}$  в условиях, меняющихся от глубокого вакуума и до высоких давлений  $50\text{-}500\text{ МН/м}^2$ . Оборудование при этом подвержено коррозионному и эрозионному износу, внутреннему или наружному давлению, осевой сжимающей силе от веса аппарата и среды, заполняющей его, изгибающим моментам от эксцентрично расположенных нагрузок, ветровой и сейсмической нагрузок, явлению ползучести при высоких температурах, воздействию малоциклового нагружения от механических, гидравлических, аэродинамических и тепловых нагрузок.

В данном пособии, опираясь на теоретические и экспериментальные исследования и большой опыт эксплуатации химико-технологических и биохимических сосудов и аппаратов, мы постарались познакомить будущих инженеров с правилами конструирования и основами расчета конструктивных элементов типовых сосудов и аппаратов.

Современные сведения по основам конструирования и методики прочностных расчетов корпусов машин и аппаратов, алгоритмы и программы расчетов колонных аппаратов, аппаратов высокого давления и горизонтальных

емкостных аппаратов, позволяют осуществить более полное освоение студентами базовых учебных дисциплин.

Сведения по основам расчета и конструирования машин и аппаратов, технологическим машинам и оборудованию химических и нефтехимических производств, компрессорам, насосам, холодильному оборудованию, технологическим машинам и оборудованию пищевых производств, обеспечат более качественную подготовку бакалаврских квалификационных работ, курсовых и дипломных проектов специалистов и магистерских диссертаций, и могут быть использованы для самостоятельной работы студентов дневного и заочного обучения.

Данное пособие построено по единому принципу изложения материала:

- краткие сведения о конструктивных особенностях оборудования;
- алгоритм расчета данного типа оборудования с учетом действия основных нагрузок;
- программа и пример расчета данного аппарата в системе Mathcad.

## Основные технические величины и их условное обозначение

Наименование технических величин, принятых в тексте и расчетах, их единицы измерения, условное обозначение и обозначение в Mathcad сведены в табл. 1. В табл. 2 приведены индексы, уточняющие эти величины.

Таблица 1

Наименование технических величин и их условное обозначение

Наименование величины	Единица измерения	Условное обозначение	Обозначение в Mathcad
1	2	3	4
Высота	м	H	H
Высота дельтообразного обтюратора	м	$h_0$	$h_0$
Давление	МПа	p	p
Диаметр	м	D, d	D, d
Давление допустимое	МПа	[p]	$p_{доп}$
Коэффициент запаса прочности	-	n	n
Коэффициент линейного расширения	$\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$	$\alpha_T$	$\alpha_T$
Коэффициент, учитывающий тангенциальные напряжения, возникающие в шпильке при ее затяжке	-	$k_4$	$k_4$
Коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки между шпильками	-	$k_5$	$k_5$
Коэффициент динамичности	-	$\beta$	$\beta$

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Коэффициент неравномерности сжатия грунта	$\frac{MН}{м^3}$	$C_{\phi}$	$C_{\phi}$
Коэффициент прочности сварного шва	-	$\varphi$	$\varphi$
Коэффициент Пуассона	-	$\mu$	$\mu$
Количество нагружений	шт	N	N
Коэффициент учета типа сварных соединений	-	$\xi$	$\xi$
Коэффициент, учитывающий местные напряжения	-	$\eta$	$\eta$
Масса	кг	m	m
Модуль упругости	МПа	E	E
Момент инерции	$м^4$	J	J
Момент изгибающий	Н·м	M	M
Момент сопротивления	$м^3$	W	W
Напряжение	МПа	$\sigma$	$\sigma$
Напряжение допустимое	МПа	$[\sigma]$	$\sigma_{доп}$
Напряжение допустимое из условия прочности	МПа	$[\sigma]_{\delta}$	$\sigma_B$
Нагрузка	Н	P	P
Объем	$м^3$	V	V
Относительные координаты центров тяжести	-	$\alpha$	$\alpha$



1	2	3	4
Поправочный коэффициент	-	$\eta$	$\eta$
Плотность	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho$	$\rho$
Площадь	$\text{м}^2$	S	S
Прибавка	м	C	C
Разность температур	$^{\circ}\text{C}$	$\Delta t$	$\Delta t$
Радиус	м	R, r	R, r
Длина	м	L, l	L, l
Сейсмический коэффициент	-	$K_c$	$K_c$
Сила	МПа	F	F
Сила тяжести	Н	G	G
Скорость	м/с	w	w
Температура	К, $^{\circ}\text{C}$	T, t	T, t
Толщина стенки	м	s	s
Угол конусности уплотнительной поверхности крышки и корпуса затвора	град	$\alpha_k$	$\alpha_k$
Ширина	м	b	b

## Индексы

Наименование	Обозначение	Обозначение в Mathcad
1	2	3
Аппарат	А	А
Болт	б	б
Верхний	верх	верх
Внутренний	вн	вн
Вода	в	в
Газ	г	г
Гидроиспытания	г.и	г.и
Днище	д	д
Допустимый	доп	доп
Корпус	к	к
Коррозия	-	кор
Крышка	кр	кр
Кольцо	кол	кол
Максимальный	max	max
Нижний	низ	низ
Наружный	н	н
Обечайка	об	об
Опора	оп	оп

Продолжение табл. 2

1	2	3
Обтюратор	о	о
Поверхность	п	п
При заданном значении температуры: 20 °С 360 °С и т.п.	-	при 20 град при 360 град
Прочность при заданном значении температуры: 20 °С 360 °С и т.п.	$\frac{20}{A}$ $\frac{360}{A}$	В при 20 град В при 20 град
Стандартный	гост	гост
Эксплуатации	экс	экс
Рабочее	раб	раб
Реактор	р	р
Расчетное значение	расч	расч
Рубашка	руб	руб
Средний	ср	ср
Стенка	ст	ст
Текучесть при заданном значении температуры: 20 °С 360 °С и т.п.	$\frac{20}{T}$ $\frac{360}{T}$	T при 20 град T при 360 град
Фланец	ф	ф
Фундамент	фун	фун

1	2	3
Цилиндрический	ц	ц
Шпилька	ш	ш
Штуцер	штуц	штуц
Эквивалентный	экв	экв
Эффективный	эф	эф
Текучесть при заданном значении температуры: $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ и т.п.	$\frac{20}{T}$ $\frac{360}{T}$	$T$ при 20 град $T$ при 360 град

Обозначения, имеющие частное применение, объяснены в соответствующих местах текста учебного пособия.

# **Глава 1. Требования к технологическому оборудованию и готовой продукции**

Проектируя новые аппараты и сосуды или решая вопрос о возможности использования существующего оборудования, конструктор соответственно должен определить тип, конструктивные размеры аппарата, подобрать нужный материал и определить толщину стенки, обеспечивающую достаточную прочность и устойчивость или рассчитать допустимые внутреннее и наружное давления на стенки аппарата [1, 2].

Проектирование, изготовление и эксплуатация сосудов и аппаратов, работающих под давлением (избыточным) выше  $0,07 \text{ МН/м}^2$  ( $0,7 \text{ кг/см}^2$ ), должно осуществляться в соответствии с нормами ГОСГОРТЕХНАДЗОРа РФ. Расчетные формулы норм являются итогом преобразования теоретических формул мембранных напряжений с учетом практики эксплуатации оборудования. При проектировании надо придерживаться стандартных рядов давлений, емкостей, базовых длин и внутренних диаметров.

Основы конструирования и способы изготовления элементов сосудов изложены в литературе [1 - 11].

## **1.1. Общие положения [2]**

1. Требования технологические: обеспечивающие выполнение технологических процессов, оптимальных режимов переработки; законы, формы, скорости и траектории движения рабочих органов; физико-химических свойств сырья и продуктов.

2. Техничко-экономические показатели оборудования – оптимальные размеры, площадь, расход энергии, воды, пара, вес и минимальная себестоимость на единицу производительности.

3. Высокая износостойкость рабочих органов, высокая долговечность, повышенный срок службы.

4. Возможность передачи движения машине, ее отдельным частям и рабочим органам от индивидуальных приводов электродвигателей или гидромоторов.

5. Надежная герметизация и рациональное перемещение аспирируемых объемов паро-газовых смесей.

6. Составление аппаратов и машин из отдельных, легко соединяемых блоков; обеспечение функционально-узлового принципа компоновки агрегата, минимальной номенклатуры комплектующих изделий.

7. Эксплуатационные - обеспечивающие простоту управления и обслуживания, предусмотрение мер сигнализации опасных режимов работы, появления взрыво- и пожароопасных ситуаций, нарушения герметичности и т.п.; выполнение мероприятий и установку устройств для безопасного прекращения процессов.

8. Техники безопасности и охраны окружающей среды, обеспечивающие пожаро- и взрывобезопасные условия ведения технологического процесса и очистку вредных компонентов в газовых выбросах и сточных водах до норм предельно допустимых выбросов.

9. Товарные [потребительские], обеспечивающие соответствующий вид продукции.

10. Экономические, требующие минимально возможных затрат времени, труда и материальных средств на разработку, изготовление и эксплуатацию агрегата, минимальную его стоимость после освоения в производстве.

11. Унификация и нормализация деталей и сборочных единиц, применение экономичных профилей деталей.

12. Автоматизация контроля и регулирования технологических процессов.

13. Статическое и динамическое уравнивание быстровращающихся деталей и рабочих органов, совершающих возвратно-поступательные или вращательные движения; предупреждение вибраций опор и перекрытий, чрезмерного износа подшипников.

14. Не допускать превышения норм по шумам, заменяя ударные действия механизмов безударными, возвратно-поступательными, равномерно-вращательными; применять для защиты от вибраций амортизаторы из упругих материалов, обеспечивать снижение уровня шума, включая помещение машин в звукозащитные кожуха.

15. Техническое совершенство и высокое качество аппаратов и машин, обеспечивающее их патентноспособность.

## **1.2. Показатели качества продукции**

Согласно ГОСТу 16431-70 «Качество продукции. Показатели качества и методы оценки уровня качества продукции» приняты следующие группы показателей:

1. Показатели назначения.
2. Показатели надежности.
3. Показатели технологичности.
4. Эргономические показатели.
5. Эстетические показатели.
6. Показатели стандартизации и унификации.
7. Патентно-правовые показатели.
8. Экономические показатели.

### **1.3. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением ПБ 03-576-03 (выписка)**

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 03-576-03) (далее - правила) утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 11.06.2003 г. № 91, зарегистрированным Министерством юстиции Российской Федерации 19.06.2003 г., регистрационный № 4776.

#### **Проектирование**

Проекты сосудов и их элементов (в том числе запасных частей к ним), а также проекты их монтажа или реконструкции должны выполняться специализированными организациями.

Руководители и специалисты, занятые проектированием, изготовлением, реконструкцией, монтажом, наладкой, ремонтом, диагностикой и эксплуатацией сосудов, должны быть аттестованы на знание Правил в соответствии с Положением о порядке подготовки и аттестации работников организаций, осуществляющих деятельность в области промышленной безопасности опасных производственных объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России, утвержденным постановлением Госгортехнадзора России\* от 30.04.2002 г. № 21, зарегистрированным Минюстом России 31.05.2002 г., регистрационный № 1706.

При проектировании сосудов, используемых в химических отраслях промышленности, должны учитываться требования общих правил промышленной безопасности для организаций, осуществляющих деятельность в области промышленной безопасности опасных производственных объектов, утвержденных постановлением Госгортехнадзора России от 18.10.2002 г. № 61-А, зарегистрированным Минюстом России 28.11.2002 г., регистрационный № 3968.



Отступление от Правил может быть допущено лишь в исключительном случае по разрешению Госгортехнадзора России. Для получения разрешения необходимо представить Госгортехнадзору России соответствующее обоснование, а в случае необходимости - также заключение специализированной или экспертной организации. Копия разрешения на отступление от настоящих Правил должна быть приложена к паспорту сосуда.

## **Конструкция сосудов**

### **Общие требования**

Конструкция сосудов должна обеспечивать надежность и безопасность эксплуатации в течение расчетного срока службы и предусматривать возможность проведения технического освидетельствования, очистки, промывки, полного опорожнения, продувки, ремонта, эксплуатационного контроля металла и соединений.

Для каждого сосуда должен быть установлен и указан в паспорте расчетный срок службы с учетом условий эксплуатации.

Устройства, препятствующие наружному и внутреннему осмотрам сосудов (мешалки, змеевики, рубашки, тарелки, перегородки и другие приспособления), должны быть, как правило, съемными.

Конструкции внутренних устройств должны обеспечивать удаление из сосуда воздуха при гидравлическом испытании и воды после гидравлического испытания.

Сосуды должны иметь штуцера для наполнения и слива воды, а также для удаления воздуха при гидравлическом испытании.

На каждом сосуде должны быть предусмотрены вентиль, кран или другое устройство, позволяющее осуществлять контроль за отсутствием давления в сосуде перед его открыванием; при этом отвод среды должен быть направлен в безопасное место.

Расчет на прочность сосудов и их элементов должен производиться по

НД, согласованной с Госгортехнадзором России. Сосуды, предназначенные для работы в условиях циклических и знакопеременных нагрузок, должны быть рассчитаны на прочность с учетом этих нагрузок.

Конструкция сосудов, обогреваемых горячими газами, должна обеспечивать надежное охлаждение стенок, находящихся под давлением, до расчетной температуры.

### **Люки, лючки, крышки**

Сосуды должны быть снабжены необходимым количеством люков и смотровых лючков, обеспечивающих осмотр, очистку и ремонт сосудов, а также монтаж и демонтаж разборных внутренних устройств.

Сосуды с внутренним диаметром более 800 мм должны иметь люки, а с внутренним диаметром 800 мм и менее - лючки.

Внутренний диаметр круглых люков должен быть не менее 400 мм. Размеры овальных люков по наименьшей и наибольшей осям в свету должны быть не менее 325×400 мм.

Внутренний диаметр круглых или размер по наименьшей оси овальных лючков должен быть не менее 80 мм.

Крышки люков должны быть съемными. На сосудах, изолированных на основе вакуума, допускаются приварные крышки.

Крышки массой более 20 кг должны быть снабжены подъемно-поворотными или другими устройствами для их открывания и закрывания.

### **Днища сосудов**

В сосудах применяются днища: эллиптические, полусферические, торосферические, сферические неотбортованные, конические отбортованные, конические неотбортованные, плоские отбортованные, плоские неотбортованные.

### **Сварные швы и их расположение**

При сварке обечаек и труб, приварке днищ к обечайкам должны применяться стыковые швы с полным проплавлением.

Допускаются сварные соединения в тавр и угловые с полным проплавлением для приварки плоских днищ, плоских фланцев, трубных решеток, штуцеров, люков, рубашек.

Применение нахлесточных сварных швов допускается для приварки к корпусу укрепляющих колец, опорных элементов, подкладных листов, пластин под площадки, лестницы, кронштейны и т.п.

Сварные швы должны быть доступны для контроля при изготовлении, монтаже и эксплуатации сосудов, предусмотренного требованиями Правил, соответствующих стандартов и технических условий.

Продольные швы смежных обечаек и швы днищ сосудов должны быть смещены относительно друг друга на величину трехкратной толщины наиболее толстого элемента, но не менее чем на 100 мм между осями швов.

Указанные швы допускается не смещать относительно друг друга в сосудах, предназначенных для работы под давлением не более 1,6 МПа (16 кгс/см<sup>2</sup>) и температуре стенки не выше 400 °С, с номинальной толщиной стенки не более 30 мм при условии, что эти швы выполняются автоматической или электрошлаковой сваркой и места пересечения швов контролируются методом радиографии или ультразвуковой дефектоскопии в объеме 100%.

При приварке к корпусу сосуда внутренних и внешних устройств (опорных элементов, тарелок, рубашек, перегородок и др.) допускается пересечение этих сварных швов со стыковыми швами корпуса при условии предварительной проверки перекрываемого участка шва корпуса радиографическим контролем или ультразвуковой дефектоскопией.

В случае приварки опор или иных элементов к корпусу сосуда расстояние между краем сварного шва сосуда и краем шва приварки элемента должно быть не менее толщины стенки корпуса сосуда, но не менее 20 мм.

В горизонтальных сосудах допускается местное перекрытие седловыми

опорами кольцевых (поперечных) сварных швов на общей длине не более  $0,35\pi D$ , а при наличии подкладного листа - не более  $0,5\pi D$ , где  $D$  - наружный диаметр сосуда. При этом перекрываемые участки сварных швов по всей длине должны быть проверены методом радиографии или ультразвуковой дефектоскопии. Перекрытие мест пересечения швов не допускается.

В стыковых сварных соединениях элементов сосудов с разной толщиной стенок должен быть обеспечен плавный переход от одного элемента к другому путем постепенного утонения кромки более толстого элемента. Угол наклона поверхностей перехода не должен превышать  $20^\circ$ .

Если разница в толщине соединяемых элементов составляет не более 30% толщины тонкого элемента и не превышает 5 мм, то допускается применение сварных швов без предварительного утонения толстого элемента. Форма швов должна обеспечивать плавный переход от толстого элемента к тонкому.

При стыковке литой детали с деталями из труб, проката или поковок необходимо учитывать, что номинальная расчетная толщина литой детали на 25-40% больше аналогичной расчетной толщины стенки элемента из труб, проката или поковок, поэтому переход от толстого элемента к тонкому должен быть выполнен таким образом, чтобы толщина конца литой детали была не менее расчетной величины.

### **Расположение отверстий в стенках сосудов**

Отверстия для люков, лючков и штуцеров должны располагаться, как правило, вне сварных швов.

Допускается расположение отверстий:

- на продольных швах цилиндрических и конических обечаек сосудов, если номинальный диаметр отверстий не более 150 мм;
- на кольцевых швах цилиндрических и конических обечаек сосудов без ограничения диаметра отверстий;
- на швах выпуклых днищ без ограничения диаметра отверстий при

условии 100% проверки сварных швов днищ методом радиографии или ультразвуковой дефектоскопии.

На торосферических (коробовых) днищах допускается расположение отверстий только в пределах центрального сферического сегмента. При этом расстояние от центра днища до наружной кромки отверстия, измеряемое по хорде, должно быть не более  $0,4D$  ( $D$  - наружный диаметр днища).

### **Материалы**

Для изготовления, монтажа и ремонта сосудов и их элементов должны применяться основные материалы, приведенные в нормативных документах Госгортехнадзора.

Применение плакированных и наплавленных материалов допускается для изготовления сосудов, если материалы основного и плакирующего слоев указаны в нормативных документах Госгортехнадзора.

При выборе материалов для сосудов, предназначенных для установки на открытой площадке или в неотапливаемых помещениях, должна учитываться абсолютная минимальная температура наружного воздуха для данного района.

Качество и свойства материалов и полуфабрикатов должны удовлетворять требованиям соответствующих стандартов и технических условий и подтверждаться сертификатами поставщиков. При отсутствии или неполноте сертификата или маркировки изготовитель сосуда (ремонтная, монтажная организация) должен провести все необходимые испытания с оформлением их результатов протоколом дополняющим или заменяющим сертификат поставщика материала. В сертификате должен быть указан режим термообработки полуфабриката в организации-изготовителе.

Применение электросварных труб с продольным или спиральным швом допускается по стандартам или техническим условиям, согласованным со специализированной организацией, при условии контроля шва по всей длине радиографией, ультразвуковой или другой равноценной им дефектоскопией.

Каждая бесшовная или сварная труба должна проходить гидравлическое испытание. Величина пробного давления при гидроиспытании должна быть указана в НД на трубы. Допускается не производить гидравлическое испытание бесшовных труб, если они подвергаются по всей поверхности контролю физическими методами (радиографией, ультразвуковым или им равноценным).

Плакированные и наплавленные листы и поковки с наплавкой должны подвергаться ультразвуковому контролю или контролю другими методами, обеспечивающими выявление отслоений плакирующего (наплавленного) слоя от основного слоя металла, а также несплошностей и расслоений металла поковок.

Углеродистая и низколегированная листовая сталь толщиной более 60 мм, предназначенная для изготовления сосудов, работающих под давлением свыше 10 МПа ( $100 \text{ кгс/см}^2$ ), должна подвергаться полистному контролю ультразвуковым или другим равноценным методом дефектоскопии.

Поковки из углеродистых, низколегированных и легированных сталей, предназначенные для работы под давлением свыше 6,3 МПа ( $63 \text{ кгс/см}^2$ ) и имеющие один из габаритных размеров более 200 мм и толщину более 50 мм, должны подвергаться поштучному контролю ультразвуковым или другим равноценным методом.

Дефектоскопии должно подвергаться не менее 50% объема контролируемой поковки. Методика и нормы контроля должны соответствовать НД.

Гайки и шпильки (болты) должны изготавливаться из сталей разных марок, а при изготовлении из сталей одной марки - с разной твердостью. При этом твердость гайки должна быть ниже твердости шпильки (болта). Длина шпилек (болтов) должна обеспечивать превышение резьбовой части над гайкой на величину, указанную в НД.

Материал шпилек (болтов) должен выбираться с коэффициентом

линейного расширения, близким по значениям коэффициенту линейного расширения материала фланца. Разница в значениях коэффициента линейного расширения не должна превышать 10%. Применение сталей с различными коэффициентами линейного расширения (более 10%) допускается в случаях, обоснованных расчетом на прочность.

Отливки стальные должны применяться в термообработанном состоянии. Проверка механических свойств отливок проводится после термообработки.

Неметаллические материалы, применяемые для изготовления сосудов, должны быть совместимы с рабочей средой в части коррозионной стойкости и нерастворимости (изменении свойств) в рабочем диапазоне температур. Среда, для которой предназначен сосуд, должна быть указана в паспорте на сосуд. Применение неметаллических материалов допускается с разрешения Госгортехнадзора России на основании заключения специализированной организации.

Для металлопластиковых сосудов материал герметизирующего слоя (лейнера) выбирается таким образом, чтобы при испытании сосуда пробным давлением в материале отсутствовали пластические деформации. Методики расчета напряженно-деформированного состояния сосуда и экспериментального определения остаточных деформаций согласовываются со специализированной организацией.

Материалы наполнителя и связующего, применяемые для изготовления сосуда, должны иметь гарантированные сроки использования, которые указываются в сертификате на эти материалы.

Чугунные отливки из высокопрочного чугуна следует применять термически обработанными.

## **Изготовление, реконструкция, монтаж, наладка и ремонт**

### **Общие требования**

При изготовлении (доизготовлении), реконструкции, монтаже, наладке

и ремонте должна применяться система контроля качества (входной, операционный и приемочный), обеспечивающая выполнение работ в соответствии с требованиями Правил и НД.

Порядок проведения входного контроля неметаллических материалов, из которых изготавливаются силовые элементы конструкции сосуда, согласовывается со специализированной организацией.

### **Допуски**

Отклонение наружного (внутреннего) диаметра обечаек, цилиндрических отбортованных элементов днищ, сферических днищ, изготовленных из листов и поковок, не должно превышать  $\pm 1\%$  номинального диаметра.

Относительная овальность в любом поперечном сечении не должна превышать 1%.

### **Сварка**

Сварочные материалы, применяемые для сварки сосудов, должны соответствовать требованиям стандартов и технических условий, что должно подтверждаться документом организации-изготовителя.

Марки, сортамент, условия хранения и подготовка к использованию сварочных материалов должны соответствовать требованиям НД на сварку.

Все сварные швы подлежат клеймению, позволяющему установить сварщика, выполняющего эти швы.

### **Термическая обработка**

Термическая обработка элементов сосудов производится для обеспечения соответствия свойств металла и сварных соединений показателям, принятым в НД на металл и сварку, а также для снижения остаточных напряжений, возникающих при выполнении технологических операций (сварки, гибки, штамповки и др.).

К проведению работ по термической обработке допускаются термисты-операторы, прошедшие специальную подготовку, соответствующие



испытания и имеющие удостоверение на право производства работ.

Термической обработке подлежат сосуды, в стенках которых после изготовления (при вальцовке, штамповке, сварке и т.д.) возможно появление недопустимых остаточных напряжений, а также сосуды, прочность которых достигается термообработкой.

Сосуды и их элементы из углеродистых, а также низколегированных марганцовистых и марганцово-кремнистых сталей, изготовленные с применением сварки, штамповки или вальцовки, подлежат обязательной термообработке, если толщина стенки цилиндрического или конического элемента днища, фланца или патрубка сосуда в месте их сварного соединения более 36 мм для углеродистых сталей и более 30 мм для сталей низколегированных марганцовистых, марганцово-кремнистых.

Вид термической обработки (отпуск, нормализация или закалка с последующим отпуском, аустенизация и др.) и ее режимы (скорость нагрева, температура и время выдержки, условия охлаждения и др.) принимаются по НД и указываются в техническом проекте.

### **Контроль сварных соединений**

Организация-изготовитель (доизготовитель), монтажная или ремонтная организация обязаны применять такие виды и объемы контроля своей продукции, которые гарантировали бы выявление недопустимых дефектов, ее высокое качество и надежность в эксплуатации.

Для установления методов и объемов контроля сварных соединений необходимо определить группу сосуда в зависимости от расчетного давления, температуры стенки и характера среды.

Основными видами неразрушающего контроля металла и сварных соединений являются:

- визуальный и измерительный;
- радиографический;
- ультразвуковой;

радиоскопический (допускается применять только по инструкции, согласованной с Госгортехнадзором России);

стилоскопирование;

измерение твердости;

гидравлические испытания;

пневматические испытания.

При разрушающем контроле должны проводиться испытания механических свойств, металлографические исследования и испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии.

Изделие признается годным, если при контроле в нем не будут обнаружены внутренние и наружные дефекты, выходящие за пределы допустимых норм, установленных Правилами и НД на изделие и сварку.

#### **Гидравлическое (пневматическое) испытание**

Гидравлическому испытанию подлежат все сосуды после их изготовления.

Сосуды, изготовление которых заканчивается на месте установки, транспортируемые на место монтажа частями, подвергаются гидравлическому испытанию на месте монтажа.

Сосуды, имеющие защитное покрытие или изоляцию, подвергаются гидравлическому испытанию до наложения покрытия или изоляции.

Сосуды, имеющие наружный кожух, подвергаются гидравлическому испытанию до установки кожуха.

Допускается эмалированные сосуды подвергать гидравлическому испытанию рабочим давлением после эмалирования.

Гидравлическое испытание сосудов, за исключением литых, должно проводиться пробным давлением, определяемым по формуле:

$$P_{\text{пр}} = 1,25P \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t},$$

где  $P$  - расчетное давление сосуда, более 0,5 МПа (кгс/см<sup>2</sup>);  $[\sigma]_{20}$ ,  $[\sigma]_t$  -

допускаемые напряжения для материала сосуда или его элементов соответственно при 20 °С и расчетной температуре, МПа (кгс/см<sup>2</sup>).

Отношение  $\frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}$  принимается по тому из использованных материалов элементов (обечаек, днищ, фланцев, крепежа, патрубков и др.) сосуда, для которого оно является наименьшим.

Гидравлическое испытание деталей, изготовленных из литья, должно проводиться пробным давлением, определяемым по формуле:

$$P_{\text{пр}} = 1,5P \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}.$$

Испытание отливок разрешается проводить после сборки и сварки в собранном узле или готовом сосуде пробным давлением, принятым для сосудов, при условии 100% контроля отливок неразрушающими методами.

Гидравлическое испытание сосудов и деталей, изготовленных из неметаллических материалов с ударной вязкостью более 20 Дж/см<sup>2</sup> (2 кгс·м/см), должно проводиться пробным давлением, определяемым по формуле:

$$P_{\text{пр}} = 1,3P \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}.$$

Гидравлическое испытание сосудов и деталей, изготовленных из неметаллических материалов с ударной вязкостью 20 и менее Дж/см<sup>2</sup> (2 кгс·м/см<sup>2</sup>), должно проводиться пробным давлением, определяемым по формуле

$$P_{\text{пр}} = 1,6P \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}.$$

Гидравлическое испытание криогенных сосудов при наличии вакуума в изоляционном пространстве должно проводиться пробным давлением, определяемым по формуле:

$$P_{\text{пр}} = 1,25P - 0,1 \text{ МПа}$$

или

$$P_{\text{пр}} = 1,25P - 1, \text{ кгс/см}^2.$$

Гидравлическое испытание металлопластиковых сосудов должно проводиться пробным давлением, определяемым по формуле:

$$P_{\text{пр}} = [1,25K_{\text{м}} + \alpha(1 - K_{\text{м}})]P \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t},$$

где  $K_{\text{м}}$  - отношение массы металлоконструкции к общей массе сосуда;  $\alpha = 1,3$  - для неметаллических материалов с ударной вязкостью более 20 Дж/см<sup>2</sup>;  $\alpha = 1,6$  - для неметаллических материалов с ударной вязкостью 20 Дж/см<sup>2</sup> и менее.

Гидравлическое испытание вертикально устанавливаемых сосудов допускается проводить в горизонтальном положении при условии обеспечения прочности корпуса сосуда, для чего расчет на прочность должен быть выполнен разработчиком проекта сосуда с учетом принятого способа опирания в процессе гидравлического испытания.

При этом пробное давление следует принимать с учетом гидростатического давления, действующего на сосуд в процессе его эксплуатации.

Сосуд считается выдержавшим гидравлическое испытание, если не обнаружено:

течи, трещин, слезок, потения в сварных соединениях и на основном металле;

течи в разъемных соединениях;

видимых остаточных деформаций, падения давления по манометру.

### **Документация и маркировка**

Каждый сосуд должен поставляться изготовителем заказчику с паспортом установленной формы.

К паспорту прикладывается руководство по эксплуатации.

На каждом сосуде должна быть прикреплена табличка. Для сосудов наружным диаметром менее 325 мм допускается табличку не устанавливать.

При этом все необходимые данные должны быть нанесены на корпус сосуда электрографическим методом.

На табличке должны быть нанесены:

- товарный знак или наименование изготовителя;
- наименование или обозначение сосуда;
- порядковый номер сосуда по системе нумерации изготовителя;
- год изготовления;
- рабочее давление, МПа;
- расчетное давление, МПа;
- пробное давление, МПа;
- допустимая максимальная и (или) минимальная рабочая температура стенки, °С;
- масса сосуда, кг.

### **Арматура, контрольно-измерительные приборы, предохранительные устройства**

#### **Общие положения**

Для управления работой и обеспечения безопасных условий эксплуатации сосуда в зависимости от назначения должны быть оснащены:

- запорной или запорно-регулирующей арматурой;
- приборами для измерения давления;
- приборами для измерения температуры;
- предохранительными устройствами;
- указателями уровня жидкости.

Сосуды, снабженные быстросъемными крышками, должны иметь предохранительные устройства, исключающие возможность включения сосуда под давление при неполном закрытии крышки и открывании ее при наличии в сосуде давления. Такие сосуды также должны быть оснащены замками с ключом-маркой.

## **Запорная и запорно-регулирующая арматура**

Запорная и запорно-регулирующая арматура должна устанавливаться на штуцерах, непосредственно присоединенных к сосуду, или на трубопроводах, подводящих к сосуду и отводящих из него рабочую среду. В случае последовательного соединения нескольких сосудов необходимость установки такой арматуры между ними определяется разработчиком проекта.

Арматура должна иметь следующую маркировку:

наименование или товарный знак изготовителя;

условный проход, мм;

условное давление, МПа (допускается указывать рабочее давление и допустимую температуру);

направление потока среды;

марку материала корпуса.

## **Установка, регистрация, техническое освидетельствование сосудов, разрешение на эксплуатацию**

### **Установка сосудов**

Сосуды должны устанавливаться на открытых площадках в местах, исключающих скопление людей, или в отдельно стоящих зданиях.

### **Регистрация сосудов**

Сосуды, на которые распространяются Правила, до пуска их в работу должны быть зарегистрированы в органах Госгортехнадзора России.

Регистрации в органах Госгортехнадзора России не подлежат: сосуды 1-й группы, работающие при температуре стенки не выше 200 °С, у которых произведение давления в МПа ( $\text{кгс/см}^2$ ) на вместимость в  $\text{м}^3$  (литрах) не превышает 0,05 (500), а также сосуды 2, 3, 4-й групп, работающие при указанной выше температуре, у которых произведение давления в МПа ( $\text{кгс/см}^2$ ) на вместимость в  $\text{м}^3$  (литрах) не превышает 1,0 (10000).

### **Техническое освидетельствование**

Сосуды, на которые распространяется действие Правил, должны

подвергаться техническому освидетельствованию после монтажа, до пуска в работу, периодически в процессе эксплуатации и в необходимых случаях - внеочередному освидетельствованию.

Объем, методы и периодичность технических освидетельствований сосудов (за исключением баллонов) должны быть определены изготовителем и указаны в руководстве по эксплуатации.

Гидравлическое испытание имеет целью проверку прочности элементов сосуда и плотности соединений. Сосуды должны предъявляться к гидравлическому испытанию с установленной на них арматурой.

Перед внутренним осмотром и гидравлическим испытанием сосуд должен быть остановлен, охлажден (отогрет), освобожден от заполняющей его рабочей среды, отключен заглушками от всех трубопроводов, соединяющих сосуд с источником давления или с другими сосудами. Металлические сосуды должны быть очищены до металла.

Сосуды, работающие с вредными веществами 1-го и 2-го классов опасности по ГОСТ 12.1.007-76, до начала выполнения внутри каких-либо работ, а также перед внутренним осмотром должны подвергаться тщательной обработке (нейтрализации, дегазации) в соответствии с инструкцией по безопасному ведению работ, утвержденной владельцем сосуда в установленном порядке.

Футеровка, изоляция и другие виды защиты от коррозии должны быть частично или полностью удалены, если имеются признаки, указывающие на возможность возникновения дефектов материала силовых элементов конструкции сосудов (неплотность футеровки, отдулины гуммировки, следы промокания изоляции и т.п.). Электрообогрев и привод сосуда должны быть отключены.

Внеочередное освидетельствование сосудов, находящихся в эксплуатации, должно быть проведено в следующих случаях:

если сосуд не эксплуатировался более 12 месяцев;

если сосуд был демонтирован и установлен на новом месте;

если произведено выправление выпучин или вмятин, а также реконструкция или ремонт сосуда с применением сварки или пайки элементов, работающих под давлением;

перед наложением защитного покрытия на стенки сосуда;

после аварии сосуда или элементов, работающих под давлением, если по объему восстановительных работ требуется такое освидетельствование;

по требованию инспектора Госгортехнадзора России или ответственного по надзору за осуществлением производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности при эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

В случаях, когда проведение гидравлического испытания невозможно (большое напряжение от веса воды в фундаменте, междуэтажных перекрытиях или самом сосуде; трудность удаления воды; наличие внутри сосуда футеровки, препятствующей заполнению сосуда водой), разрешается заменять его пневматическим испытанием (воздухом или инертным газом). Этот вид испытания допускается при условии его контроля методом акустической эмиссии (или другим, согласованным с Госгортехнадзором России методом).

При пневматическом испытании применяются меры предосторожности: вентиль на наполнительном трубопроводе от источника давления и манометры выводятся за пределы помещения, в котором находится испытываемый сосуд, а люди на время испытания сосуда пробным давлением удаляются в безопасное место.

Для сосудов, отработавших расчетный срок службы, установленный проектом, изготовителем, другой НД или для которых продлевался расчетный (допустимый) срок службы на основании технического заключения, объем, методы и периодичность технического освидетельствования должны быть определены по результатам технического



диагностирования и определения остаточного ресурса, выполненного специализированной организацией или организациями, имеющими лицензию Госгортехнадзора России на проведение экспертизы промышленной безопасности технических устройств (сосудов).

### **Разрешение на ввод сосуда в эксплуатацию**

Разрешение на ввод в эксплуатацию сосуда, подлежащего регистрации в органах Госгортехнадзора России, выдается инспектором после его регистрации на основании технического освидетельствования и проверки организации обслуживания и надзора, при которой контролируется:

наличие и исправность в соответствии с требованиями настоящих Правил арматуры, контрольно-измерительных приборов и приборов безопасности;

соответствие установки сосуда правилам безопасности;

правильность включения сосуда;

наличие аттестованного обслуживающего персонала и специалистов;

наличие должностных инструкций для лиц, ответственных за осуществление производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности при эксплуатации сосудов, работающих под давлением, ответственных за исправное состояние и безопасную эксплуатацию сосудов;

инструкции по режиму работы и безопасному обслуживанию, сменных журналов и другой документации, предусмотренной Правилами.

### **Ремонт сосудов**

Для поддержания сосуда в исправном состоянии владелец сосуда обязан своевременно проводить в соответствии с графиком его ремонт.

Ремонт сосудов и их элементов, находящихся под давлением, не допускается.

### **Сосуды и полуфабрикаты, приобретаемые за границей**

Сосуды и их элементы, а также полуфабрикаты для их изготовления, приобретаемые за границей, должны соответствовать требованиям Правил и

могут применяться на основании разрешения Госгортехнадзора России, выданного в соответствии с Правилами применения технических устройств на опасных производственных объектах, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 25.12.98 № 1540 (Собрание законодательства Российской Федерации. 1999. № 1. С. 191).

#### **1.4. Нормативная документация на расчет сосудов и аппаратов**

В соответствии с Федеральным законом от 27 декабря 2002 года N 184-ФЗ "О техническом регулировании" утвержден сборник национальных стандартов Российской Федерации на расчет сосудов и аппаратов. Нормативные документы разработаны открытым акционерным обществом "Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения" (ОАО НИИХИММАШ); закрытым акционерным обществом "Петрохим Инжиниринг" (ЗАО Петрохим Инжиниринг); открытым акционерным обществом "Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт нефтяного машиностроения" (ОАО ВНИИНЕФТЕМАШ); Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор).

Рекомендуется следующая нормативная документация на расчет сосудов и аппаратов:

ГОСТ Р 52857.1-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования";

ГОСТ Р 52857.2-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек";

ГОСТ Р 52857.3-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних

статических нагрузках на штуцер";

ГОСТ Р 52857.4-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений";

ГОСТ Р 52857.5-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок";

ГОСТ Р 52857.6-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках";

ГОСТ Р 52857.7-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты";

ГОСТ Р 52857.8-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты с рубашками";

ГОСТ Р 52857.9-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение напряжений в местах пересечений штуцеров с обечайками и днищами при воздействии давления и внешних нагрузок на штуцер";

ГОСТ Р 52857.10-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты, работающие с сероводородными средами";

ГОСТ Р 52857.11-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек";

ГОСТ Р 52857.12-2007 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Требования к форме представления расчетов на прочность, выполняемых на ЭВМ" с датой введения в действие 1 апреля 2008 года.

ГОСТ Р 51273-99 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий.

## Глава 2. Горизонтальные аппараты

### 2.1. Типы горизонтальных аппаратов

Горизонтальные цельносварные емкостные аппараты с эллиптическими и полушаровыми днищами предназначены для приема, хранения и выдачи жидких и газообразных сред при условном давлении в аппарате 0,6; 1 и 1,6 МПа (6,10,16 кгс/см<sup>2</sup>). Аппараты выпускаются номинальным объемом от 6,3 до 100 м<sup>3</sup>. Они представляют собой цилиндрический резервуар, изготовленный из легированной устойчивой к коррозии стали. Резервуар устанавливается на поддерживающие конструкции различного типа. Выдача жидких сред может осуществляться как самотеком, так и перекачиванием сжатым воздухом, технологическим или инертным газом. Конструктивно аппараты исполняются двух типов: 1 исполнение - горизонтальные цельносварные емкостные аппараты с эллиптическими или полушаровыми днищами без внутренних устройств; 2 исполнение – горизонтальные цельносварные емкостные аппараты с эллиптическими днищами и трубным пучком, предназначенные для постоянного или периодического подогрева или охлаждения сред [2].

На рис. 2.1 показана схема горизонтального цельносварного аппарата с эллиптическими днищами. Ниже приведено обозначение и назначение штуцеров аппарата: А – люк, Б – вход среды, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub> – выход среды, Г – перелив среды, Д – труба перекачивания, Е – установка предохранительного клапана, Ж – установка манометра, И<sub>1</sub>, И<sub>2</sub> – установка колонки указателя уровня трубчатого типа, К – установка уровнемера типа УБ, Л – установка термометра, М, М<sub>1</sub>, М<sub>2</sub> – резервный [2].

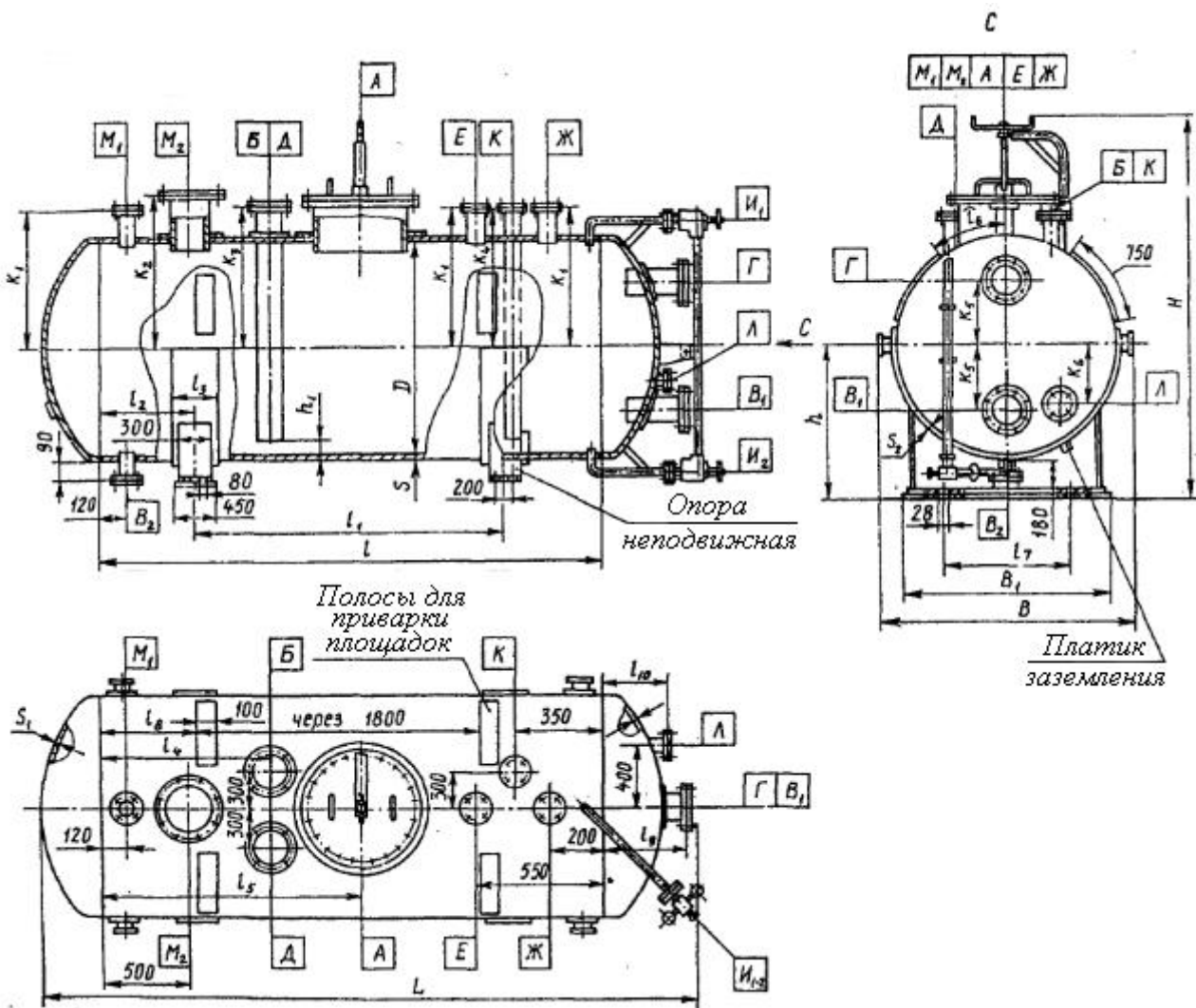


Рис. 2.1. Схема горизонтального цельносварного аппарата с эллиптическими днищами

## 2.2. Расчет горизонтального аппарата с кольцами жесткости

Для расчета выбран горизонтальный аппарат (рис. 2.2), состоящий из цилиндрической обечайки, по бокам которой приварены эллиптические днища. Для обогрева или охлаждения среды внутри аппарата он снабжен рубашкой, в которую подается соответственно тепло- или хладоноситель. Стенки обечайки укреплены кольцами жесткости. Аппарат установлен на седловые опоры.

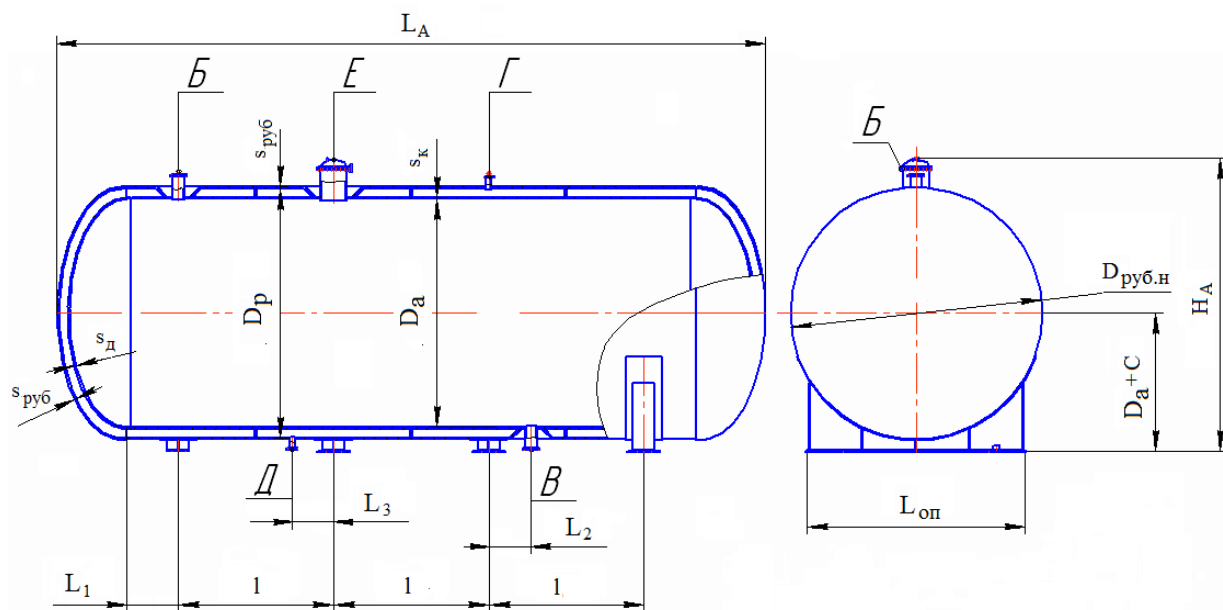
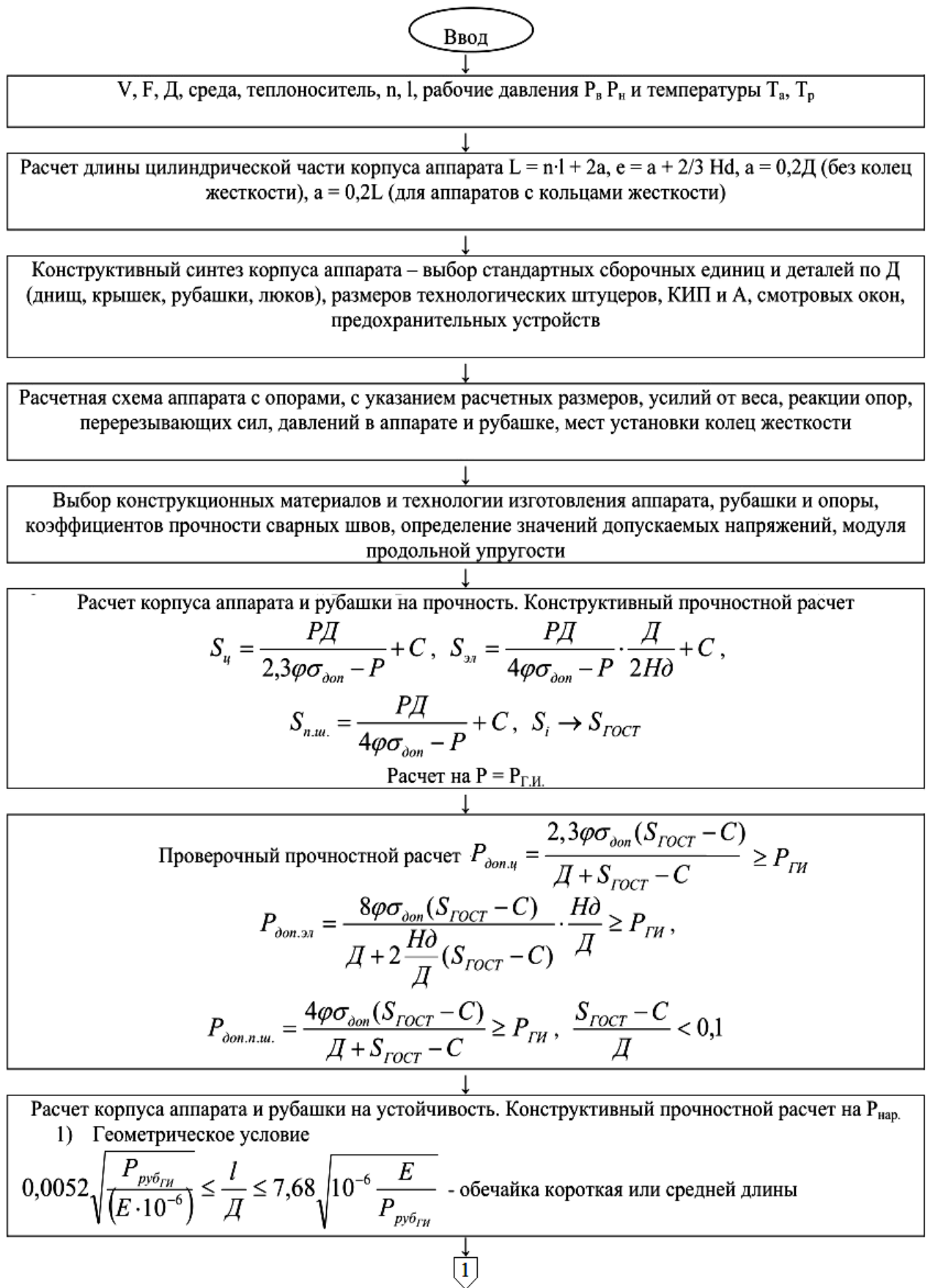


Рис. 2.2. Схема горизонтального аппарата с рубашкой:

$l$  – расстояние между опорами,  $L_1$  – расстояние между опорой и краем цилиндрической обечайки,  $L_2$ ,  $L_3$  – расстояние между штуцером и опорой; В, Г, Д, Е, Г – штуцера

Расчет аппарата проводится в следующей последовательности: 1) конструктивный синтез аппарата, 2) составление расчетной схемы аппарата в соответствии с действующими нагрузками и местом строительства, 3) выбор конструкционных материалов, 4) выбор технологии изготовления аппарата, 5) расчет элементов корпуса на прочность и устойчивость, 6) расчет элементов рубашки на прочность и устойчивость, 7) определение массы аппарата, 8) подбор седловой опоры, 9) расчет действующих на опору нагрузок, 10) расчет корпуса и колец жесткости на прочность и устойчивость с учетом воздействий со стороны опоры, 11) расчет седловой опоры.

Блок-схема алгоритма расчета аппарата приведена на рис. 2.3.



1

$$\frac{l}{D} > 7,68 \sqrt{10^{-6} \cdot \frac{E}{P_{руб.ги}}} - \text{длинная обечайка}$$

2) Выбор расчетной формулы

$$S_{н.к.} = 0,47 \frac{D}{100} \left[ \frac{P_{руб.ги} \cdot l}{10^{-6} \cdot E \cdot D} \right]^{0,4} + C - \text{(обечайка короткая или средней длины)}$$

$$S_{н.к.} \rightarrow S_{ГОСТ}$$

$$S_{н.дл.} = 1,06 \frac{D}{100} \sqrt[3]{\frac{P_{руб.ги}}{10^{-6} \cdot E}} + C - \text{(обечайка длинная)}$$

$$S_{н.дл.} \rightarrow S_{ГОСТ}$$

3) Прочностное условие

Проверочный прочностной расчет на  $P_{нар.}$

$$1,5 \sqrt{\frac{2(S_{ч.гост} - C)}{D}} \leq \frac{l}{D} \leq \sqrt{\frac{D}{2(S_{ч.гост} - C)}} - \text{(область упругой деформации)}$$

$$\frac{L}{D} > \sqrt{\frac{D}{2(S_{ч.гост} - C)}} - \text{(область пластической деформации)}$$

Выбор расчетных формул

$$P_{дон} = 6,49 \cdot 10^{-6} \cdot E \frac{D}{l} \left[ \frac{100(S_{ГОСТ} - C)}{D} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100(S_{ГОСТ} - C)}{D}} \geq P_{руб.ги} -$$

- для короткой или средней длины цилиндрической обечайки в области упругой деформации

$$P_{дон} = 0,85 \cdot 10^{-6} \cdot E \frac{D}{l} \left[ \frac{100(S_{ГОСТ} - C)}{D} \right]^3 \geq P_{руб.ги} -$$

- для длинной цилиндрической обечайки в области упругой деформации

Цилиндрические обечайки, работающие в области пластической деформации под  $P_{нар.}$

1) Конструктивный прочностной расчет

а) короткие и средней длины  $S_{н.д.} = \frac{PD\xi_1}{2E} + C \rightarrow S_{н.д.ГОСТ}, S = \max \{S_{н.сп.}; S_{техн.изг.}; S^{ГОСТ}\}$

$$\xi_1 = 1,5 \frac{E}{\sigma_T} + 1,53 \frac{\sigma_T}{E} \cdot \left( \frac{D}{(S_{ГОСТ} - C)} \right) \cdot \left( \frac{l}{(S_{ГОСТ} - C)} \right)^2$$

б) длинные  $S_{н.д.}^* = \frac{PD\xi_2}{2E} + C \rightarrow S_{н.д.ГОСТ}^*, \xi_2 = 1,5 \frac{E}{\sigma_T} + \left( \frac{D}{(S_{ГОСТ} - C)} \right)^2,$

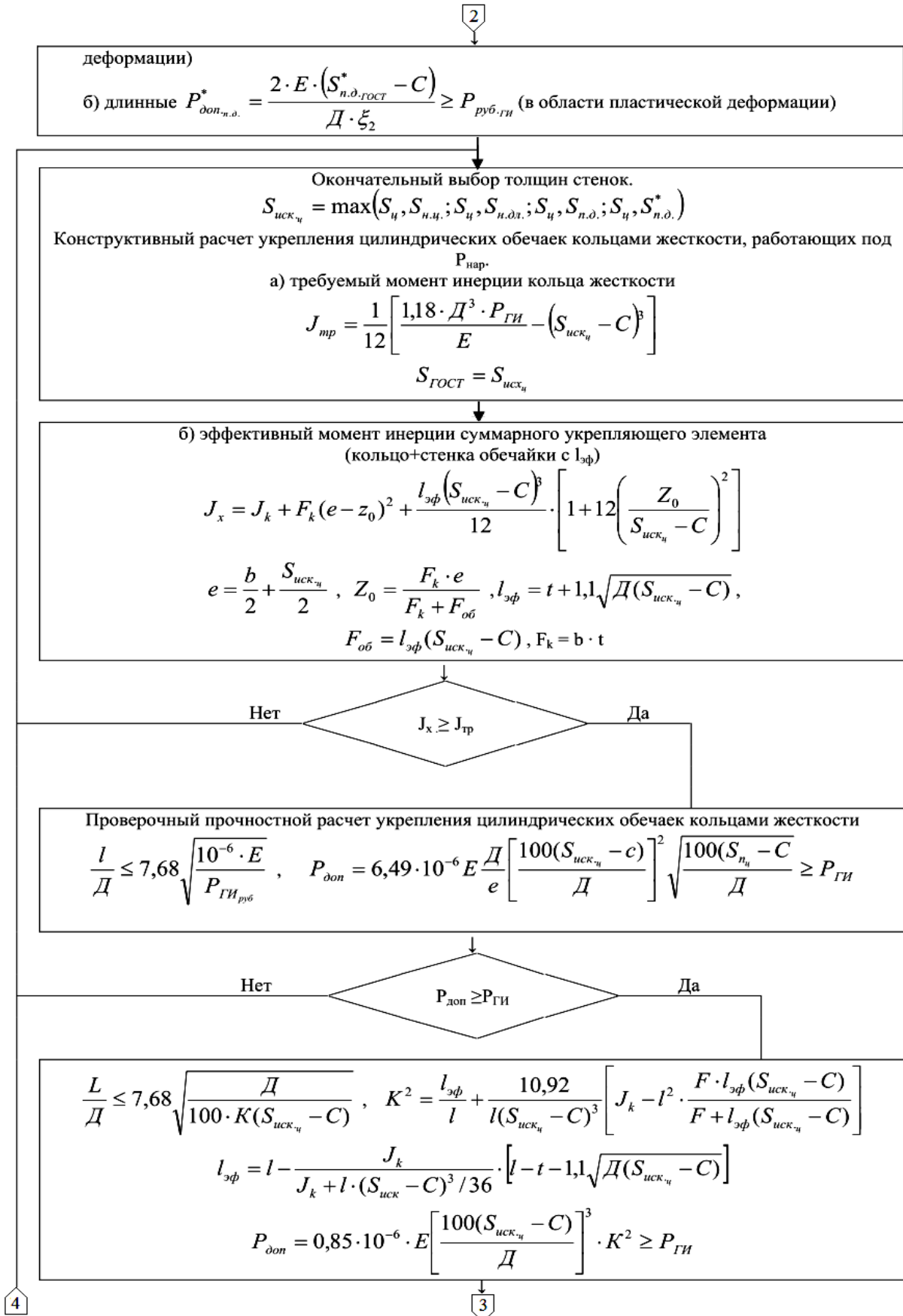
$$S = \max \{S_{н.сп.}; S_{техн.изг.}; S^{ГОСТ}\}$$

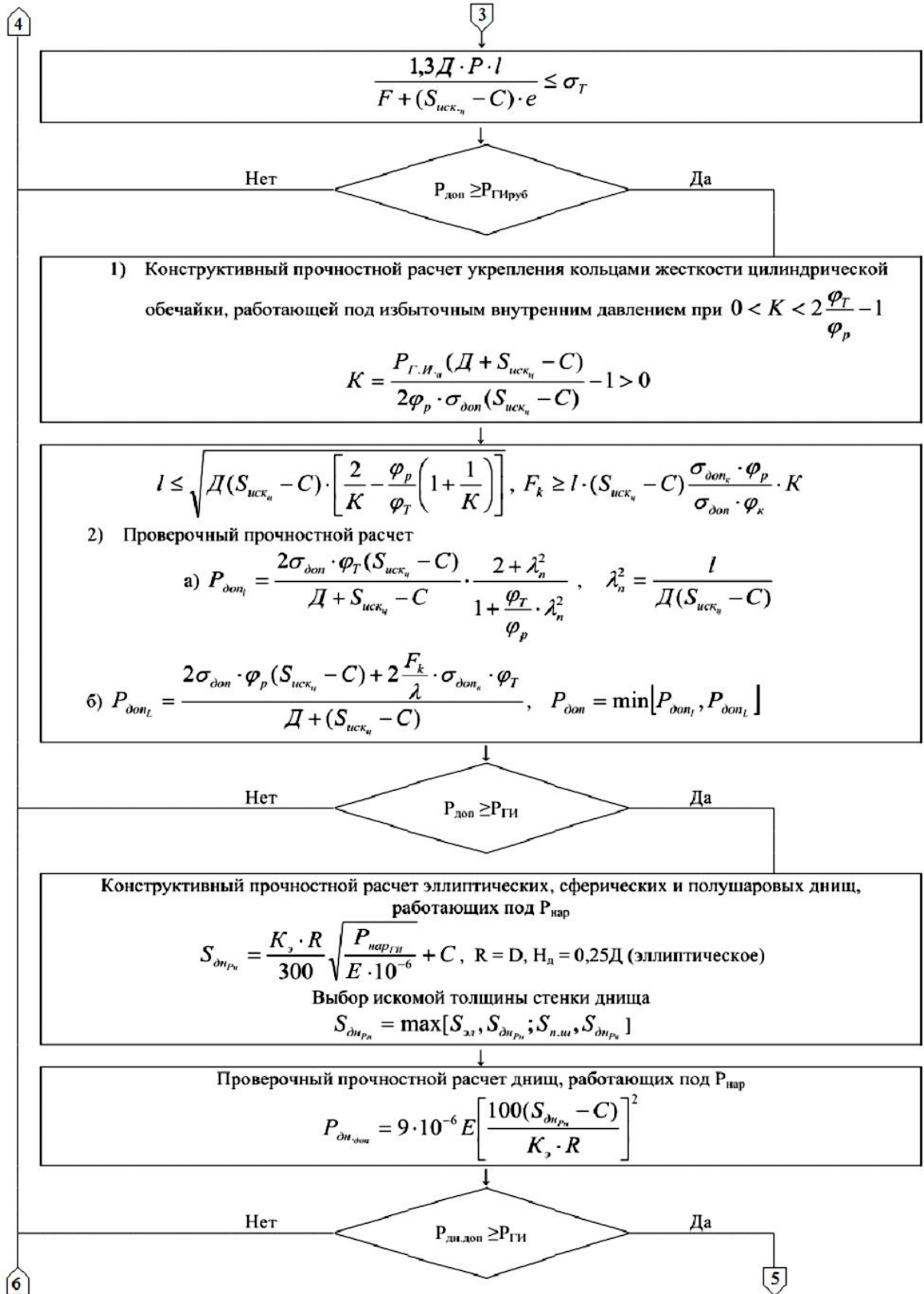
4) Проверочный прочностной расчет обечайки:

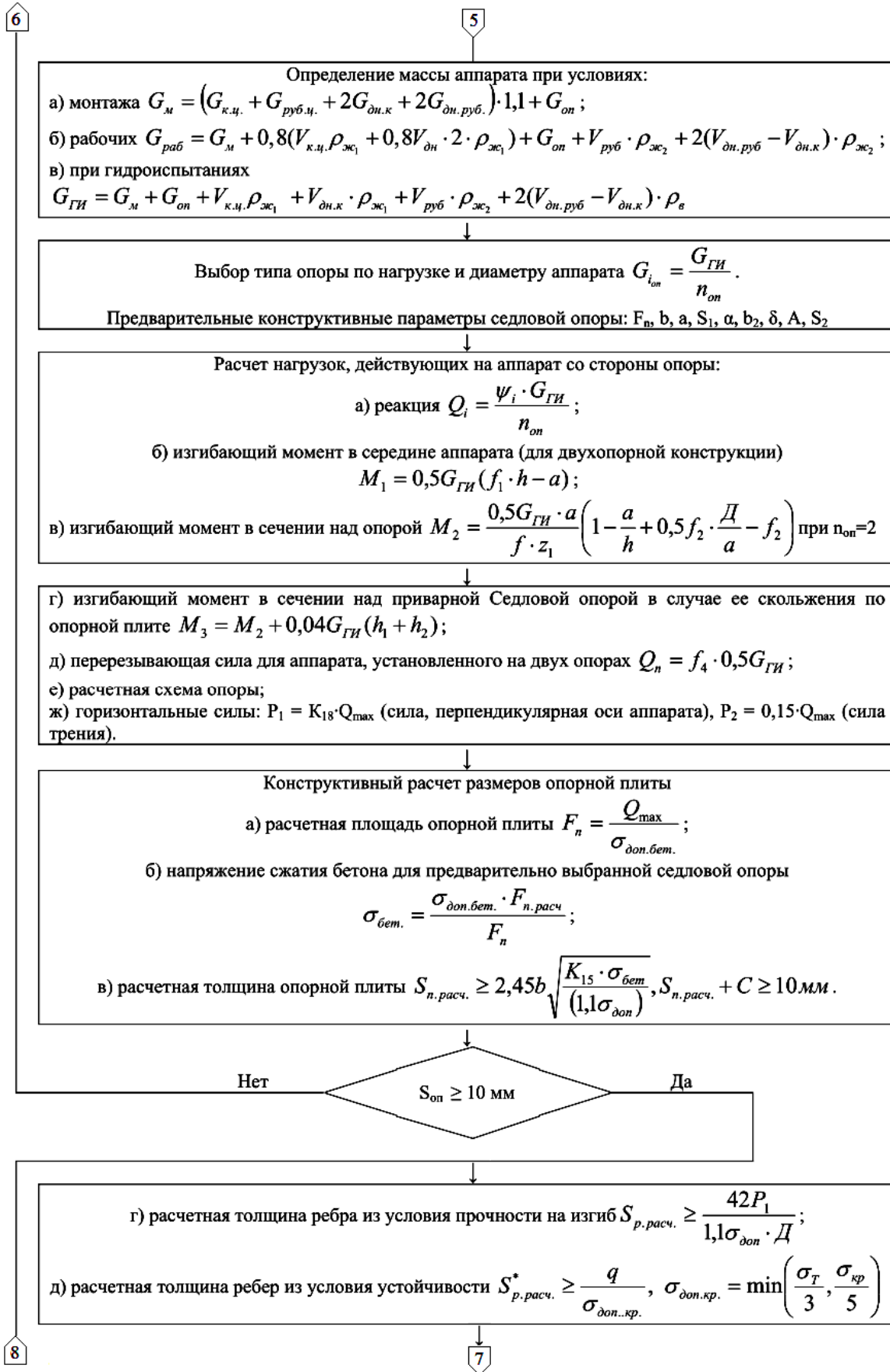
а) короткие и средней длины  $P_{дон.н.д.} = \frac{2(S_{н.д.ГОСТ} - C) \cdot E}{D \cdot \xi_1} \geq P_{руб.ги}$  (в области пластической деформации)

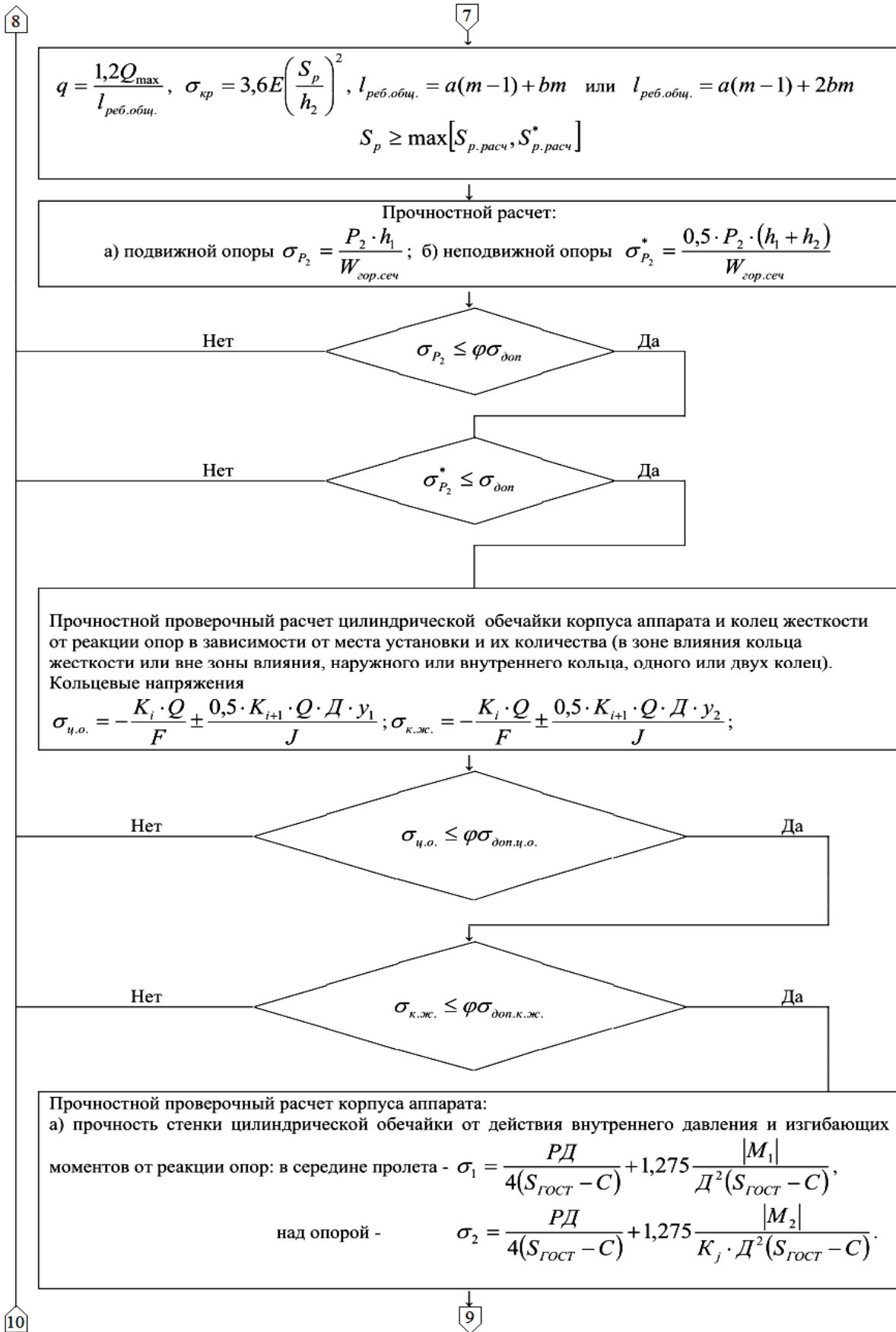
2











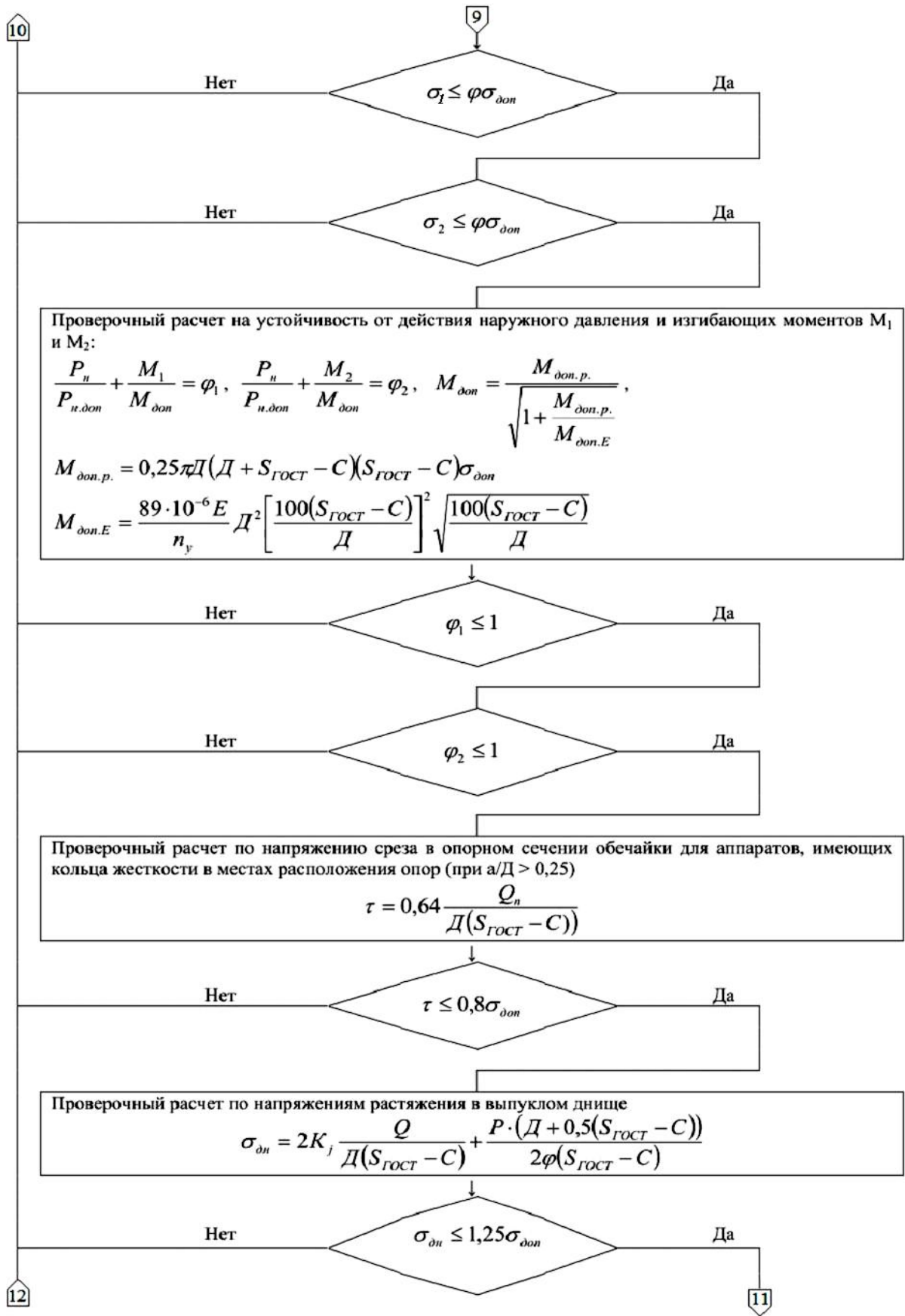




Рис. 2.3. Блок-схема алгоритма расчета горизонтального аппарата с кольцами жесткости

В соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 2.3, составлена программа расчета горизонтального аппарата в системе Mathcad 15. Листинг программы расчета приведен на рис. 2.4.

*Исходные данные*

Диаметр аппарата  $D_A := 2000$  мм

Расстояние между опорами  $l := 3000$  мм

Количество опор  $n := 3$

Давление в аппарате  $p_A := 1.6$  МПа

Давление в рубашке  $p_P := 0.6$  МПа

Температура в аппарате  $T_A := 50$  °С

Температура в рубашке  $T_P := 90$  °С

Внутренняя среда - сжиженные газы

Расположение колец жесткости - в зоне влияния опоры

*Расчет длины цилиндрической части корпуса аппарата*

$$L := \frac{n \cdot l}{0.6} = 15000 \text{ мм}$$

*Конструктивный синтез корпуса аппарата*

*Эллиптическое отбортованное днище*

Диаметр днища  $D_D := 2000$  мм

Высота днища  $H_{д} := 500 \text{ мм}$

Высота отбортовки  $h_{д} := 80 \text{ мм}$

Площадь днища  $S_{д} := 4.84 \text{ м}^2$

Объем днища  $V_{д} := 1.2937 \text{ м}^3$

*Рубашка неразъемная.*

Диаметр рубашки  $D_{р} := 2200 \text{ мм}$

Высота днища рубашки  $H_{д.р} := 550 \text{ мм}$

Площадь днища рубашки  $S_{д.р} := 5.52 \text{ м}^2$

Объем днища рубашки  $V_{д.р} := 1.5395 \text{ м}^3$

*Опоры седловые (предварительный выбор по  $D_{р}$ ).*

Исполнение - 2 (в приложении рис. П1)

Лоп := 2000 мм

$l_{оп} := 1950 \text{ мм}$

$ю_{п1} := 1000 \text{ мм}$

Воп := 400 мм

Ноп := 840 мм

Аоп := 1500 мм

Аоп1 := 200 мм

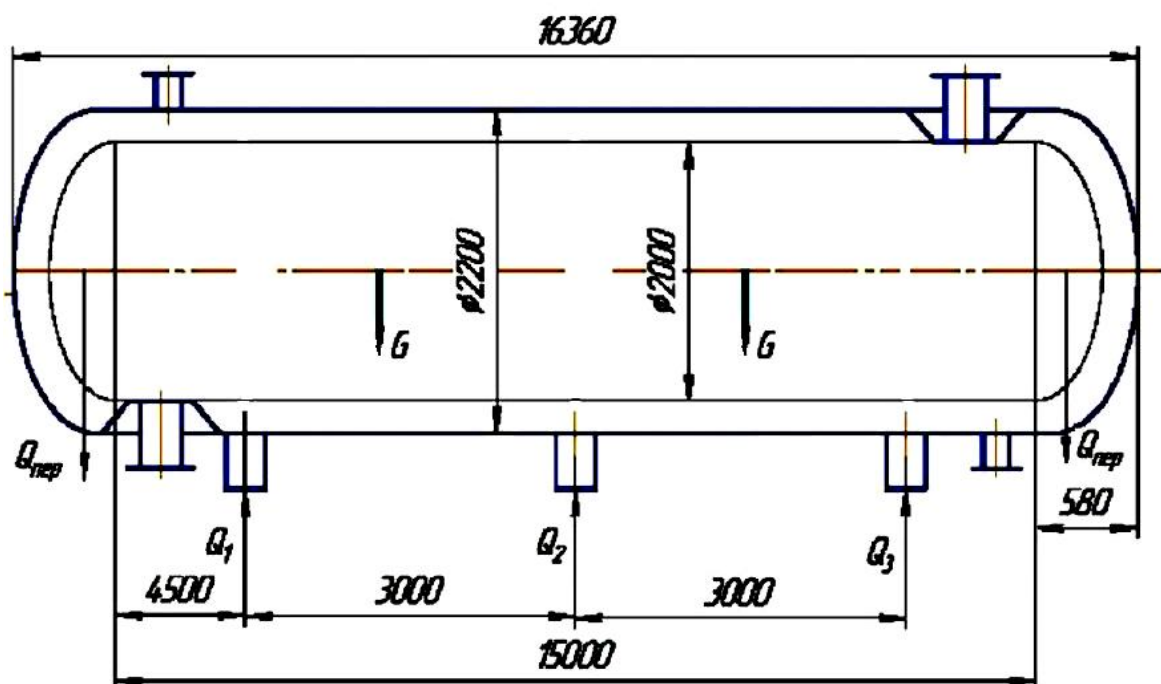
Аоп2 := 100 мм

Роп := 1120 мм

Соп := 16 мм

моп := 316 кг

Гоп := 300000 Н



Общая длина аппарата

$$L_{\text{общ}} := L + 2 \cdot (H_{\text{д}} + h_{\text{д}}) + (D_{\text{Р}} - D_{\text{А}})$$

$$L_{\text{общ}} = 16360 \text{ мм.}$$

*Выбор конструкционных материалов*

Корпус аппарата - сталь 20

$$\text{Принимаем } E_1 := 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа (при } t = 100 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\sigma_{\text{доп1}} := 142 \text{ МПа (при } t = 100 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\sigma_{\text{В}} := 500 \text{ МПа (при } t = 100 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\sigma_{\text{Т}} := 280 \text{ МПа (при } t = 100 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

Рубашка аппарата - сталь Ст3

$$\text{Принимаем } E_2 := 1.91 \cdot 10^5 \text{ МПа (при } t = 100 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\sigma_{\text{доп2}} := 134 \text{ МПа (при } t = 100 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\sigma_{\text{доп3}} := 140 \text{ МПа (при } t = 20 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

Опора - сталь Ст3.

$$\text{Принимаем } E_3 := 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа (при } t = 20 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

Примем расчетное давление и давление гидроиспытаний.

$$p_{\text{расч}} := 2 \text{ МПа}$$

$$p_{\text{Г.И}} := 2 \text{ МПа}$$

*Расчет корпуса аппарата по внутреннему давлению*

Коэффициент прочности сварного шва  $\varphi := 1$

Принимаем прибавку на коррозию  $C_{\text{кор}} := 1 \text{ мм}$

Расчет цилиндрической части аппарата

$$s_{\text{ц.вн}} := \left[ \left( \frac{p_{\text{расч}} \cdot D_{\text{А}}}{2.3 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{доп1}} - p_{\text{расч}}} \right) + C_{\text{кор}} \right]$$

$$s_{\text{ц.вн}} = 13.323 \text{ мм.}$$

▣

$$s_{\text{ГОСТ.ц.вн}} := \begin{cases} \text{ceil}(s_{\text{ц.вн}}) & \text{if } s_{\text{ц.вн}} \leq 6 \\ \text{ceil}(s_{\text{ц.вн}}) & \text{if } 6 < s_{\text{ц.вн}} < 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.вн}}, 2)}{2} \right) = 0 \end{cases}$$



$$\begin{aligned}
 & \text{ceil}(s_{\text{ц.вн}}) \text{ if } 6 < s_{\text{ц.вн}} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.вн}}, 2)}{2} \right) > 0.5 \\
 & (\text{ceil}(s_{\text{ц.вн}}) + 1) \text{ if } 6 < s_{\text{ц.вн}} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.вн}}, 2)}{2} \right) \leq 0.5 \\
 & (\text{ceil}(s_{\text{ц.вн}})) \text{ if } s_{\text{ц.вн}} = 50 \\
 & (\text{ceil}(s_{\text{ц.вн}}) + 4) \text{ if } s_{\text{ц.вн}} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.вн}}, 5)}{5} \right) \leq 0.2 \\
 & (\text{ceil}(s_{\text{ц.вн}}) + 3) \text{ if } s_{\text{ц.вн}} > 50 \wedge 0.2 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.вн}}, 5)}{5} \right) \leq 0.4 \\
 & (\text{ceil}(s_{\text{ц.вн}}) + 2) \text{ if } s_{\text{ц.вн}} > 50 \wedge 0.4 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.вн}}, 5)}{5} \right) \leq 0.6 \\
 & (\text{ceil}(s_{\text{ц.вн}}) + 1) \text{ if } s_{\text{ц.вн}} > 50 \wedge 0.6 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.вн}}, 5)}{5} \right) \leq 0.8 \\
 & (\text{ceil}(s_{\text{ц.вн}})) \text{ if } s_{\text{ц.вн}} > 50 \wedge 0.8 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.вн}}, 5)}{5} \right) \leq 1 \\
 & (\text{ceil}(s_{\text{ц.вн}})) \text{ if } s_{\text{ц.вн}} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.вн}}, 5)}{5} \right) = 0
 \end{aligned}$$

☐

Принимаем  $s_{\text{ГОСТ.ц.вн}} = 14 \text{ мм}$

Проверочный прочностной расчет

$$R_{\text{доп}} := \frac{2.3 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{доп1}} \cdot (s_{\text{ГОСТ.ц.вн}} - C_{\text{кор}})}{D_A + (s_{\text{ГОСТ.ц.вн}} - C_{\text{кор}})}$$

$$R_{\text{доп}} = 2.109 \text{ МПа}$$

☐

Условие :=  $\begin{cases} \text{"выполняется"} & \text{if } R_{\text{Г.И}} \leq R_{\text{доп}} \\ \text{"не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$

☐

$R_{\text{Г.И}} \leq R_{\text{доп}}$  - Условие = "выполняется"

☐

$$s_{\text{ГОСТ.ц.вн}} := \begin{cases} x \leftarrow s_{\text{ГОСТ.ц.вн}} \end{cases}$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{while } p_{Г.И} > \left[ \frac{2.3 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{доп1}} \cdot (x - C_{\text{кор}})}{D_A + (x - C_{\text{кор}})} \right] \\ \quad \left| \begin{array}{l} x \leftarrow x + 1 \text{ if } 6 > x \\ x \leftarrow x + 2 \text{ if } 6 \leq x < 50 \\ x \leftarrow x + 5 \text{ if } x \geq 50 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

▣

Принимаем  $s_{\text{ГОСТ.ц.вн}} = 14 \text{ мм}$

Расчет эллиптической части аппарата

$$s_{\text{д.вн}} := \left( \frac{P_{\text{расч}} \cdot D_{\text{д}}}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{доп1}} - P_{\text{расч}}} \right) \cdot \left( \frac{D_{\text{д}}}{2 \cdot H_{\text{д}}} \right) + C_{\text{кор}}$$

$$s_{\text{д.вн}} = 15.134 \text{ мм}$$

▣

$$s_{\text{ГОСТ.д.вн}} := \left| \begin{array}{l} \text{ceil}(s_{\text{д.вн}}) \text{ if } s_{\text{д.вн}} \leq 6 \\ \text{ceil}(s_{\text{д.вн}}) \text{ if } 6 < s_{\text{д.вн}} < 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{д.вн}}, 2)}{2} \right) = 0 \\ \text{ceil}(s_{\text{д.вн}}) \text{ if } 6 < s_{\text{д.вн}} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{д.вн}}, 2)}{2} \right) > 0.5 \\ (\text{ceil}(s_{\text{д.вн}}) + 1) \text{ if } 6 < s_{\text{д.вн}} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{д.вн}}, 2)}{2} \right) \leq 0.5 \\ (\text{ceil}(s_{\text{д.вн}})) \text{ if } s_{\text{д.вн}} = 50 \\ (\text{ceil}(s_{\text{д.вн}}) + 4) \text{ if } s_{\text{д.вн}} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{д.вн}}, 5)}{5} \right) \leq 0.2 \\ (\text{ceil}(s_{\text{д.вн}}) + 3) \text{ if } s_{\text{д.вн}} > 50 \wedge 0.2 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{д.вн}}, 5)}{5} \right) \leq 0.4 \\ (\text{ceil}(s_{\text{д.вн}}) + 2) \text{ if } s_{\text{д.вн}} > 50 \wedge 0.4 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{д.вн}}, 5)}{5} \right) \leq 0.6 \\ (\text{ceil}(s_{\text{д.вн}}) + 1) \text{ if } s_{\text{д.вн}} > 50 \wedge 0.6 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{д.вн}}, 5)}{5} \right) \leq 0.8 \\ (\text{ceil}(s_{\text{д.вн}})) \text{ if } s_{\text{д.вн}} > 50 \wedge 0.8 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{д.вн}}, 5)}{5} \right) \leq 1 \end{array} \right.$$

$$\left\lfloor \left( \text{ceil}(s_{\text{д.вн}}) \right) \text{ if } s_{\text{д.вн}} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{д.вн}}, 5)}{5} \right) = 0 \right.$$

Принимаем  $s_{\text{ГОСТ.д.вн}} = 16 \text{ мм}$

Проверочный прочностной расчет

$$P_{\text{доп}} := \left[ \frac{8 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{доп1}} \cdot (s_{\text{ГОСТ.д.вн}} - C_{\text{кор}})}{D_{\text{д}} + \left( 2 \cdot \frac{H_{\text{д}}}{D_{\text{д}}} \right) \cdot (s_{\text{ГОСТ.д.вн}} - C_{\text{кор}})} \right] \cdot \left( \frac{H_{\text{д}}}{D_{\text{д}}} \right)$$

$$P_{\text{доп}} = 2.122 \text{ МПа}$$

$$\text{Условие} := \left\{ \begin{array}{l} \text{"выполняется"} \text{ if } P_{\text{Г.И}} \leq P_{\text{доп}} \\ \text{"не выполняется"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Условие = "выполняется"

$$s_{\text{ГОСТ.д.вн}} := \left\{ \begin{array}{l} y \leftarrow s_{\text{ГОСТ.д.вн}} \\ \text{while } P_{\text{Г.И}} > \left[ \frac{8 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{доп1}} \cdot (y - C_{\text{кор}})}{D_{\text{д}} + \left( 2 \cdot \frac{H_{\text{д}}}{D_{\text{д}}} \right) \cdot (y - C_{\text{кор}})} \right] \cdot \left( \frac{H_{\text{д}}}{D_{\text{д}}} \right) \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} y \leftarrow y + 1 \text{ if } 6 > y \\ y \leftarrow y + 2 \text{ if } 6 \leq y < 50 \\ y \leftarrow y + 5 \text{ if } y \geq 50 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Принимаем  $s_{\text{ГОСТ.д.вн}} = 16 \text{ мм}$

*Расчет цилиндрической части корпуса аппарата на устойчивость.*

Геометрические условия

$$7.68 \cdot \sqrt{\frac{E_1 \cdot 10^{-6}}{PP}} = 4.333 > \frac{1}{D_A} = 1.5 > 0.0052 \cdot \sqrt{\frac{PP}{(E_1 \cdot 10^{-6})}} = 0.009$$

$$\text{Обечайка} := \left\{ \begin{array}{l} \text{"короткая или средняя обечайка"} \text{ if } 7.68 \cdot \sqrt{\frac{E_1 \cdot 10^{-6}}{PP}} \geq \frac{1}{D_A} \\ \text{"длинная обечайка"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Обечайка = "короткая или средняя обечайка"

Выбор расчетной формулы

$$P_{Г.И.Р} := P_P \cdot 1.5 \cdot \left( \frac{\sigma_{доп3}}{\sigma_{доп2}} \right) - \text{давление Г.И. рубашки}$$

$$P_{Г.И.Р} = 0.94 \text{ МПа}$$

$$s_{ц.н} := \left[ 0.47 \cdot \left( \frac{D_A}{100} \right) \cdot \left( \frac{P_{Г.И.Р} \cdot 1}{E_1 \cdot 10^{-6} \cdot D_A} \right)^{0.4} + C_{кор} \right]$$

▣

$$S_{ц.нар} := \begin{cases} \left[ 0.47 \cdot \left( \frac{D_A}{100} \right) \cdot \left( \frac{P_{Г.И.Р} \cdot 1}{E_1 \cdot 10^{-6} \cdot D_A} \right)^{0.4} + C_{кор} \right] & \text{if Обечайка = "короткая или средняя обечайка"} \\ 1.06 \cdot \left( \frac{D_A}{100} \right)^3 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{Г.И.Р}}{E_1 \cdot 10^{-6}}} + C_{кор} & \text{if Обечайка = "длинная обечайка"} \end{cases}$$

▣

$$s_{ц.н} = 21.915 \text{ мм}$$

▣

$$s_{ГОСТ.ц.н} := \begin{cases} \text{ceil}(s_{ц.н}) & \text{if } s_{ц.н} \leq 6 \\ \text{ceil}(s_{ц.н}) & \text{if } 6 < s_{ц.н} < 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.н}, 2)}{2} \right) = 0 \\ \text{ceil}(s_{ц.н}) & \text{if } 6 < s_{ц.н} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.н}, 2)}{2} \right) > 0.5 \\ (\text{ceil}(s_{ц.н}) + 1) & \text{if } 6 < s_{ц.н} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.н}, 2)}{2} \right) \leq 0.5 \\ (\text{ceil}(s_{ц.н})) & \text{if } s_{ц.н} = 50 \\ (\text{ceil}(s_{ц.н}) + 4) & \text{if } s_{ц.н} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.н}, 5)}{5} \right) \leq 0.2 \\ (\text{ceil}(s_{ц.н}) + 3) & \text{if } s_{ц.н} > 50 \wedge 0.2 < \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.н}, 5)}{5} \right) \leq 0.4 \\ (\text{ceil}(s_{ц.н}) + 2) & \text{if } s_{ц.н} > 50 \wedge 0.4 < \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.н}, 5)}{5} \right) \leq 0.6 \\ (\text{ceil}(s_{ц.н}) + 1) & \text{if } s_{ц.н} > 50 \wedge 0.6 < \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.н}, 5)}{5} \right) \leq 0.8 \\ (\text{ceil}(s_{ц.н})) & \text{if } s_{ц.н} > 50 \wedge 0.8 < \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.н}, 5)}{5} \right) \leq 1 \end{cases}$$

$$\left\lceil \text{ceil}(s_{ц.н}) \right\rceil \text{ if } s_{ц.н} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.н}, 5)}{5} \right) = 0$$

□

Принимаем:  $s_{ГОСТ.ц.н} = 22$  ммПроверочный прочностной расчет на  $P_{нар}$ 

Прочностное условие

$$\left[ 1.5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (s_{ГОСТ.ц.н} - C_{кор})}{D_A}} \right] = 0.217 < \left( \frac{1}{D_A} \right) = 1.5 < \sqrt{\frac{D_A}{2 \cdot (s_{ГОСТ.ц.н} - C_{кор})}} = 6.901$$

□

$$\text{Область} := \begin{cases} \text{"упругой деформации"} & \text{if } \left[ 1.5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (s_{ГОСТ.ц.н} - C_{кор})}{D_A}} \right] \leq \left( \frac{1}{D_A} \right) \leq \left[ \sqrt{\frac{D_A}{2 \cdot (s_{ГОСТ.ц.н} - C_{кор})}} \right] \\ \text{"пластических деформаций"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

□

Область = "упругой деформации"

*Выбор расчетных формул для обечайки, работающих в области упругой деформации.*Допустимое давление  $P_{доп}$ 

$$P_{доп} := \left[ (6.49 \cdot 10^{-6}) \cdot E_1 \cdot \left( \frac{D_A}{1} \right) \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_{ГОСТ.ц.н} - C_{кор})}{D_A} \right]^2 \cdot \left[ \sqrt{\frac{100 \cdot (s_{ГОСТ.ц.н} - C_{кор})}{D_A}} \right] \right]$$

□

$$P_{доп} := \begin{cases} \left[ (6.49 \cdot 10^{-6}) \cdot E_1 \cdot \left( \frac{D_A}{1} \right) \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_{ГОСТ.ц.н} - C_{кор})}{D_A} \right]^2 \cdot \left[ \sqrt{\frac{100 \cdot (s_{ГОСТ.ц.н} - C_{кор})}{D_A}} \right] \right] & \text{if Обечайка = "короткая или средняя обечайка"} \wedge \text{Область = "упругой деформации"} \\ \left[ (0.85 \cdot 10^{-6}) \cdot E_1 \cdot \left( \frac{D_A}{1} \right) \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_{ГОСТ.ц.н} - C_{кор})}{D_A} \right]^3 \right] & \text{if Обечайка = "длинная обечайка"} \wedge \text{Область = "упругой деформации"} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

□

 $P_{доп} = 0.934$  МПа

□

$$\text{Условие} := \begin{cases} \text{"выполняется"} & \text{if } P_{доп} \geq P_{Г.И.Р} \\ \text{"не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

□

$P_{\text{доп}} < P_{\text{Г.И.Р}}$  - условие = "не выполняется"

```

sГОСТ.ц.н := 0 if pдоп = 0
              otherwise
                z ← sГОСТ.ц.н
                while  $\left( (0.85 \cdot 10^{-6}) \cdot E_1 \cdot \left( \frac{D_A}{1} \right) \cdot \left[ \frac{100 \cdot (z - C_{\text{кор}})}{D_A} \right]^3 < p_{\text{р}} \cdot 1.5 \cdot \left( \frac{\sigma_{\text{доп3}}}{\sigma_{\text{доп2}}} \right) \right)$  if Обечайка = "длинная обечайка" ∧ Область =  $\left[ 1.5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (z - C_{\text{кор}})}{D_A}} \leq \left( \frac{1}{D_A} \right) \leq \left[ \sqrt{\frac{D_A}{2 \cdot (z - C_{\text{кор}})}} \right]$ 
                     $\left[ p_{\text{р}} \cdot 1.5 \cdot \left( \frac{\sigma_{\text{доп3}}}{\sigma_{\text{доп2}}} \right) > \left( (6.49 \cdot 10^{-6}) \cdot E_1 \cdot \left( \frac{D_A}{1} \right) \cdot \left[ \frac{100 \cdot (z - C_{\text{кор}})}{D_A} \right]^2 \cdot \left[ \sqrt{\frac{100 \cdot (z - C_{\text{кор}})}{D_A}} \right] \right]$  if Обечайка = "короткая или средняя обечайка" ∧  $1.5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (z - C_{\text{кор}})}{D_A}} \leq \left( \frac{1}{D_A} \right) \leq \left[ \sqrt{\frac{D_A}{2 \cdot (z - C_{\text{кор}})}} \right]$ 
                        z ← z + 1 if 6 > z
                        z ← z + 2 if 6 ≤ z < 50
                        z ← z + 5 if z ≥ 50

```

Принимаем:  $s_{\text{ГОСТ.ц.н}} = 24$  мм

```

Pдоп :=  $\left[ \left( (6.49 \cdot 10^{-6}) \cdot E_1 \cdot \left( \frac{D_A}{1} \right) \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_{\text{ГОСТ.ц.н}} - C_{\text{кор}})}{D_A} \right]^2 \cdot \left[ \sqrt{\frac{100 \cdot (s_{\text{ГОСТ.ц.н}} - C_{\text{кор}})}{D_A}} \right] \right) \right]$  if Обечайка = "короткая или средняя обечайка" ∧ Область = "упругой деформации"
         $\left( (0.85 \cdot 10^{-6}) \cdot E_1 \cdot \left( \frac{D_A}{1} \right) \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_{\text{ГОСТ.ц.н}} - C_{\text{кор}})}{D_A} \right]^3 \right)$  if Обечайка = "длинная обечайка" ∧ Область = "упругой деформации"
        0 otherwise

```

$P_{\text{доп}} = 0.934$  МПа

```

Условие := "выполняется" if Pдоп ≥ PГ.И.Р
           "не выполняется" otherwise

```

53

$$e := a + \left(\frac{2}{3}\right) \cdot H_d = 3333.333 \text{ мм}$$

Находим

$$\left(\frac{e}{l}\right) = 1.111$$

По графику на рис. П1 определяем коэффициент  $\psi_i$  для каждой опоры [1, 6, 13]

$$\psi_1 := 1.1$$

$$\psi_2 := 0.8$$

$$Q_1 := \left(\frac{\psi_1 \cdot G_{Г.И.}}{n}\right) = 3.256 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$Q_2 := \left(\frac{\psi_2 \cdot G_{Г.И.}}{n}\right) = 2.368 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$Q_3 := Q_1 = 3.256 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$Q_{\max} := \max(Q_1, Q_2, Q_3) = 3.256 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изгибающий момент в середине аппарата.

Находим значения

$$\left(\frac{L}{D_p}\right) = 6.818 \quad \left(\frac{H_{д.Р}}{D_p}\right) = 0.25$$

По графику на рис. П3 находим коэффициент  $f_1$  [1, 6, 13]

$$f_1 := 0.235$$

$$M_1 := G_{Г.И.} \cdot \left(f_1 \cdot \frac{L}{1000} - \frac{a}{1000}\right) = 4.662 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в сечении над опорой

$$M_2 := 0.125 \cdot G_{Г.И.} \cdot \left[ \frac{\left(\frac{l}{1000}\right)^2}{\left[\frac{L}{1000} + \left(\frac{4}{3}\right) \cdot \frac{H_{д.Р}}{1000}\right]} \right] = 63489.767 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в сечении над приварной опорой в случае её скольжения по опорной плите.

Высоты ребер опоры

$$h_1 := 174 \text{ мм}$$

$$h_2 := 765 \text{ мм}$$

$$M_3 := M_2 + 0.08 \cdot G_{Г.И.} \cdot \left(\frac{h_1}{1000} + \frac{h_2}{1000}\right) = 1.302 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Горизонтальная сила (перпендикулярная к оси аппарата).

По графику на рис. П4 находим коэффициент  $K_{18}$  для значения угла обхвата

опорным листом  $140^\circ$  [1, 6, 13]

$$K_{18} := 0.24$$

$R_{доп} > R_{Г.И}$  - Условие = "выполняется"

Окончательный выбор толщин стенок

$$s_{исп.ц} := \max(s_{ГОСТ.ц.вн}, s_{ГОСТ.ц.н})$$

$$s_{исп.ц} = 24 \text{ мм}$$

Конструктивный расчет укрепления цилиндрических обечаек кольцами жесткости, работающих под  $R_{нар}$ .

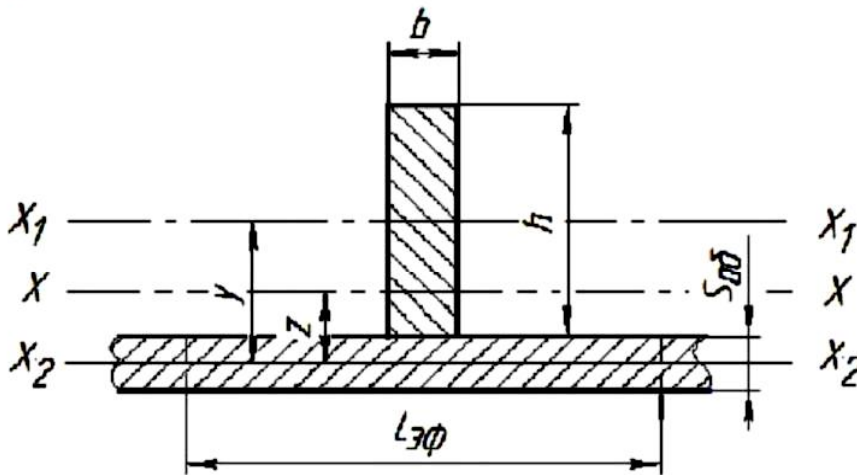
Должно выполняться условие

$$J_x \geq J_{треб.}$$

Требуемый момент инерции кольца жесткости

$$J_{треб} := \left( \frac{1}{12} \right) \cdot \left[ \left( \frac{1.18 \cdot D_A^3 \cdot R_{Г.И}}{E_1} \right) - (s_{исп.ц} - C_{кор})^3 \right]$$

$$J_{треб} = 2.167 \cdot 10^7 \text{ мм}^4$$



Расчетная схема сечения кольца жесткости с обечайкой

Принимаем толщину кольца жесткости, мм  $s_{КОЛ} := 15$

Принимаем высоту кольца жесткости, мм  $h_{КОЛ} := 100$

Момент инерции кольца жесткости

$$J_{КОЛ} := \frac{\pi}{8} \cdot \left[ \left[ D_A + (s_{исп.ц} - C_{кор}) + h_{КОЛ} \right]^3 - \left[ D_A + (s_{исп.ц} - C_{кор}) \right]^3 \right] \cdot (s_{исп.ц} - C_{кор})$$

$$J_{КОЛ} = 1.16 \cdot 10^{10} \text{ мм}^4$$

Площадь поперечного сечения кольца жесткости:  $S_{КОЛ} := s_{КОЛ} \cdot h_{КОЛ} = 1500 \text{ мм}^2$

Расстояние между осями  $x_1-x_1$  и  $x_2-x_2$

$$y := \left( \frac{h_{КОЛ}}{2} \right) + \left( \frac{s_{исп.ц}}{2} \right) = 62 \text{ мм}$$



Эффективная длина обечайки, участвующая в укреплении, мм

$$L_{\text{эф}} := 1 - \left[ \frac{J_{\text{кол}}}{J_{\text{кол}} + \left[ \frac{1 \cdot (s_{\text{исп.ц}} - C_{\text{кор}})}{36} \right]^3} \right] \cdot \left[ 1 - s_{\text{кол}} - 1.1 \cdot \sqrt{D_A \cdot (s_{\text{исп.ц}} - C_{\text{кор}})} \right] = 251$$

Площадь поперечного сечения обечайки в пределах зоны укрепления

$$S_{\text{об}} := L_{\text{эф}} \cdot (s_{\text{исп.ц}} - C_{\text{кор}}) = 5776.75 \text{ мм}^2$$

Расстояние между осями x-x и x<sub>2</sub>-x<sub>2</sub>

$$z := \frac{S_{\text{кол}} \cdot l}{S_{\text{кол}} + S_{\text{об}}} \text{ мм}$$

Геометрический момент инерции сечения кольца жесткости с обечайкой

$$J_{\text{геом}} := J_{\text{кол}} + S_{\text{кол}} \cdot (y - z)^2 + \frac{L_{\text{эф}} \cdot (s_{\text{исп.ц}} - C_{\text{кор}})^3}{12} \cdot \left[ 1 + 12 \cdot \left[ \frac{z}{(s_{\text{исп.ц}} - C_{\text{кор}})} \right]^2 \right] = 1.432 \cdot 10^{10} \text{ мм}^4$$

☑

$$\text{Условие} := \begin{cases} \text{"выполняется"} & \text{if } J_{\text{геом}} \geq J_{\text{треб}} \\ \text{"не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

☐

$$J_{\text{геом}} \geq J_{\text{треб}} \cdot \text{Условие} = \text{"выполняется"}$$

Проверочный расчет укрепления цилиндрических обечайек кольцами жесткости.

Допустимое давление:

$$P_{\text{доп}} := 0.85 \cdot E_1 \cdot 10^{-6} \cdot \left[ \frac{12 \cdot J_{\text{геом}} + 1 \cdot (s_{\text{исп.ц}} - C_{\text{кор}})^3}{D_A^3} \right] = 5.71 \text{ МПа}$$

☑

$$\text{Условие} := \begin{cases} \text{"выполняется"} & \text{if } P_{\text{доп}} \geq P_{\text{Г.И}} \\ \text{"не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

☐

$$P_{\text{доп}} \geq P_{\text{Г.И}} \cdot \text{Условие} = \text{"выполняется"}$$

☑

$$\text{Условие} := \begin{cases} \text{"выполняется"} & \text{if } \frac{1.3 \cdot P_{\text{Г.И}} \cdot l \cdot D_A}{s_{\text{кол}} + 1 \cdot (s_{\text{исп.ц}} - C_{\text{кор}})} \leq \sigma_{\text{T}} \\ \text{"не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

☐

$$\left[ \frac{1.3 \cdot P_{\text{Г.И}} \cdot l \cdot D_A}{s_{\text{кол}} + 1 \cdot (s_{\text{исп.ц}} - C_{\text{кор}})} \right] = 226.038 \text{ МПа}$$

$$\frac{1.3 \cdot P_{\text{ГИ}} \cdot l \cdot D_a}{s_{\text{КОЛ}} + 1 \cdot (s_{\text{ИСП.Ц}} - C_{\text{КОР}})} \leq \sigma_T - \text{Условие} = \text{"выполняется"}$$

Конструктивный прочностной расчет эллиптического днища, работающего под  $P_{\text{нар}}$

Коэффициент приведения радиуса кривизны эллиптического днища

$$K_3 := 0.9$$

$$s_{\text{Д.Н}} := \left( \frac{K_3 \cdot D_A}{300} \right) \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{Г.И}}}{(E_1 \cdot 10^{-6})}} + C_{\text{КОР}} = 20.416 \text{ мм}$$

▣

$$s_{\text{ГОСТ.Д.Н}} := \begin{cases} \text{ceil}(s_{\text{Д.Н}}) & \text{if } s_{\text{Д.Н}} \leq 6 \\ \text{ceil}(s_{\text{Д.Н}}) & \text{if } 6 < s_{\text{Д.Н}} < 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{Д.Н}}, 2)}{2} \right) = 0 \\ \text{ceil}(s_{\text{Д.Н}}) & \text{if } 6 < s_{\text{Д.Н}} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{Д.Н}}, 2)}{2} \right) > 0.5 \\ (\text{ceil}(s_{\text{Д.Н}}) + 1) & \text{if } 6 < s_{\text{Д.Н}} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{Д.Н}}, 2)}{2} \right) \leq 0.5 \\ (\text{ceil}(s_{\text{Д.Н}})) & \text{if } s_{\text{Д.Н}} = 50 \\ (\text{ceil}(s_{\text{Д.Н}}) + 4) & \text{if } s_{\text{Д.Н}} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{Д.Н}}, 5)}{5} \right) \leq 0.2 \\ (\text{ceil}(s_{\text{Д.Н}}) + 3) & \text{if } s_{\text{Д.Н}} > 50 \wedge 0.2 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{Д.Н}}, 5)}{5} \right) \leq 0.4 \\ (\text{ceil}(s_{\text{Д.Н}}) + 2) & \text{if } s_{\text{Д.Н}} > 50 \wedge 0.4 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{Д.Н}}, 5)}{5} \right) \leq 0.6 \\ (\text{ceil}(s_{\text{Д.Н}}) + 1) & \text{if } s_{\text{Д.Н}} > 50 \wedge 0.6 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{Д.Н}}, 5)}{5} \right) \leq 0.8 \\ (\text{ceil}(s_{\text{Д.Н}})) & \text{if } s_{\text{Д.Н}} > 50 \wedge 0.8 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{Д.Н}}, 5)}{5} \right) \leq 1 \\ (\text{ceil}(s_{\text{Д.Н}})) & \text{if } s_{\text{Д.Н}} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{Д.Н}}, 5)}{5} \right) = 0 \end{cases}$$

▣

Принимаем  $s_{\text{ГОСТ.Д.Н}} = 22 \text{ мм}$

Проверочный прочностной расчет днищ, работающих под  $P_{\text{нар}}$

$$P_{\text{доп}} := 9 \cdot 10^{-6} \cdot E_1 \cdot \left[ \frac{100(s_{\text{ГОСТ.ц.вн}} - C_{\text{кор}})}{K_3 \cdot D_A} \right]^2 = 0.897 \text{ МПа}$$



Условие :=  $\left\{ \begin{array}{l} \text{"выполняется"} \text{ if } P_{\text{доп}} \geq P_{\text{Г.И}} \\ \text{"не выполняется"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$



$P_{\text{доп}} \geq P_{\text{Г.И}}$  - Условие = " выполняется"

$$s_{\text{исп.д}} := \max(s_{\text{ГОСТ.д.вн}}, s_{\text{ГОСТ.д.н}})$$

$$s_{\text{исп.д}} = 22 \text{ мм}$$

*Расчет корпуса рубашки*

Расчетное давление  $P_{\text{расч}} := 1.25 \cdot p_p = 0.75 \text{ МПа}$

Коэффициент прочности сварного шва  $\varphi := 1$

Принимаем прибавку на коррозию  $C_{\text{кор}} := 1 \text{ мм}$

Расчет цилиндрической части рубашки:

$$s_{\text{ц.р}} := \left( \frac{P_{\text{расч}} \cdot D_p}{2.3 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{доп2}} - P_{\text{расч}}} \right) + C_{\text{кор}}$$

$$s_{\text{ц.р}} = 6.367 \text{ мм}$$



$s_{\text{ГОСТ.ц.р}} := \left\{ \begin{array}{l} \text{ceil}(s_{\text{ц.р}}) \text{ if } s_{\text{ц.р}} \leq 6 \\ \text{ceil}(s_{\text{ц.р}}) \text{ if } 6 < s_{\text{ц.р}} < 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.р}}, 2)}{2} \right) = 0 \\ \text{ceil}(s_{\text{ц.р}}) \text{ if } 6 < s_{\text{ц.р}} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.р}}, 2)}{2} \right) > 0.5 \\ (\text{ceil}(s_{\text{ц.р}}) + 1) \text{ if } 6 < s_{\text{ц.р}} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.р}}, 2)}{2} \right) \leq 0.5 \\ (\text{ceil}(s_{\text{ц.р}})) \text{ if } s_{\text{ц.р}} = 50 \\ (\text{ceil}(s_{\text{ц.р}}) + 4) \text{ if } s_{\text{ц.р}} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.р}}, 5)}{5} \right) \leq 0.2 \\ (\text{ceil}(s_{\text{ц.р}}) + 3) \text{ if } s_{\text{ц.р}} > 50 \wedge 0.2 < \left( \frac{\text{mod}(s_{\text{ц.р}}, 5)}{5} \right) \leq 0.4 \end{array} \right.$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 (\text{ceil}(s_{ц.р}) + 2) \text{ if } s_{ц.р} > 50 \wedge 0.4 < \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.р}, 5)}{5} \right) \leq 0.6 \\
 (\text{ceil}(s_{ц.р}) + 1) \text{ if } s_{ц.р} > 50 \wedge 0.6 < \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.р}, 5)}{5} \right) \leq 0.8 \\
 (\text{ceil}(s_{ц.р})) \text{ if } s_{ц.р} > 50 \wedge 0.8 < \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.р}, 5)}{5} \right) \leq 1 \\
 (\text{ceil}(s_{ц.р})) \text{ if } s_{ц.р} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{ц.р}, 5)}{5} \right) = 0
 \end{array} \right.$$

▣

Принимаем  $s_{ГОСТ.ц.р} = 8$  мм

Проверочный прочностной расчет

$$P_{доп} := \frac{2.3 \cdot \varphi \cdot \sigma_{доп2} \cdot (s_{ГОСТ.ц.р} - C_{кор})}{D_p + (s_{ГОСТ.ц.р} - C_{кор})}$$

$$P_{доп} = 0.978 \text{ МПа}$$

▣

$$\text{Условие} := \begin{cases} \text{"выполнено"} & \text{if } P_{Г.И.р} \leq P_{доп} \\ \text{"не выполнено"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

▣

$P_{Г.И.р} \leq P_{доп}$  - Условие = "выполнено"

Расчет эллиптической части рубашки

$$s_{д.р} := \left( \frac{P_{расч} \cdot D_p}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_{доп2} - P_{расч}} \right) \cdot \left( \frac{D_p}{2 \cdot H_{д.р}} \right) + C_{кор}$$

$$s_{д.р} = 7.165 \text{ мм}$$

▣

$$s_{ГОСТ.д.р} := \left\{ \begin{array}{l}
 \text{ceil}(s_{д.р}) \text{ if } s_{д.р} \leq 6 \\
 \text{ceil}(s_{д.р}) \text{ if } 6 < s_{д.р} < 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{д.р}, 2)}{2} \right) = 0 \\
 \text{ceil}(s_{д.р}) \text{ if } 6 < s_{д.р} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{д.р}, 2)}{2} \right) > 0.5 \\
 (\text{ceil}(s_{д.р}) + 1) \text{ if } 6 < s_{д.р} < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(s_{д.р}, 2)}{2} \right) \leq 0.5
 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l}
 (\text{ceil}(s_{д.р})) \text{ if } s_{д.р} = 50 \\
 (\text{ceil}(s_{д.р}) + 4) \text{ if } s_{д.р} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{д.р}, 5)}{5} \right) \leq 0.2 \\
 (\text{ceil}(s_{д.р}) + 3) \text{ if } s_{д.р} > 50 \wedge 0.2 < \left( \frac{\text{mod}(s_{д.р}, 5)}{5} \right) \leq 0.4 \\
 (\text{ceil}(s_{д.р}) + 2) \text{ if } s_{д.р} > 50 \wedge 0.4 < \left( \frac{\text{mod}(s_{д.р}, 5)}{5} \right) \leq 0.6 \\
 (\text{ceil}(s_{д.р}) + 1) \text{ if } s_{д.р} > 50 \wedge 0.6 < \left( \frac{\text{mod}(s_{д.р}, 5)}{5} \right) \leq 0.8 \\
 (\text{ceil}(s_{д.р})) \text{ if } s_{д.р} > 50 \wedge 0.8 < \left( \frac{\text{mod}(s_{д.р}, 5)}{5} \right) \leq 1 \\
 (\text{ceil}(s_{д.р})) \text{ if } s_{д.р} > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(s_{д.р}, 5)}{5} \right) = 0
 \end{array}$$

□

Принимаем  $s_{ГОСТ.д.р} = 8$  мм

Проверочный прочностной расчет

$$P_{доп} := \left[ \frac{8 \cdot \varphi \cdot \sigma_{доп1} \cdot (s_{ГОСТ.д.р} - C_{кор})}{D_p + \left( 2 \cdot \frac{H_{д.р}}{D_p} \right) \cdot (s_{ГОСТ.д.р} - C_{кор})} \right] \cdot \left( \frac{H_{д.р}}{D_p} \right) \quad s_{д.р} := \left( \frac{P.p}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_{д.р}} \right)$$

$$P_{доп} = 0.902 \text{ МПа}$$

□

Условие := "выполняется" if  $R_{Г.И.р} \leq P_{доп}$

□

"не выполняется" otherwise

$R_{Г.И.р} \leq P_{доп}$  - Условие = "выполняется"

□

$$\begin{array}{l}
 s_{ГОСТ.д.р} := y \leftarrow s_{ГОСТ.д.р} \\
 \text{while } R_{Г.И.р} > \left[ \frac{8 \cdot \varphi \cdot \sigma_{доп1} \cdot (y - C_{кор})}{D_p + \left( 2 \cdot \frac{H_{д.р}}{D_p} \right) \cdot (y - C_{кор})} \right] \cdot \left( \frac{H_{д.р}}{D_p} \right) \\
 \quad | y \leftarrow y + 1 \text{ if } b > y
 \end{array}$$

$$\begin{cases} y \leftarrow y + 2 & \text{if } 6 \leq y < 50 \\ y \leftarrow y + 5 & \text{if } y \geq 50 \end{cases}$$

Принимаем  $s_{\text{ГОСТ.д.Р}} = 10 \text{ мм}$

*Определение массы аппарата*

Монтажный вес

$$\rho_{\text{стали}} := 7800 \text{ кг/м}^3$$

Масса корпуса аппарата

$$m_{\text{к.А}} := \left[ \left( \frac{D_{\text{А}}}{1000} + 2 \cdot \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right)^2 - \left( \frac{D_{\text{А}}}{1000} \right)^2 \right] \cdot \left( \frac{\pi}{4} \right) \cdot \frac{L}{1000} \cdot \rho_{\text{стали}} = 17854.903 \text{ кг}$$

Масса днища аппарата

$$m_{\text{д.А}} := S_{\text{д}} \cdot \frac{s_{\text{исп.д}}}{1000} \cdot \rho_{\text{стали}} = 830.544 \text{ кг}$$

Масса корпуса рубашки

$$m_{\text{к.Р}} := \left[ \left( \frac{D_{\text{Р}}}{1000} + 2 \cdot \frac{s_{\text{ГОСТ.ц.Р}}}{1000} \right)^2 - \left( \frac{D_{\text{Р}}}{1000} \right)^2 \right] \cdot \left( \frac{\pi}{4} \right) \cdot \frac{L}{1000} \cdot \rho_{\text{стали}} = 6492.692 \text{ кг}$$

Масса днища рубашки

$$m_{\text{д.Р}} = S_{\text{д.Р}} \cdot \frac{s_{\text{ГОСТ.д.Р}}}{1000} \cdot \rho_{\text{стали}} = 430.56 \text{ кг}$$

$$m_{\text{МОНТ}} := 1.1 \cdot (m_{\text{к.А}} + m_{\text{к.Р}} + 2m_{\text{д.А}} + 2 \cdot m_{\text{д.Р}}) + 3 \cdot m_{\text{оп}} = 30504.783 \text{ кг}$$

Вес при гидроиспытаниях

$$\rho_{\text{воды}} := 1000 \text{ кг/м}^3$$

Объем корпуса аппарата

$$V_{\text{к}} := \left[ \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{D_{\text{Р}}}{1000} \right)^2 \right] \cdot \frac{L}{1000} = 57.02 \text{ м}^3$$

$$G_{\text{Г.И.}} := [m_{\text{МОНТ}} + \rho_{\text{воды}} \cdot (V_{\text{к}} + 2 \cdot V_{\text{д.Р}})] \cdot 9.8 = 8.879 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

*Расчет нагрузок, действующих на аппарат со стороны опоры*

Выбор типа опоры

$$\left( \frac{G_{\text{Г.И.}}}{n} \right) = 2.96 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$G_{\text{оп}} = 3 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\left( \frac{G_{\text{Г.И.}}}{n} \right) < G_{\text{оп}} \text{ условие выполняется}$$

Расчет нагрузок, действующих на аппарат со стороны опоры. Реакция опоры.

Расстояние от крайней опоры до точки приложения перерезывающей силы  $Q_{\text{п}}$

$$a := 0.2 \cdot L = 3000$$

$$e_w := a + \left(\frac{2}{3}\right) \cdot H_d = 3333.333 \text{ мм}$$

Находим

$$\left(\frac{e}{l}\right) = 1.111$$

По графику на рис. П1 определяем коэффициент  $\psi_i$  для каждой опоры

$$\psi_1 := 1.1$$

$$\psi_2 := 0.8$$

$$Q_1 := \left(\frac{\psi_1 \cdot G_{Г.И.}}{n}\right) = 3.256 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$Q_2 := \left(\frac{\psi_2 \cdot G_{Г.И.}}{n}\right) = 2.368 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$Q_3 := Q_1 = 3.256 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$Q_{\max} := \max(Q_1, Q_2, Q_3) = 3.256 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Изгибающий момент в середине аппарата.

Находим значения

$$\left(\frac{L}{D_p}\right) = 6.818 \quad \left(\frac{H_{д.р}}{D_p}\right) = 0.25$$

По графику на рис. П3 находим коэффициент  $f_1$ 

$$f_1 := 0.235$$

$$M_1 := G_{Г.И.} \cdot \left(f_1 \cdot \frac{L}{1000} - \frac{a}{1000}\right) = 4.662 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в сечении над опорой

$$M_2 := 0.125 \cdot G_{Г.И.} \cdot \left[ \frac{\left(\frac{1}{1000}\right)^2}{\left[\frac{L}{1000} + \left(\frac{4}{3}\right) \cdot \frac{H_{д.р}}{1000}\right]} \right] = 63489.767 \text{ Н м}$$

Изгибающий момент в сечении над приварной опорой в случае её скольжения по опорной плите.

Высоты ребер опоры

$$h_1 := 174 \text{ мм}$$

$$h_2 := 765 \text{ мм}$$

$$M_3 := M_2 + 0.08 \cdot G_{Г.И.} \cdot \left(\frac{h_1}{1000} + \frac{h_2}{1000}\right) = 1.302 \cdot 10^5 \text{ Н м}$$

Горизонтальная сила(перпендикулярная к оси аппарата).

По графику на рис. П4 находим коэффициент  $K_{18}$  для значения угла обхватаопорным листом  $140^\circ$ 

$$K_{18} := 0.24$$

$$P_1 := K_{18} \cdot Q_{\max} = 78136.622 \text{ Н}$$

Горизонтальная сила трения, параллельная оси аппарата

$$P_2 := 0.15 \cdot Q_{\max} = 48835.389 \text{ Н}$$

Находим

$$\frac{H_{д.Р}}{L} = 0.037 \quad \frac{a}{L} = 0.2$$

По рис. П6 находим коэффициент  $f_4$

$$f_4 := 0.575$$

Перерезывающая сила  $Q_{\Pi}$

$$Q_{\Pi} := f_4 \cdot 0.5 \cdot G_{Г.И.} = 2.553 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

*Конструктивный расчет размеров опорной плиты*

Расчетная площадь опорной плиты

$\sigma_{\text{доп.бет}} := 10 \text{ МПа}$  - допускаемое напряжение сжатия бетона фундамента марки 500

$$S_{\text{п.расч}} := \left( \frac{Q_{\max}}{\sigma_{\text{доп.бет}} \cdot 1000000} \right) = 0.033 \text{ м}^2$$

Принимаем площадь опорной плиты равной

$$S_{\Pi} := 0.8 \text{ м}^2$$

Определим напряжение сжатия бетона

$$\sigma_{\text{бет}} := \left( \frac{\sigma_{\text{доп.бет}} \cdot S_{\text{п.расч}}}{S_{\Pi}} \right) = 0.407 \text{ МПа}$$

Принимаем расчетную толщину опорной плиты

$b := 0.38 \text{ м}$  - ширина поперечных ребер

$c := 0.475 \text{ м}$  - расстояние между поперечными ребрами

Находим

$$\frac{b}{c} = 0.8$$

По графику на рис. П5 находим коэффициент  $K_{19}$

$$K_{19} := 0.6$$

$\sigma_{\text{доп.п}} := 140 \text{ МПа}$  - допускаемое напряжение для материала плиты

$$s_{\text{расч.п}} := 2.45 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{K_{19} \cdot \sigma_{\text{бет}}}{1.1 \cdot \sigma_{\text{доп.п}}}} = 0.037 \text{ м}$$

Принимаем исполнительную толщину опорной плиты равной

$$s_{\text{исп.п}} := 30 \text{ мм}$$



Расчетная толщина ребра из условия прочности на изгиб и растяжение определяется по формуле

$$s_{\text{расч.реб.изг}} := \left( \frac{42 \cdot P_1}{1.1 \cdot \sigma_{\text{доп.п}} \cdot D_p} \right) = 9.686 \text{ мм}$$

Принимаем:  $s_{\text{исп.реб.изг}} := 10 \text{ мм}$

Расчетная толщина ребер из условия устойчивости

$l_{\text{общ}} := c \cdot (n - 1) + 2 \cdot b \cdot n = 3.23 \text{ м}$  - общая длина всех ребер на опоре

$$q := \left( \frac{1.2 \cdot Q_{\text{max}}}{l_{\text{общ}}} \right) = 1.21 \cdot 10^5 \text{ Н/м} - \text{нагрузка на единицу длины ребра}$$

$$\sigma_{\text{кр}} := 3.6 \cdot E_3 \cdot \left( \frac{s_{\text{исп.реб.изг}}}{h_2} \right)^2 = 44.069 \text{ МПа} - \text{критическое напряжение}$$

$\sigma_T := 210 \text{ МПа}$  - предел текучести для материала опоры

$$\sigma_{\text{доп.кр}} := \min \left( \frac{\sigma_{\text{кр}}}{5}, \frac{\sigma_T}{3} \right) = 8.814 \text{ МПа} - \text{допускаемое напряжение на устойчивость}$$

$$s_{\text{расч.реб.уст}} := \left( \frac{q}{\sigma_{\text{кр}} \cdot 1000000} \right) = 0.003 \text{ м}$$

Принимаем:  $s_{\text{исп.реб.уст}} := 2 \text{ мм}$

$$s_p := \max(s_{\text{исп.реб.изг}}, s_{\text{исп.реб.уст}}) = 10 \text{ мм}$$

*Прочностной расчет опорной плиты.*

Условие прочности опоры при действии изгибающей силы  $P_2$

$$W_{\text{г.с}} := \frac{\frac{W_{\text{оп}}}{1000} \cdot \left( \frac{l_{\text{оп}}}{1000} \right)^3 - 4 \cdot \left( \frac{W_{\text{оп}}}{1000} - b \right) \cdot (c)^3}{6 \cdot \frac{l_{\text{оп}}}{1000}} = 0.253 \text{ м}^3$$

$$\sigma_{p2} := \frac{P_2 \cdot \frac{h_1}{1000}}{W_{\text{г.с}}} = 33617.327 \text{ Па} = 0.0334 \text{ МПа} <$$

$< \sigma_{\text{доп.п}} = 140 \text{ МПа}$  - условие выполняется

В случае приварной опоры

$$\sigma_{P2пр} := \left[ \frac{0.5 \cdot P_2 \cdot \left[ \left( \frac{h_1}{1000} \right) + \left( \frac{h_2}{1000} \right) \right]}{0.253} \right] = 90625.355 \text{ Па} < \sigma_{\text{доп.п}} = 140 \text{ МПа}$$

- условие выполняется

Расчет корпуса на прочность.

Прочность стенки цилиндрической обечайки от действия внутреннего давления и изгибающих моментов от реакции опор.

В середине пролета

$$\sigma_1 := \left[ \frac{P_{Г.И} \cdot \left( \frac{D_A}{1000} \right)}{4 \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right]} \right] + 1.275 \cdot \left[ \frac{M_1}{\left( \frac{D_A}{1000} \right)^2 \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right]} \right] = 6.46 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

= 6.46 МПа <  $\sigma_{\text{доп1}} = 142 \text{ МПа}$  - условие выполняется.

Над опорой

$K_6 := 1$  - при расположении колец жесткости в опорном сечении.

$$\sigma_2 := \left[ \frac{P_{Г.И} \cdot \left( \frac{D_A}{1000} \right)}{4 \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right]} \right] + \left[ \frac{1.275 \cdot M_2}{K_6 \cdot \left( \frac{D_A}{1000} \right)^2 \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right]} \right] =$$

=  $8.799 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0.88 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп1}} = 142 \text{ МПа}$  - условие выполняется.

Проверочный расчет на устойчивость от действия наружного давления и изгибающих моментов  $M_1$  и  $M_2$ :

$$M_{\text{доп.р}} := 0.25 \cdot \pi \cdot \left( \frac{D_A}{1000} \right) \cdot \left[ \left( \frac{D_A}{1000} \right) + \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right] \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right] \cdot \sigma_{\text{доп1}}$$

$$M_{\text{доп.р}} = 10.378 \text{ МН м}$$

$$n_y := 2$$

$$M_{\text{доп.Е}} := \left[ \frac{89 \cdot 10^{-6} \cdot E_1 \cdot \left( \frac{D_A}{1000} \right)^2}{n_y} \right] \cdot \left[ \frac{100 \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right]}{\left( \frac{D_A}{1000} \right)} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right]}{\left( \frac{D_A}{1000} \right)}}$$

$$M_{\text{доп.Е}} = 48.217 \text{ МН*м}$$

$$M_{\text{доп}} := \left( \frac{M_{\text{доп.р}}}{\sqrt{1 + \frac{M_{\text{доп.р}}}{M_{\text{доп.Е}}}}} \right) = 9.415 \text{ МН м}$$

$$P_{\text{доп}} := 1.172 \text{ МПа}$$

$$\varphi_1 := \left( \frac{P_{\text{Г.И.Р}}}{P_{\text{доп}}} \right) + \left( \frac{M_1}{M_{\text{доп}} \cdot 10^6} \right) = 0.852 < 1 - \text{условие выполняется}$$

$$\varphi_2 := \left( \frac{P_{\text{Г.И.Р}}}{P_{\text{доп}}} \right) + \left( \frac{M_2}{M_{\text{доп}} \cdot 10^6} \right) = 0.809 < 1 - \text{условие выполняется}$$

Проверочный расчет по напряжениям растяжения в выпуклом днище

По графику на рис. Пб находим коэффициент  $K_9$  для угла обхвата опорным листом  $140^\circ$

$$K_9 := 0.33$$

$$\sigma_d := 2 \cdot K_9 \cdot \left[ \frac{Q_{\text{max}}}{\left[ \left( \frac{D_A}{1000} \right) \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right] \right]} \right] \dots = 9.213 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

$$+ \frac{P_{\text{Г.И.Р}} \cdot 10^6 \cdot \left[ \left( \frac{D_A}{1000} \right) + 0.5 \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right] \right]}{2 \cdot \varphi \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right]}$$

$$\sigma_d = 90.2 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп1}} = 142 \text{ МПа} - \text{условие выполняется}$$

Проверочный расчет по напряжению среза

$$\tau := 0.64 \cdot \frac{Q_{\text{II}}}{\left[ \left( \frac{D_A}{1000} \right) \cdot \left[ \left( \frac{s_{\text{исп.ц}}}{1000} \right) - \left( \frac{C_{\text{кор}}}{1000} \right) \right] \right]} = 3.552 \cdot 10^6 \text{ Па} < 0.8 \cdot \sigma_{\text{доп1}} = 113.6 \text{ МПа}$$

Условие выполняется

Рис. 2.4. Листинг программы расчета горизонтального аппарата с кольцами жесткости

## **Глава 3. Колонные аппараты**

### **3.1. Типы колонных аппаратов**

Колонные аппараты предназначены для проведения тепло- и массообменных процессов, например, ректификации, дистилляции, абсорбции и др. Процессы проводят при температурах не ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и не выше  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$  при избыточном давлении: 1) до 1 МПа ( $10\text{ кгс/см}^2$ ) - для аппаратов с регулярной насадкой; 2) до 1,6 МПа ( $16\text{ кгс/см}^2$ ) - для аппаратов с насыпной насадкой; 3) до 2,5 МПа ( $25\text{ кгс/см}^2$ ) - для аппаратов с тарелками; 4) без давления под вакуумом (остаточное давление не ниже 665 Па (5 мм рт.ст.)).

Колонные аппараты изготавливают: царговые – диаметром 400 -800 мм, цельносварные – диаметром 1000 – 3600 мм. На корпусе царговых колонных аппаратов предусматриваются фланцевые разъемы. На цельносварные колонные аппараты привариваются накладки под площадки обслуживания. В химической промышленности применяются два типа колонных аппаратов: тарельчатые (рис. 3.1) и насадочные (рис. 3.2).

Последовательность расчета колонного аппарата выполняется в соответствии с указаниями, приведенными в ГОСТ Р 52857.1-6,9,11,12-2007, ГОСТ Р 51273-99 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий». На рис. 3.3 приведена структурная схема алгоритма расчета колонного аппарата.

### **3.2. Расчет колонного аппарата**

Для расчета на прочность выбрана цельносварная тарельчатая абсорбционная колонна непрерывного действия. Блок-схема алгоритма расчета колонны приведена на рис. 3.4.

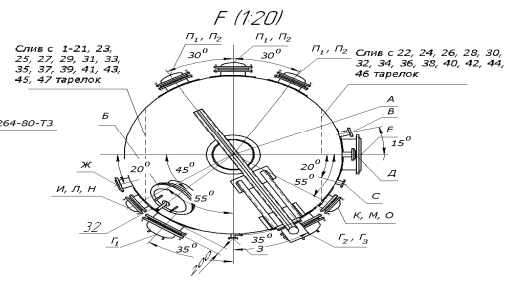
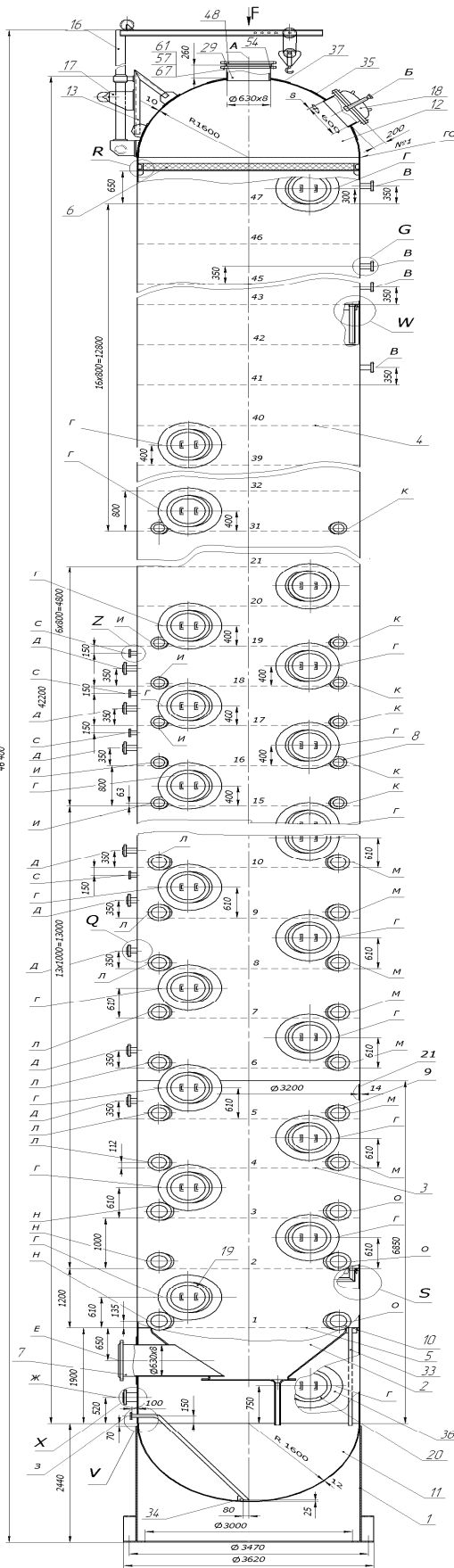


Таблица штуцеров

Обозначение	Наименование	Кол.	Проход условн., мм	Давл. условн., МПа
А	Выход газа	1	600	1
Б	Люк	1	600	1
В	Вход конденсата	4	70	1
Г <sub>1</sub>	Лаз	15	500	1
Г <sub>2</sub>	Лаз	15	500	1
Г <sub>3</sub>	Лаз	1	600	1
Д	Вход кислоты	11	80	1
Е	Вход нитрозных газов	1	600	1
Ж	Выход кислоты	1	150	1
З	Спуск	1	50	1
И	Вход воды в двухрядный змеевик	9	200	1
К	Выход воды из двухрядного змеевика	9	200	1
Л	Вход воды в четырехрядный змеевик	11	225	1
М	Выход воды из четырехрядного змеевика	11	225	1
Н	Вход воды в пятирядный змеевик	3	250	1
О	Выход воды из пятирядного змеевика	3	250	1
П <sub>1</sub>	Переточный штуцер	42	350	1
П <sub>2</sub>	Переточный штуцер	27	300	1
С	Выпуск хлоридов	8	40	1

Техническая характеристика

1. Аппарат предназначен для абсорбции окислов азота водой.
2. Рабочее давление: в колонне  $P_{изб} = 0,65$  МПа; в змеевиках  $P_{изб} = 0,63$  МПа.
3. Расчетное давление: в колонне  $P_{изб} = 0,8$  МПа; в змеевиках  $P_{изб} = 0,63$  МПа.
4. Рабочая температура в колонне:  $t = 35-50$  °С; в змеевиках  $t = 30$  °С.
5. Расчетная температура внизу колонны  $50$  °С; вверху колонны  $35$  °С.
6. Рабочая среда: в колонне: нитрозные газы, токсичная; в змеевиках: вода.
7. Поверхность теплообмена  $713$  м<sup>2</sup>.
8. Емкость аппарата  $34,5$  м<sup>3</sup>.

Технические требования

1. Колонну изготовить в соответствии с ПБ 03-576-03 "Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением".
2. Материал деталей корпуса - сталь 08Х18Н10Т ГОСТ 5632-72; материал опор - сталь 08Х18Н10Т ГОСТ 5632-72.
3. Колонна поставляется на место монтажа тремя частями.
4. Части колонны испытать гидравлическим давлением в горизонтальном положении. Нижнюю часть - 1,56 МПа, среднюю часть 1,4 МПа, верхнюю 1,25 МПа.
5. Сварные стыковые швы корпуса колонны испытать на отсутствие склонности к межкристаллитной коррозии по методу АМ ГОСТ 6032-58.
6. Колонну в сборе на монтаже испытать гидравлическим давлением 1,1 МПа в вертикальном положении.

Рис. 3.1. Тарельчатый колонный аппарат для абсорбции окислов азота

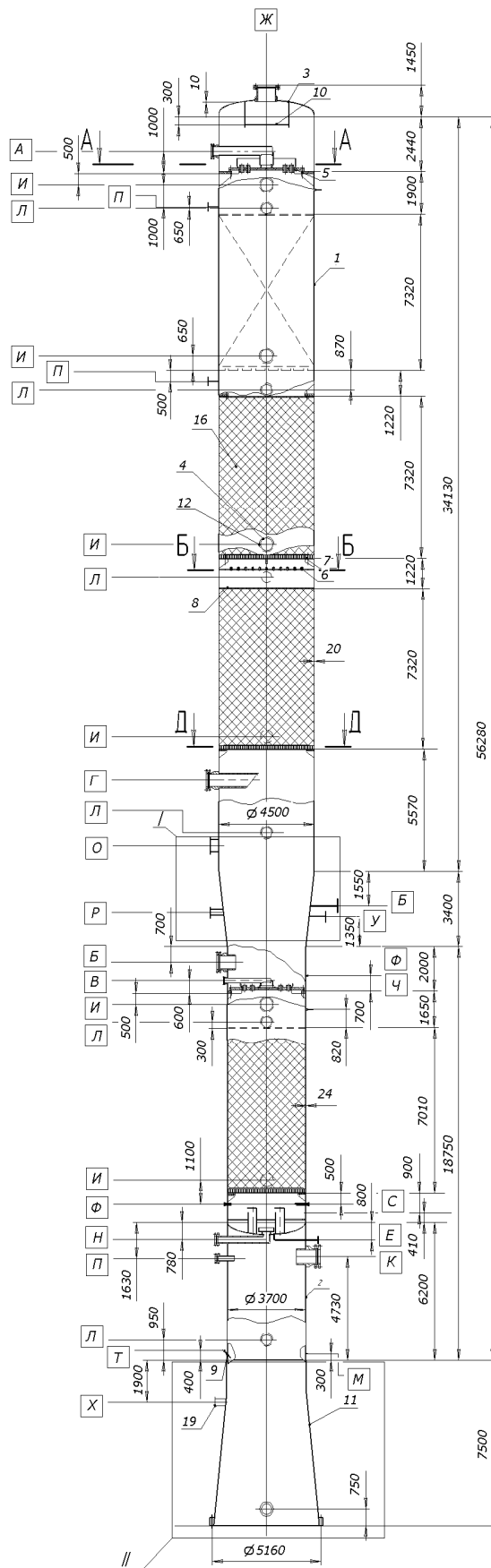
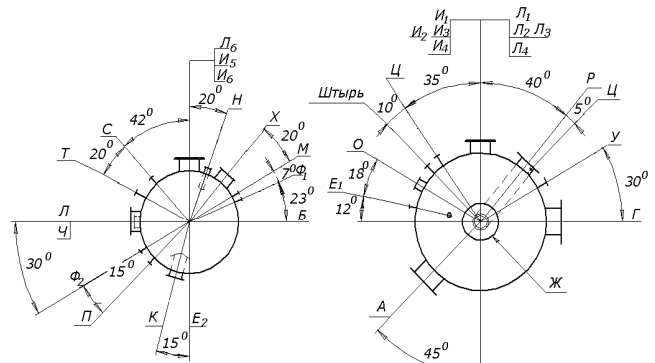


Таблица штуцеров

Обозначение	Наименование	Кол.	Условн. проход, мм	Условн. давление, МПа
А	Вход жидкости	1	400	0,175
Б	Выход газа	1	600	0,175
В	Вход жидкости	1	200	0,175
Г	Вход газа	1	600	0,175
Е	Дренажный	2	80	0,175
Ж	Выход газа	1	750	0,175
И	Смотровой люк	6	600	0,175
К	Возврат из кипятыльника	1	600	0,175
Л	Люк	6	500	0,175
М	Для манометра	1	20	0,6
Н	Подача в кипятыльник	1	250	0,175
О	Выход жидкости	1	450	0,175
П	Паровой	1	200	0,175
Р	Нижний выход	1	200	0,175
С	Пар карсола	1	50	0,175
Т	Для ртутного манометра	1	80	0,175
У	Воздушка	1	50	0,175
Ф	Флегма	2	50	0,175
Х	Выход жидкости	1	300	0,175
Ц	Пробоотборник	1	20	0,175
Ч	Вход воды	1	40	0,175

Схема расположения штуцеров, люков и штырей



Нижней части аппарата

Верхней части аппарата

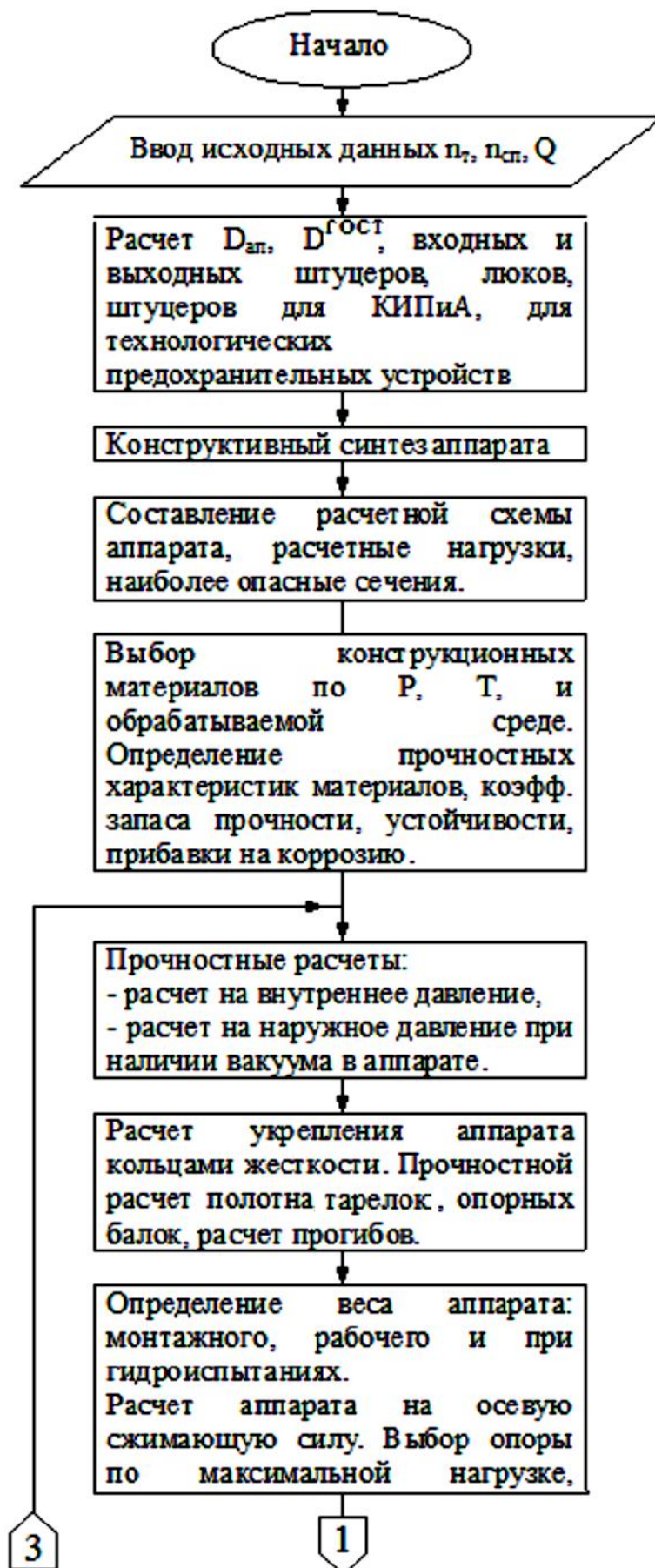
**Техническая харктеристика**

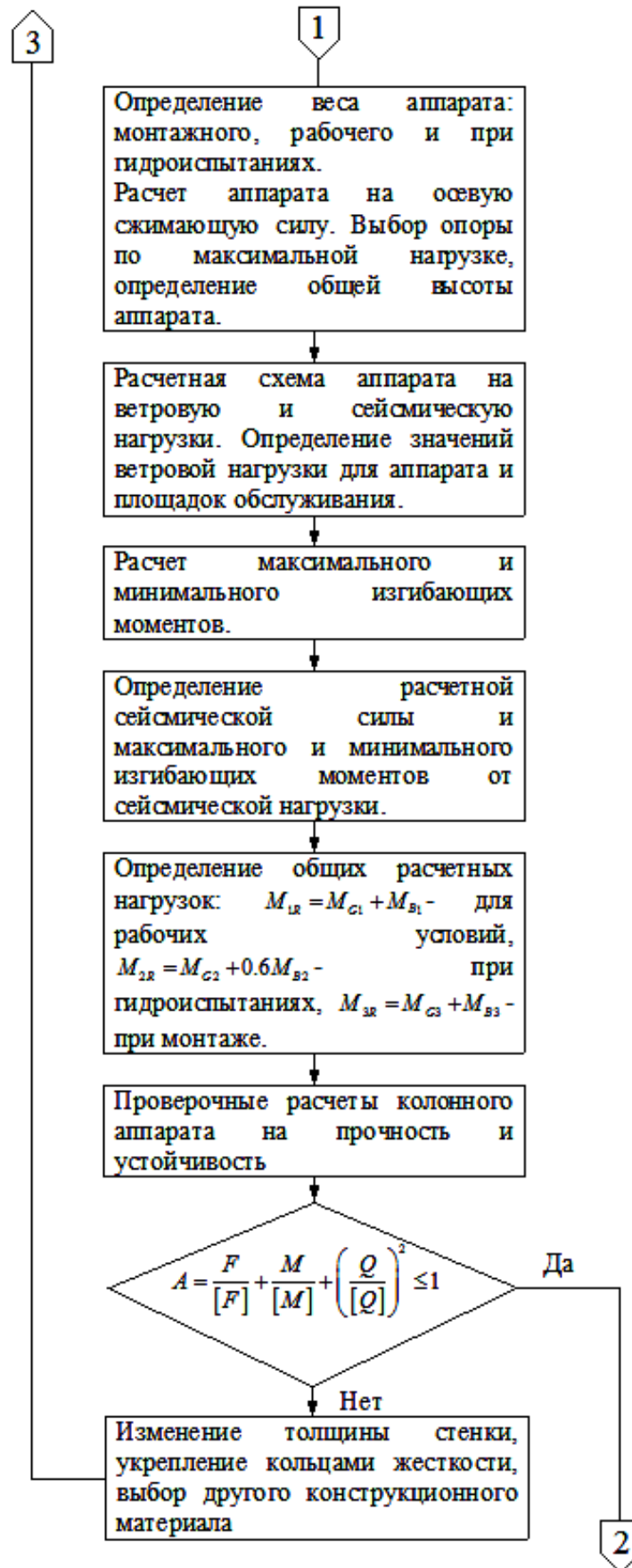
1. Аппарат предназначен для регенерации раствора "Карсол".
2. Емкость номинальная 786 куб. м.
3. Производительность 98,9 кг/с.
4. Давление в колонне 0,175 МПа.
5. Температура среды в кубе 130<sup>0</sup>С.
6. Среда в аппарате - токсичная, коррозионная.
7. Тип колонны - насадочная.
8. Общая высота насадки 29 м.

**Технические требования**

1. При изготовлении, испытании и поставке аппарата должны выполняться требования:
  - а). ГОСТ 12.2.003-74 "Оборудование производственное. Общие требования безопасности";
  - б). ГОСТ 26.291-79 "Сосуды и аппараты стальные сварные. Технические требования".
2. Материал деталей колонны, соприкасающихся с разделяемыми жидкостями, сталь 03Х16Н11 ГОСТ 5632-72, остальных - Ст 3 ГОСТ 380-71.
3. Аппарат испытать на прочность и плотность гидравлически в горизонтальном положении давлением 0,2 МПа, в вертикальном положении - наливом.
4. Сварные соединения должны соответствовать требованиям ОСТ 26-01-82-77 "Сварка в химическом машиностроении".
5. Сварные швы в объеме 100% контролировать рентгено-просвечиванием.
6. Действительное расположение штуцеров, люков и штырей см. на схеме.
7. Неуказанный вылет штуцеров 150 мм.
8. \*Размеры для справок.

Рис. 3.2. Насадочный колонный аппарат для регенерации раствора «карсол»







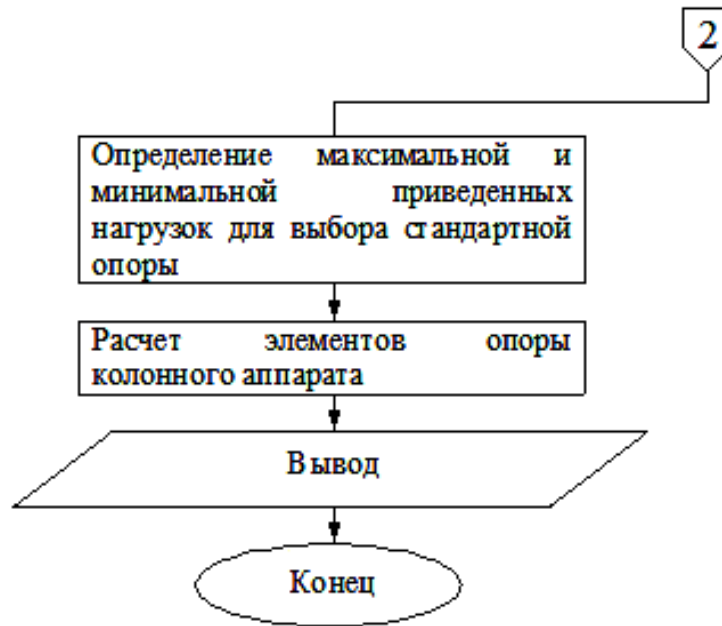
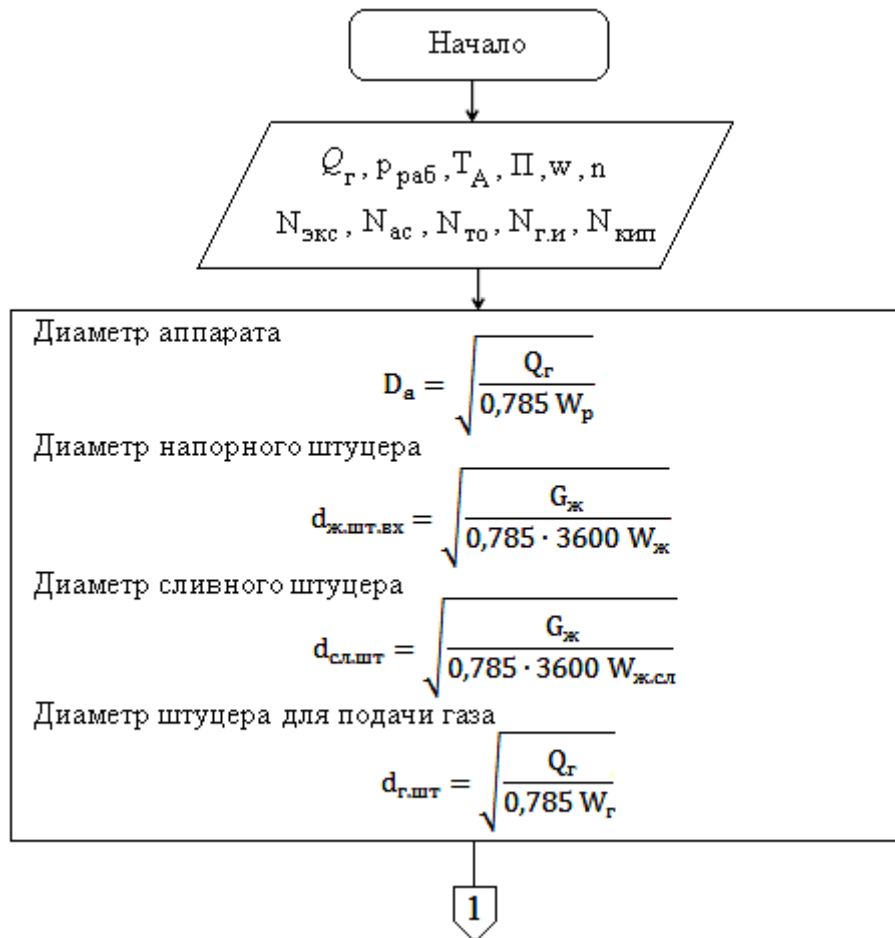
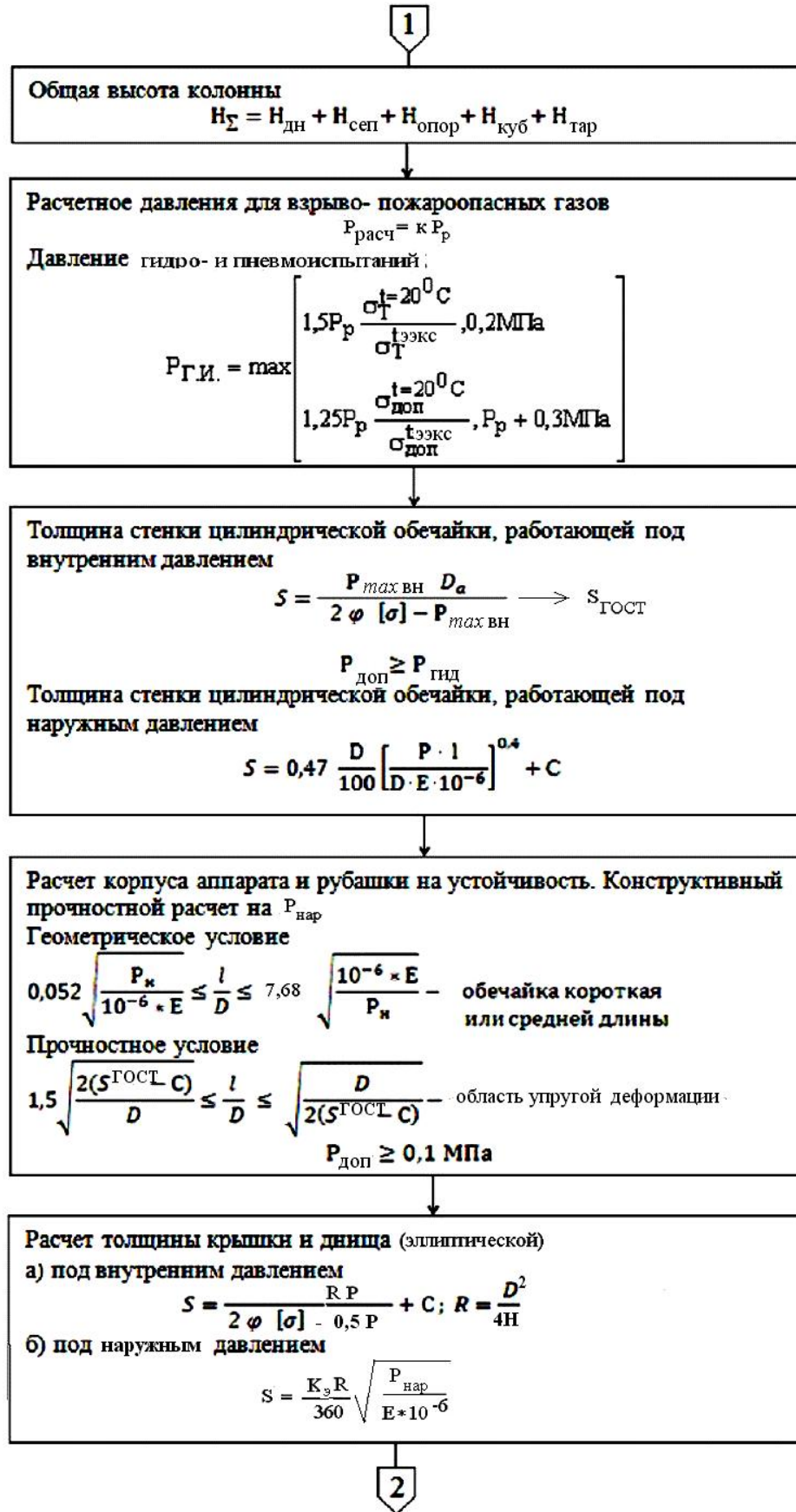
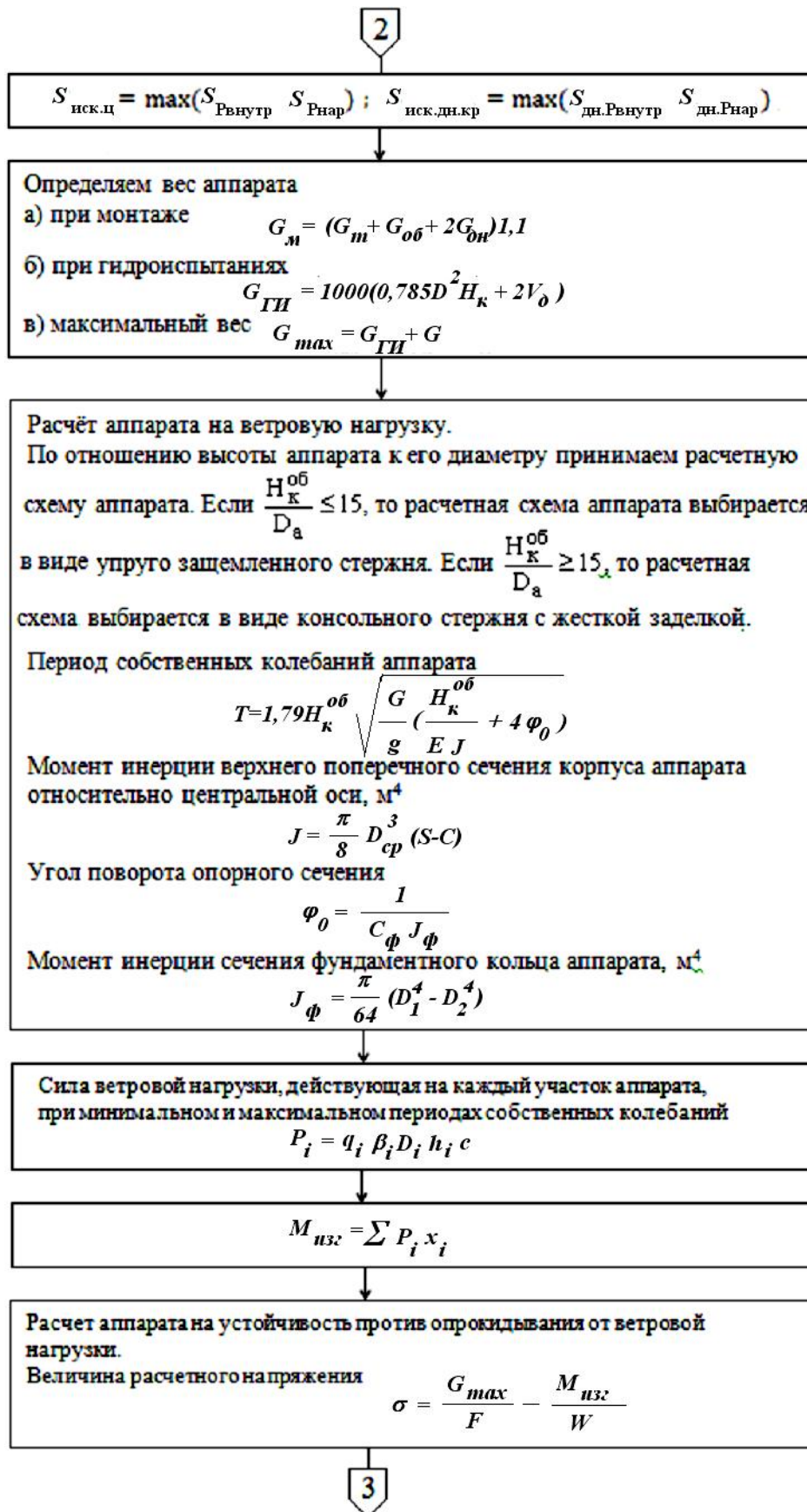


Рис. 3.3. Структурная схема алгоритма расчета колонного аппарата.









4

Проверочный расчет корпуса при рабочих условиях.  
 Продольное меридиональное напряжение на наветренной стороне

$$\sigma_{x1} = \frac{P(D+S)}{4(S-C)} - \frac{G_{max}}{\pi D(S-C)} + \frac{4M_{изг}}{\pi D^2(S-C)}$$

Меридиональное напряжение на подветренной стороне

$$\sigma_{x2} = \frac{P(D+S)}{4(S-C)} - \frac{G_{max}}{\pi D(S-C)} - \frac{4M_{изг}}{\pi D^2(S-C)}$$

Кольцевые напряжения

$$\sigma_y = \frac{Pp(D+S)}{2(S-C)} \leq \tau_{доп}$$

Эквивалентное напряжение на наветренной стороне

$$\sigma_{E1} = \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1}\sigma_y \frac{\varphi_m}{\varphi_p} + \left(\sigma_y \frac{\varphi_m}{\varphi_p}\right)^2} \leq \sigma_{доп}$$

Эквивалентное напряжение с подветренной стороны

$$\sigma_{E2} = \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2}\sigma_y \frac{\varphi_m}{\varphi_p} + \left(\sigma_y \frac{\varphi_m}{\varphi_p}\right)^2} \leq \sigma_{доп}$$

Расчет плоской круглой пластины, ослабленной отверстием.  
 Максимальное значение напряжения

$$G_{max} = \frac{3}{8} \left(3 + \frac{1}{\mu}\right) \frac{PR^2}{n^2}$$

Нагрузка на пластину

$$P = \frac{G_{ж} + G_{тар}}{F}$$

Толщина пластины

$$h = K_2 b \sqrt{\frac{P}{\sigma_{доп} \varphi_0}}$$

Максимальный прогиб пластины

$$y = K \frac{b^4 P}{E(h-C)^3} \leq y_{доп}$$

Расчет опорных балок.  
 Общая масса на балку

$$m_{об} = \frac{4 l b}{\pi D^2} (m_m + \rho_{ж} + h_{сл})$$

Расчетный изгибающий момент балки

$$M_{изг. балки} = 0,125 m_{об} q l$$

Расчетный момент сопротивления балки

$$W_{рас} = \frac{M_{изг. балки}}{\sigma_{доп}}$$

Момент инерции балки

$$J_x = \frac{26 m_{об} 9,8 l^2}{E}$$

$W_{рас}$  и  $J_x$  стандартного профиля

5

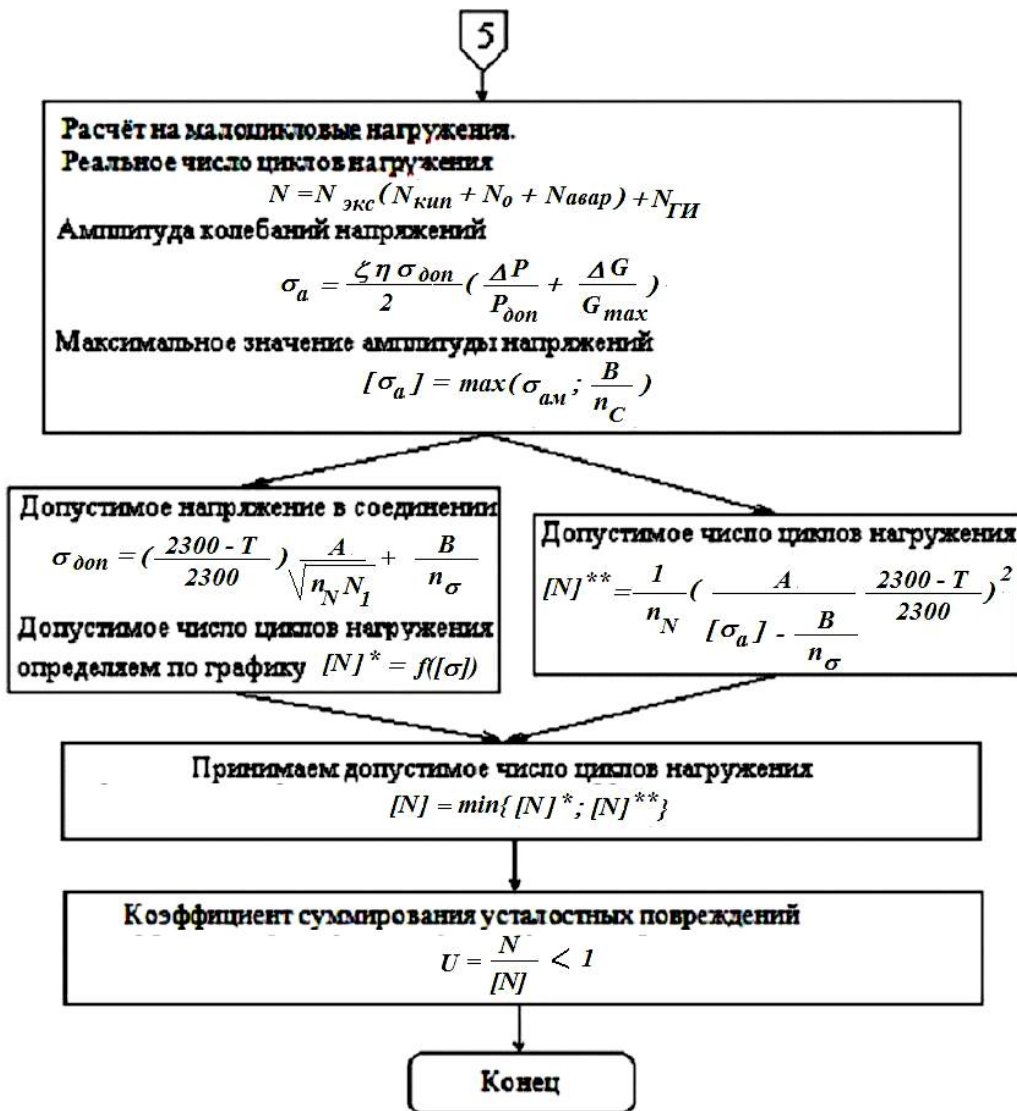


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритма расчета колонного аппарата

В соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 3.4, составлена программа расчета тарельчатого колонного аппарата в системе Mathcad 15. Листинг программы расчета приведен на рис. 3.5

#### *Исходные данные*

Аппарат колонный тарельчатый цельносварной  
 Тип тарелок - колпачковые  
 Географический район - Восточная Сибирь

Среда в аппарате - бензин, легкие и тяжелые газойли

Материал аппарата - сталь 20

Число контактных ступеней	$n := 40$
Производительность аппарата по газовой фазе, $\text{м}^3/\text{с}$	$Q_{\Gamma} := 14$
Рабочее давление в аппарате, МПа	$P_{\text{раб}} := 0.015$
Температура среды в аппарате, $^{\circ}\text{C}$	$T_A := 60$
Плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	$\Pi := 9$
Рабочая скорость газа в аппарате, $\text{м}/\text{с}$	$w_{\text{раб}} := 1$
Ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$	$g := 9.81$

Циклы нагружения:

циклы эксплуатации	$N_{\text{экс}} := 100$
аварийные ситуации	$N_{\text{ас}} := 10$
технические остановки	$N_{\text{то}} := 25$
гидравлические испытания	$N_{\text{Г.И}} := 15$
срабатывание средств автоматизации	$N_{\text{кип}} := 40$

Узел, рассчитываемый на малоцикловое нагружение - днище-опора

Расчет

Диаметр аппарата, м

$$D_A := \sqrt{\frac{Q_{\Gamma}}{0.785 \cdot w_{\text{раб}}}} = 4.223$$

В соответствии с ГОСТ 9617-76 принимаем стандартный диаметр аппарата, мм

$$D_A := 4500$$

По диаметру аппарата подбираем эллиптическую крышку

и днище с наружным базовым диаметром [6, стр.116, табл. 7.2],

Внутренний диаметр днища, мм	$D_{\text{д}} := 4500$
Высота выпуклой части днища, мм	$H_{\text{д}} := 1125$
Высота цилиндрической части днища, мм	$h_{\text{д}} := 80$
Площадь внутренней поверхности днища, $\text{м}^2$	$F_{\text{д}} := 23.08$
Вместимость днища, $\text{м}^3$	$V_{\text{д}} := 13.1529$
Принимаем размеры крышки равными размерам днища	

$$V_{\text{кр}} := V_{\text{д}}$$

*Общая высота колонны*

Высота стандартной опорной конструкции, м	$H_{\text{оп}} := 2$
Высота стандартной крышки аппарата, м	$H_{\text{д}} := 1.125$
Высота кубовой части колонны, м	$H_{\text{куб}} := 3.5$
Высота сепарационной части аппарата, м	$H_{\text{сеп}} := 2$
Высота одной контактной ступени, м	$h_{\text{т}} := 1$
Число контактных ступеней	$n := 40$

Общая высота контактных ступеней, м

$$H_{\text{т}} := (n - 1) \cdot h_{\text{т}}$$

$$H_{\text{т}} = 39$$

Расчетная высота колонны, м

$$H_{\text{А.расч}} := H_{\text{д}} + H_{\text{сеп}} + H_{\text{оп}} + H_{\text{куб}} + H_{\text{т}}$$

$$H_{\text{А.расч}} = 47.625$$

Принимаем общую высоту колонны 48 метров.

$$H_{\text{А}} := 48000 \text{ мм}$$

Расход жидкой фазы, м<sup>3</sup>/ч

$$G_{\text{ж}} := \frac{\pi \cdot (D_{\text{А}} \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot \Pi$$

$$G_{\text{ж}} = 143.139$$

*Расчет штуцеров*

Принимаем рабочую скорость жидкости в штуцере на входе в аппарат, м/с

$$w_{\text{шт.ж.вх}} := 5$$

Диаметр напорного штуцера, м

$$d_{\text{ж.шт.вх}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{ж}}}{\pi \cdot 3600 \cdot w_{\text{шт.ж.вх}}}}$$



$$d_{\text{ж.шт.вх}} = 0.0795$$

Принимаем диаметр напорного штуцера по ГОСТу, мм

$$d_{\text{ж.шт.вх.ГОСТ}} := 80$$

Принимаем скорость жидкости в штуцере на выходе из аппарата, м/с

$$w_{\text{шт.ж.вых}} := 0.2$$

Определим диаметр сливного штуцера, м

$$d_{\text{шт.ж.вых}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{ж}}}{\pi \cdot 3600 \cdot w_{\text{шт.ж.вых}}}}$$

$$d_{\text{шт.ж.вых}} = 0.759$$

Принимаем диаметр сливного штуцера по ГОСТу, мм

$$d_{\text{шт.ж.вых.ГОСТ}} := 800$$

Принимаем скорость газа в штуцере на входе в аппарат, м/с

$$w_{\text{г.вх}} := 20$$

Диаметр штуцера для подачи газа, м

$$d_{\text{шт.г.вх}} := \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{г}}}{\pi \cdot w_{\text{г.вх}}}}$$

$$d_{\text{шт.г.вх}} = 0.944$$

Принимаем диаметр штуцера для подачи газа по ГОСТу, мм

$$d_{\text{шт.г.ГОСТ}} := 1000$$

Принимаем диаметр штуцера для удаления газа из аппарата равным диаметру штуцера для подачи газа в аппарат.

*Расчет конструктивных элементов колонны на прочность*

Допускаемые напряжения для стали марки 20 при температуре 20 °С, МПа

$$\sigma_{\text{доп.при.20.град}} := 147$$

Допускаемые напряжения для стали марки 20 при температуре 60 °С, МПа

$$\sigma_{\text{доп.при.60.град}} := 142$$

Расчетное давление в аппарате, МПа

$$P_{\text{расч}} := 1.5 \cdot P_{\text{раб}}$$

$$P_{\text{расч}} = 0.023$$

В соответствии с положениями Гортехнадзора РФ принимаем [12]:

максимальное внутреннее давление, МПа  $P_{\text{max.вн}} := 2$

максимальное внешнее давление, МПа  $P_{\text{max.внеш}} := 0.1$

Определяем класс длин обечайки в соответствии с геометрическим условием

$$0.0052 \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{нар}}}{10^{-6} \cdot E}} \leq \frac{l_T}{D_A} \leq 7.68 \sqrt{\frac{10^{-6} \cdot E}{P_{\text{нар}}}},$$

где

наружное давление, МПа

$$P_{\text{нар}} := 0.1$$

модуль продольной упругости стали, МПа

$$E := 1.99 \cdot 10^5$$

расстояние между тарелками, мм

$$l_T := 1000$$

$$0.0052 \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{нар}}}{10^{-6} \cdot E}} = 3.686 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{l_T}{D_A} = 0.222$$

$$7.68 \sqrt{\frac{10^{-6} \cdot E}{P_{\text{нар}}}} = 1.411$$

$$\text{Условие} := \begin{cases} \text{"выполняется"} & \text{if } 0.0052 \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{нар}}}{10^{-6} \cdot E}} \leq \frac{l_T}{D_A} \leq 7.68 \sqrt{\frac{10^{-6} \cdot E}{P_{\text{нар}}}} \\ \text{"не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sqrt{\frac{P_{\text{нар}}}{10^{-6} \cdot E}} \leq \frac{l_T}{D_A} \leq 7.68 \sqrt{\frac{10^{-6} \cdot E}{P_{\text{нар}}}} - \text{Условие} = \text{"выполняется"}$$

*Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки*

Прибавка на компенсацию коррозии обечайки, мм

$$C := 0.5$$

Коэффициент прочности сварных швов обечайки

$$\varphi := 1$$

$$s_{\text{ст}} := \frac{P_{\text{мах.вн}} \cdot D_A}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{доп.при.60.град}} - P_{\text{мах.вн}}} + C$$

$$s_{\text{ст}} = 32.415$$

Принимает толщину стенки цилиндрической обечайки в соответствии с ГОСТ 19903-74, мм

$$s_{\text{ст.ГОСТ}} := 34$$

Условие прочности работы обечайки в области упругих деформаций (прочностное условие)

$$1.5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} - C)}{D_A}} \leq \frac{l_T}{D_A} \leq \sqrt{\frac{D_A}{2 \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} - C)}}$$

$$1.5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} - C)}{D_A}} = 0.183$$

$$\frac{l_T}{D_A} = 0.222$$

$$\sqrt{\frac{D_A}{2 \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} - C)}} = 8.195$$

$$\text{Условие} := \begin{cases} \text{"выполняется"} & \text{if } 1.5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} - C)}{D_A}} \leq \frac{l_T}{D_A} \leq \sqrt{\frac{D_A}{2 \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} - C)}} \\ \text{"не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$1.5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} - C)}{D_A}} \leq \frac{l_T}{D_A} \leq \sqrt{\frac{D_A}{2 \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} - C)}} - \text{Условие} = \text{"выполняется"}$$

#### Расчет днища и крышки

Радиус кривизны в вершине днища, м

$$R := \frac{(D_d \cdot 10^{-3})^2}{4H_d}$$

$$R = 4.5$$

Толщина стенки днища, м

$$s_d := \frac{R \cdot P_{\text{мах.вн}}}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_{\text{доп.при.60.град}} - 0.5 \cdot P_{\text{мах.вн}}} + C \cdot 10^{-3}$$

$$s_d = 0.032$$

Принимаем толщину стенки по ГОСТу, мм

$$s_{д.ГОСТ} := 34$$

Принимаем толщину стенки крышки, равной толщине стенки днища, мм

$$s_{кр.ГОСТ} := 34$$

*Расчет веса аппарата*

Плотность стали, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{стали} := 7800$$

Наружный диаметр аппарата, мм

$$D_H := D_A + (2 \cdot s_{ст})$$

$$D_H = 4.565 \cdot 10^3$$

Масса обечайки, кг

$$m_{об} := 0.785 \cdot \left[ (D_H \cdot 10^{-3})^2 - (D_A \cdot 10^{-3})^2 \right] \cdot (H_A \cdot 10^{-3}) \cdot \rho_{стали}$$

$$m_{об} = 1.727 \cdot 10^5$$

Принимаем массу тарелки в соответствии с ОСТ 26-02-1401-76, кг

$$m_T := 626$$

Масса всех тарелок в аппарате, кг

$$m_{Т.общ} := m_T \cdot n$$

$$m_{Т.общ} = 2.504 \cdot 10^4$$

Масса днища, кг

$$m_{дн} := F_d \cdot s_{кр.ГОСТ} \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{стали}$$

$$m_{дн} = 6120.8$$

Принимаем массу крышки равной массе, кг

$$m_{кр} := m_{дн}$$

Масса вспомогательных устройств (штуцеров, измерительных приборов, люков и т.д.) составляет 11 % от основной массы колонны.

Общая масса аппарата, кг

$$m_A := 1.1 \cdot (m_{об} + m_{Т.общ} + m_{дн} + m_{кр})$$

$$m_A = 2.31 \cdot 10^5$$

Общий вес аппарата, Н

$$G_A := 1.1 \cdot (m_{об} + m_{т.общ} + m_{дн} + m_{кр}) \cdot g$$

$$G_A = 2.266 \cdot 10^6$$

*Расчет веса аппарата, заполненного водой  
при гидроиспытании*

Высота рабочей части аппарата, м

$$H_{раб.ч} := 40$$

Высота цилиндрической части обечайки, м

$$H_{цил.ч} := H_{раб.ч} + H_{сеп} + H_{куб} = 45.5$$

$$H_{цил.ч} = 45.5$$

Плотность воды, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{воды} := 1000$$

Масса воды в аппарате при гидроиспытаниях, м

$$m_{воды} := \rho_{воды} \cdot \left[ 0.785 \cdot (D_A \cdot 10^{-3})^2 \cdot H_{цил.ч} + V_d + V_{кр} \right]$$

$$m_{воды} = 7.496 \cdot 10^5$$

Вес воды в аппарате при гидроиспытаниях, Н

$$G_{воды} := \rho_{воды} \cdot \left[ 0.785 \cdot (D_A \cdot 10^{-3})^2 \cdot H_{цил.ч} + V_d + V_{кр} \right] \cdot g$$

$$G_{воды} = 7.353 \cdot 10^6$$

Общий вес аппарата с водой при гидроиспытаниях, МН

$$G_{г.и} := (G_A + G_{воды}) \cdot 10^{-6}$$

$$G_{г.и} = 9.62$$

*Предварительный выбор опоры*

По результатам расчета принимаем стандартную цилиндрическую опору типа 2 (рис. П2). Основные размеры опоры [6]:

$$D_1 := 4860 \quad \text{мм}$$

$$D_2 := 4300 \quad \text{мм}$$

$$D_6 := 4720 \quad \text{мм}$$

$$Q_{\max} := 18 \text{ МН}$$

$$Q_{\min} := 10 \text{ МН}$$

$$s_1 := 20 \text{ мм}$$

$$s_2 := 40 \text{ мм}$$

$$s_3 := 36 \text{ мм}$$

$$d_2 := 62 \text{ мм}$$

$$d_B := M56$$

$$z_B := 32$$

*Расчет аппарата на ветровую нагрузку*

Выбираем расчетную схему колонного аппарата.

Если  $\frac{H_A}{D_A} < 15$ , то расчетная схема выбирается в виде упругозащемленного стержня.

Если  $\frac{H_A}{D_A} \geq 15$ , то расчетная схема выбирается в виде консольного стержня с жесткой заделкой.

Имеем

$$\frac{H_A}{D_A} = 11$$

Поскольку  $\frac{H_A}{D_A} < 15$ , то расчетная схема принимается в виде упругозащемленного стержня.

Условно разбиваем аппарат по высоте на 5 равных участков.

Высота  $i$ -го участка, м

$$h_i := \frac{H_A \cdot 10^{-3}}{5}$$

$$h_i = 9.6$$

Вес участка принимаем сосредоточенным в середине участка.

Ветровую нагрузку равномерно распределенную по высоте аппарата, заменяем сосредоточенными силами, приложенными в середине участка.

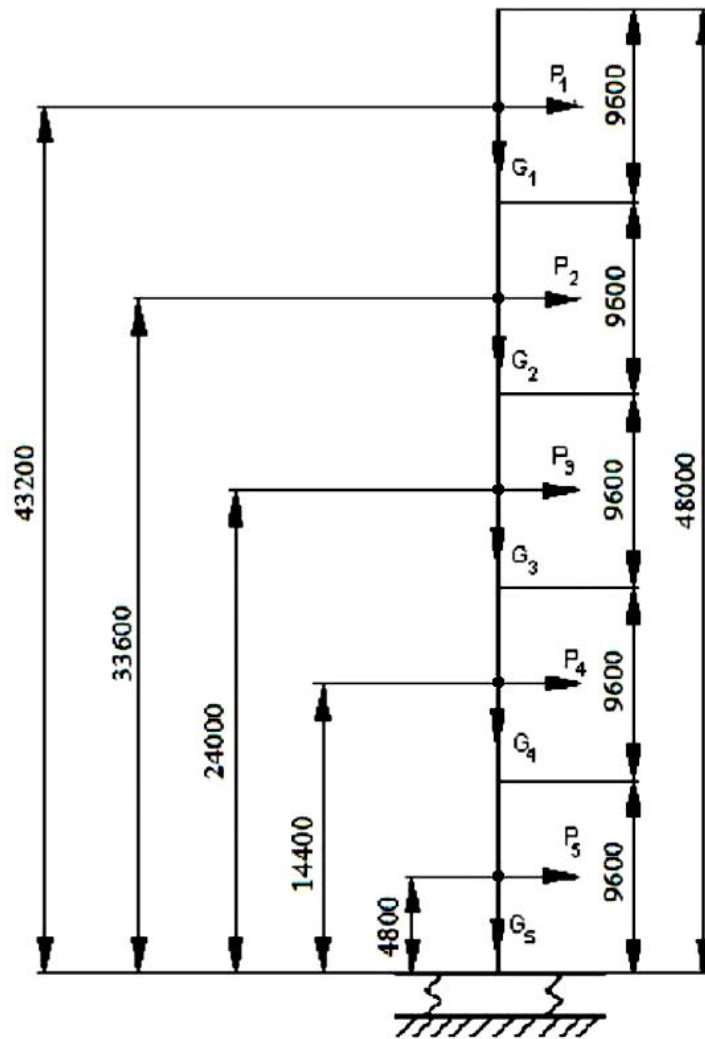


Схема разбивки аппарата на участки при расчете его на ветровую нагрузку

Коэффициент неравномерности сжатия,  $\text{MN}/\text{M}^3$

$$C_{\phi} := 50$$

Момент инерции сечения фундаментального кольца аппарата,  $\text{M}^4$

$$J_{\text{K}} := \frac{\pi}{64} \cdot \left[ \left( D_1 \cdot 10^{-3} \right)^4 - \left( D_2 \cdot 10^{-3} \right)^4 \right]$$

$$J_{\text{K}} = 10.603$$

Момент инерции подошвы фундамента относительно центральной оси,  $\text{M}^4$

$$J_{\phi} := 1.3 \cdot J_{\text{K}}$$

$$J_{\phi} = 13.784$$

Угол поворота опорного сечения, 1/(МН·м)

$$\phi_0 := \frac{1}{C_{\phi} \cdot J_{\phi}}$$

$$\phi_0 = 1.451 \cdot 10^{-3}$$

Момент инерции верхнего поперечного сечения корпуса аппарата относительно центральной оси, м<sup>4</sup>

$$D_{\text{ср}} := D_{\text{н}}$$

$$J := \frac{\pi}{8} \cdot (D_{\text{ср}} \cdot 10^{-3})^4 \cdot \left[ (s_{\text{ст.ГОСТ}} \cdot 10^{-3})^2 - (C \cdot 10^{-3})^2 \right]$$

$$J = 0.06$$

Минимальный вес аппарата, МН

$$G_{\text{min}} := G_{\text{А}} \cdot 10^{-6}$$

$$G_{\text{min}} = 2.266$$

Минимальный период собственных колебаний, с

$$T_{\text{min}} := 1.79 \cdot H_{\text{цил.ч}} \cdot \sqrt{\frac{G_{\text{min}}}{g} \cdot \left( \frac{H_{\text{цил.ч}}}{E \cdot J} + 4 \cdot \phi_0 \right)}$$

$$T_{\text{min}} = 3.838$$

Максимальный вес аппарата, МН

$$G_{\text{max}} := G_{\text{Г.и}}$$

Максимальный период собственных колебаний, с

$$T_{\text{max}} := 1.79 \cdot H_{\text{цил.ч}} \cdot \sqrt{\frac{G_{\text{max}}}{g} \cdot \left( \frac{H_{\text{цил.ч}}}{E \cdot J} + 4 \cdot \phi_0 \right)}$$

$$T_{\text{max}} = 7.907$$

Определим силу ветровой нагрузки, действующую на каждый участок аппарата, при минимальном и максимальном периодах собственных колебаний

$$P_i = q_i \beta_i D_i h_i C_{1i}, \text{ МН}$$

Здесь

$q_i = q_{\text{н.в}} \theta$ , МН/м<sup>2</sup> - усилие от ветровой нагрузки

$q_{\text{н.в}} := 0.038 \cdot 10^2$  - скоростной напор от ветра, действующий в данном районе, МН/м<sup>2</sup> [13, с. 686]



$C_1 := 0.6$  - коэффициент сопротивления аппарата

$D_i := D_H \cdot 10^{-3}$  - наружный диаметр аппарата, м

$\theta$  - поправочный коэффициент к нормативному скоростному напору

Находим по графику на рис. П10 поправочные коэффициенты  $\theta_i$  на расстояние  $x_i$  от основания колонны до центра тяжести  $i$ -го участка

$$x_1 := 43.2 \quad \theta_1 := 1.78$$

$$x_2 := 33.6 \quad \theta_2 := 1.6$$

$$x_3 := 24 \quad \theta_3 := 1.5$$

$$x_4 := 14.4 \quad \theta_4 := 1.2$$

$$x_5 := 4.8 \quad \theta_5 := 1$$

Усилие от ветрового потока,  $\text{H}/\text{м}^2$

$$q_1 := q_{\text{H.В}} \cdot 100 \cdot \theta_1 = 676.4$$

$$q_2 := q_{\text{H.В}} \cdot 100 \cdot \theta_2 = 608$$

$$q_3 := q_{\text{H.В}} \cdot 100 \cdot \theta_3 = 570$$

$$q_4 := q_{\text{H.В}} \cdot 100 \cdot \theta_4 = 456$$

$$q_5 := q_{\text{H.В}} \cdot 100 \cdot \theta_5 = 380$$

Определяем по графику на рис. П11 коэффициенты пульсации скоростного напора ветра  $m_i$  [13, с. 687]

$$x_1 := 43.2 \quad m_1 := 0.31$$

$$x_2 := 33.6 \quad m_2 := 0.33$$

$$x_3 := 24 \quad m_3 := 0.34$$

$$x_4 := 14.4 \quad m_4 := 0.35$$

$$x_5 := 4.8 \quad m_5 := 0.35$$

*Сила ветровой нагрузки при минимальном периоде собственных колебаний*

Определяем по графику на рис. П12 коэффициент динамичности  $\varepsilon$

$$\varepsilon := 2.5$$

**Коэффициент увеличения скоростного напора**

$$\beta_i = 1 + \varepsilon \cdot m_i$$

$$\beta_1 := 1 + \varepsilon \cdot m_1 = 1.775$$

$$\beta_2 := 1 + \varepsilon \cdot m_2 = 1.825$$

$$\beta_3 := 1 + \varepsilon \cdot m_3 = 1.85$$

$$\beta_4 := 1 + \varepsilon \cdot m_4 = 1.875$$

$$\beta_5 := 1 + \varepsilon \cdot m_5 = 1.875$$

**Сила ветровой нагрузки, МН**

$$P_1 := (q_1 \cdot \beta_1 \cdot D_i \cdot h_i \cdot C1) \cdot 10^{-6} = 0.032$$

$$P_2 := (q_2 \cdot \beta_2 \cdot D_i \cdot h_i \cdot C1) \cdot 10^{-6} = 0.029$$

$$P_3 := (q_3 \cdot \beta_3 \cdot D_i \cdot h_i \cdot C1) \cdot 10^{-6} = 0.028$$

$$P_4 := (q_4 \cdot \beta_4 \cdot D_i \cdot h_i \cdot C1) \cdot 10^{-6} = 0.022$$

$$P_5 := (q_5 \cdot \beta_5 \cdot D_i \cdot h_i \cdot C1) \cdot 10^{-6} = 0.019$$

**Изгибающего момента колонны, МН·м**

$$M_{\text{изг}} := P_1 \cdot x_1 + P_2 \cdot x_2 + P_3 \cdot x_3 + P_4 \cdot x_4 + P_5 \cdot x_5$$

$$M_{\text{изг}} = 3.423$$

*Сила ветровой нагрузки при максимальном периоде  
собственных колебаний при гидроиспытании*

Определяем по графику на рис. П12 коэффициент  
динамичности  $\varepsilon$

$$\varepsilon := 3.2$$

**Коэффициент увеличения скоростного напора**

$$\beta_1 := 1 + \varepsilon \cdot m_1 = 1.992$$

$$\beta_2 := 1 + \varepsilon \cdot m_2 = 2.056$$

$$\beta_3 := 1 + \varepsilon \cdot m_3 = 2.088$$

$$\beta_4 := 1 + \varepsilon \cdot m_4 = 2.12$$

$$\beta_5 := 1 + \varepsilon \cdot m_5 = 2.12$$

$$\varepsilon := 2.5$$

Сила ветровой нагрузки, МН

$$P_1 := (q_1 \cdot \beta_1 \cdot D_1 \cdot h_1 \cdot C1) \cdot 10^{-6} = 0.035$$

$$P_2 := (q_2 \cdot \beta_2 \cdot D_1 \cdot h_1 \cdot C1) \cdot 10^{-6} = 0.033$$

$$P_3 := (q_3 \cdot \beta_3 \cdot D_1 \cdot h_1 \cdot C1) \cdot 10^{-6} = 0.031$$

$$P_4 := (q_4 \cdot \beta_4 \cdot D_1 \cdot h_1 \cdot C1) \cdot 10^{-6} = 0.025$$

$$P_5 := (q_5 \cdot \beta_5 \cdot D_1 \cdot h_1 \cdot C1) \cdot 10^{-6} = 0.021$$

Определим изгибающий момент колонны, МН·м

$$M_{\text{изг}} := P_1 \cdot x_1 + P_2 \cdot x_2 + P_3 \cdot x_3 + P_4 \cdot x_4 + P_5 \cdot x_5$$

$$M_{\text{изг}} = 3.854$$

*Расчет аппарата на устойчивость против опрокидывания от ветровой нагрузки*

Определяем величину расчетного напряжения

$$\sigma = G_{\text{max}}/F - M_{\text{изг}}/W,$$

где  $G_{\text{max}}$  - максимальный вес колонны при заполнении ее водой (при гидроиспытании), МН

$$G_{\text{max}} := G_{\text{Г.И}}$$

$M_{\text{изг}}$  - общий изгибающий момент от ветровой нагрузки при максимальной силе тяжести аппарата, МН·м

$$M_{\text{изг}} := 5.79$$

Наружный диаметр опорного кольца, м

$$D_1 := (D_A \cdot 10^{-3}) + 2(s_{\text{ст.ГОСТ}} \cdot 10^{-3}) + 0.2$$

$$D_1 = 4.768$$

Внутренний диаметр опорного кольца, м

$$D_2 := (D_A \cdot 10^{-3}) - 0.06$$

$$D_2 = 4.44$$

Опорная площадь кольца, м<sup>2</sup>

$$S_{\text{кол}} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2)$$

$$S_{\text{кол}} = 2.372$$

Момент сопротивления опорной площади кольца, м<sup>3</sup>

$$W := \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D_1^4 - D_2^4}{D_1}$$

$$W = 2.64$$

Величина расчетного напряжения, МПа

$$\sigma := \frac{G_{\text{max}}}{S_{\text{кол}}} - \frac{M_{\text{изг}}}{W}$$

$$\sigma = 1.862$$

Поскольку  $\sigma \geq 0$ ,

то следует определить коэффициент устойчивости

$$K_{\text{уст}} := 0.42 \cdot \frac{G_{\text{max}} \cdot D_1}{M_{\text{изг}}}$$

$$K_{\text{уст}} = 3.327$$

Поскольку  $K_{\text{уст}} \geq 1.5$ ,

то аппарат устойчив и фундаментальные болты устанавливать необязательно (для правильной установки аппарата опоры фиксируют только четырьмя болтами М24)

*Окончательный выбор опоры и расчет опорного кольца*

Максимальная нагрузка на опору аппарата, МН

$$Q_{\text{max}} := \frac{4 \cdot M_{\text{изг}}}{D_A \cdot 10^{-3}} + G_{\text{max}}$$

$$Q_{\text{max}} = 14.766$$

По результатам вычислений принимаем опору типа 2.

Основные размеры приведены в [6].

Проверим условие устойчивости цилиндрической опоры по формуле:

$$\frac{\sigma_{\text{с}}}{\sigma_{\text{сд}}} + \frac{\sigma_{\text{и}}}{\sigma_{\text{ид}}} \leq 1.$$

Если условие выполняется, то устойчивость опоры обеспечена.

Диаметр отверстия для лаза, м

$$D_{\text{лаз}} := 0.5$$

Напряжение сжатия в стенке аппарата, МН/м<sup>2</sup>

$$\sigma_c := \frac{G_{\text{max}}}{\left[ \pi \cdot (D_H \cdot 10^{-3} - D_{\text{лаз}}) \right] \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})}$$

$$\sigma_c = 22.486$$

Определим напряжение на изгиб в той же стенке при тех же условиях, МН/м<sup>2</sup>

$$\sigma_{\text{и}} := \frac{4 \cdot M_{\text{изг}}}{\pi \cdot (D_H \cdot 10^{-3})^2 \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})}$$

$$\sigma_{\text{и}} = 10.561$$

Вычислим отношение

$$\frac{D_A \cdot 10^{-3}}{2 \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})} = 67.164$$

Для данного отношения определим коэффициенты  $k_{\text{и}}$  и  $k_{\text{с}}$  по графикам на рис. П13.

$$k_{\text{и}} := 0.08$$

$$k_{\text{с}} := 0.06$$

Предел текучести для стали 20, МН/м<sup>2</sup> [13, с. 85]

$$\sigma_T := 260$$

Определим коэффициенты  $K_{\text{и}}$  и  $K_{\text{с}}$

$$K_{\text{и}} := 875 \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot k_{\text{и}}$$

$$K_{\text{и}} = 0.091$$

$$K_{\text{с}} := 875 \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot k_{\text{с}}$$

$$K_c = 0.069$$

Допускаемое напряжение на сжатие в обечайке опоры, МН/м<sup>2</sup>

$$\sigma_{сд} := K_c \cdot E \cdot \frac{s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3}}{D_A \cdot 10^{-3}}$$

$$\sigma_{сд} = 101.617$$

Допускаемое напряжение на изгиб в обечайки опоры; МН/м<sup>2</sup>

$$\sigma_{ид} := K_{и} \cdot E \cdot \frac{s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3}}{D_A \cdot 10^{-3}}$$

$$\sigma_{ид} = 135.489$$

Имеем

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{сд}} + \frac{\sigma_{и}}{\sigma_{ид}} = 0.299$$

Поскольку  $0.299 < 1$ , то устойчивость обеспечена.

Коэффициент прочности сварного шва, соединяющего цилиндрическую опору с корпусом

$$\varphi_{оп} := 0.8$$

Максимальные напряжения сжатия и изгиба в сварном шве, соединяющем цилиндрическую опору с корпусом аппарата, МН/м<sup>2</sup>

$$\sigma_{max} := \frac{G_{max}}{\varphi_{оп} \cdot \pi \cdot (D_H \cdot 10^{-3}) \cdot (s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})} + \frac{4 \cdot M_{изг}}{\varphi_{оп} \cdot \pi \cdot (D_H \cdot 10^{-3})^2 \cdot (s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})}$$

$$\sigma_{max} = 50.973$$

Условие  $\sigma_{max} < \sigma_{сд}$  выполняется.

Максимальное напряжение сжатия на опорной поверхности кольца, МН/м<sup>2</sup>

$$\sigma_{max.кол} := \frac{G_{max}}{S_{кол}} + \frac{M_{изг}}{W}$$

$$\sigma_{max.кол} = 6.249$$

Имеем  $\sigma_{max.кол} < 10$

Расстояние от выступающей части кольца до наружного или внутреннего диаметра цилиндрической опоры, м

$$l_{кол} := 0.1$$

Номинальная расчетная толщина опорного кольца, м

$$s_{\text{кол}} := 1.7 \cdot l_{\text{кол}} \cdot \sqrt{\frac{G_{\text{max}}}{\sigma_{\text{ид}}}}$$

$$s_{\text{кол}} = 0.045$$

*Проверочный расчет поперечного сечения обечайки опоры  
в месте наибольших вырезов*

Коэффициенты, м<sup>2</sup>

$$F1 := \pi \cdot D_A \cdot 10^{-3} \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})$$

$$F1 = 0.474$$

$$f := \pi \cdot (D_A \cdot 10^{-3} - 1) \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})$$

$$f = 0.368$$

$$Sp := F1 - f$$

$$Sp = 0.105$$

$$f := 1 - \frac{1}{\pi \cdot D_A \cdot 10^{-3}}$$

$$f = 0.929$$

Момент сопротивления опорной площади кольца, м<sup>3</sup>

$$W := \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D_H \cdot 10^{-3} \cdot f)^4 - (D_A \cdot 10^{-3} \cdot f)^4}{D_H \cdot 10^{-3} \cdot f}$$

$$W = 0.417$$

Максимальное напряжение сжатия на опорной поверхности  
кольца, МПа

$$\sigma_{\text{max}} := \frac{G_{\text{max}}}{Sp} + \frac{M_{\text{изг}}}{W} = 105.297$$

Условие  $\sigma_{\text{max}} < \sigma_{\text{доп.при.100.град}}$  выполняется.

*Проверочный расчет корпуса при рабочих условиях*

Продольное меридиональное напряжение на наветренной стороне, МПа

$$\sigma_{x1} := \frac{P_{\max.вн} \cdot (D_A \cdot 10^{-3} + s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3})}{4 \cdot (s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})} - \frac{G_{\max}}{\pi \cdot D_A \cdot (s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})} + \frac{4 \cdot M_{изг}}{\pi \cdot D_A^2 \cdot (s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})}$$

$$\sigma_{x1} = 67.651$$

Продольное меридиональное напряжение на подветренной стороне, МПа

$$\sigma_{x2} := \frac{P_{\max.вн} \cdot (D_A \cdot 10^{-3} + s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3})}{4 \cdot (s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})} - \frac{G_{\max}}{\pi \cdot D_A \cdot (s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})} - \frac{4 \cdot M_{изг}}{\pi \cdot D_A^2 \cdot (s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})}$$

$$\sigma_{x2} = 67.651$$

Кольцевые напряжения, МПа

$$\sigma_y := \frac{P_{\max.вн} \cdot (D_H \cdot 10^{-3})}{2 \cdot (s_{ст.ГОСТ} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})}$$

$$\sigma_y = 136.264$$

Если  $\sigma_{x1} < 0$  , то  $\varphi_T = 1$ .

Если  $\sigma_y < 0$  , то  $\varphi_T = 1$ .

Принимаем коэффициенты прочности сварных швов



$$\varphi_T := 1$$

$$\varphi_P := 1$$

Эквивалентное напряжение на наветренной стороне, МПа

$$\sigma_{E1} := \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1} \cdot \sigma_y \cdot \frac{\varphi_T}{\varphi_P} + \left( \sigma_y \cdot \frac{\varphi_T}{\varphi_P} \right)^2}$$

$$\sigma_{E1} = 118.009$$

Эквивалентное напряжение с подветренной стороны, МПа

$$\sigma_{E2} := \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2} \cdot \sigma_y \cdot \frac{\varphi_T}{\varphi_P} + \left( \sigma_y \cdot \frac{\varphi_T}{\varphi_P} \right)^2}$$

$$\sigma_{E2} = 118.009$$

*Расчет плоской круглой пластины (тарелки),  
ослабленной отверстиями*

Площадь тарелки, м<sup>2</sup>

$$S_T := \frac{\pi \cdot (D_A \cdot 10^{-3})^2}{4}$$

$$S_T = 15.904$$

Высота жидкости на тарелке, м

$$H_{ж} := 0.075$$

Плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{ж} := 1000$$

Масса жидкости на тарелке, кг

$$m_{ж.т} := S_T \cdot H_{ж} \cdot \rho_{ж}$$

$$m_{ж.т} = 1192.8$$

Нагрузка на тарелку, МПа

$$p_T := \frac{(m_{ж.т} + m_T)}{S_T} \cdot g \cdot 10^{-6}$$

$$p_T = 1.122 \cdot 10^{-3}$$

Коэффициент, зависящий от способа крепления пластины

$$K_2 := 0.765$$

Шаг между отверстиями в тарелке, мм

$$t := 44$$

Диаметр отверстий в тарелке, мм

$$d := 2.5$$

Коэффициент ослабления тарелки

$$\Phi_{0.T} := \frac{(t - d)}{t}$$

$$\Phi_{0.T} = 0.943$$

Толщина тарелки,

$$s_T := K_2 \cdot (D_A \cdot 10^{-3}) \cdot \sqrt{\frac{P_T}{\sigma_{\text{доп.при.60.град}} \cdot \Phi_{0.T}}}$$

$$s_T = 9.963 \cdot 10^{-3}$$

Принимаем стандартную толщину листа, м

$$s_{T.ГОСТ} := 0.01$$

Радиус аппарата, м

$$R_A := \frac{D_A \cdot 10^{-3}}{2}$$

$$R_A = 2.25$$

Коэффициент Пуассона

$$\mu := 0.3$$

Максимальное напряжение в тарелке, МПа

$$\sigma_{\text{max}} := \frac{3}{8} \cdot \left( 3 + \frac{1}{\mu} \right) \cdot \frac{P_T \cdot R_A^2}{s_{T.ГОСТ}^2}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 134.888$$

Проверим условие  $\sigma_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{доп.при.60.град}}$

$$\text{Условие} := \begin{cases} \text{"выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{доп.при.60.град}} \\ \text{"не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп. при } 60^\circ \text{ град}} - \text{Условие} = \text{"выполняется"}$$

Коэффициент зависит от геометрических характеристик пластины и способов ее крепления [13].

$$K := 0.045$$

Меньшая сторона сечения тарелки, м

$$b := 0.59$$

Максимальный прогиб тарелки, м

$$y := \frac{K \cdot b^4 \cdot p_T}{E \cdot (s_{T.ГОСТ} - C \cdot 10^{-3})^3}$$

$$y = 3.585 \cdot 10^{-5}$$

Максимально допустимый прогиб тарелки, м

$$y_{\text{доп}} := \frac{1}{500} \cdot D_A \cdot 10^{-3}$$

$$y_{\text{доп}} = 9 \cdot 10^{-3}$$

Поскольку  $y_{\text{доп}} > y$ , то прочность тарелки обеспечена.

*Расчет опорных балок под тарелки*

Приблизительно принимаем, что балка свободно оперта на две опоры и воспринимает равномерно распределенную нагрузку

Длина балки, м

$$l_{\text{балк}} := 0.49$$

Расстояние между осями смежных балок, мм

$$b_{\text{балк}} := 0.59$$

Общая масса, воздействующая на балку, кг

$$m_{\text{балк.общ}} := \frac{4 \cdot l_{\text{балк}} \cdot b_{\text{балк}}}{\pi \cdot (D_A \cdot 10^{-3})^2} \cdot (m_T + \rho_{\text{ж}} \cdot H_{\text{ж}})$$

$$m_{\text{балк.общ}} = 12.742$$

Расчетный изгибающий момент, Н·м

$$M_{\text{расч.балк}} := 0.125 \cdot m_{\text{балк.общ}} \cdot g \cdot l_{\text{балк}}$$

$$M_{\text{расч.балк}} = 7.656$$

Расчетное сопротивление балки, м<sup>3</sup>

$$W_{\text{расч.балк}} := \frac{M_{\text{расч.балк}}}{\sigma_{\text{доп.при.60.град}} \cdot 10^5}$$

$$W_{\text{расч.балк}} = 5.392 \cdot 10^{-7}$$

Момент инерции балки, м<sup>4</sup>

$$J_{\text{х.балк}} := \frac{26 \cdot m_{\text{балк.общ}} \cdot g \cdot l_{\text{балк}}^2}{E}$$

$$J_{\text{х.балк}} = 3.921 \cdot 10^{-3}$$

*Расчет на малоцикловое нагружение колонны*

**Число циклов нагружения**

$$N := N_{\text{экс}} \cdot (N_{\text{кип}} + N_{\text{то}} + N_{\text{ас}}) + N_{\text{Г.И}}$$

$$N = 7515$$

**Коэффициент запаса прочности по числу циклов**

$$n_N := 10$$

**Предел временной прочности стали при 20 °С, МПа**

$$\sigma_{\text{В.при.20.град}} := 410 \quad [14]$$

**Прочностные характеристики углеродистой стали, определяемые по ГОСТ 25859-89, МПа**

$$A := 0.6 \cdot 10^5$$

$$B := 0.66 \cdot \sigma_{\text{В при 20 град}} - 0.43 \cdot \sigma_{\text{доп.при 20 град}}$$

$$B = 207.39$$

**Коэффициент запаса прочности по напряжениям**

$$n_{\sigma} := 2$$

**Допустимая амплитуда напряжений, МПа**

$$\sigma_{\text{ам.доп}} := \left( \frac{2300 - T_A}{2300} \right) \cdot \frac{A}{\sqrt{n_N \cdot N}} + \frac{B}{n_{\sigma}}$$

$$\sigma_{\text{ам.доп}} = 316.856$$

Коэффициент учета типа сварных соединений  $\zeta := 1.5$

Коэффициент, учитывающий местные напряжения  $\eta := 2$

Плотность воды, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{вода}} := 1000$$

Давление гидроиспытаний

$$P_{Г.И} := (0.2 + \rho_{\text{вода}} \cdot H_A \cdot 10^{-3} \cdot g) \cdot 10^{-6}$$

$$P_{Г.И} = 0.471$$

Допустимое давление, МПа

$$P_{\text{доп}} := \frac{2 \cdot \sigma_{\text{доп.при.60.град}} \cdot \varphi \cdot (s_{\text{ст.ГОСТ}} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})}{D_A \cdot 10^{-3} + (s_{\text{ст.ГОСТ}} \cdot 10^{-3} - C \cdot 10^{-3})}$$

$$P_{\text{доп}} = 2.099$$

Условие  $P_{\text{доп}} \geq P_{Г.И}$  выполняется

Размах колебаний давления, МПа

$$\Delta p := P_{Г.И} - P_{\text{раб}}$$

$$\Delta p = 0.456$$

Разница между максимальным весом колонны и минимальным весом колонны, МН

$$\Delta G := G_{\text{мах}} - G_{\text{мин}}$$

$$\Delta G = 7.353$$

Амплитуда колебаний напряжений при нагружении, МПа

$$\sigma_{\text{ам}} := \frac{\zeta \cdot \eta \cdot \sigma_{\text{доп.при.60.град}}}{2} \cdot \left( \frac{\Delta p}{P_{\text{доп}}} + \frac{\Delta G}{G_{\text{мах}}} \right)$$

$$\sigma_{\text{ам}} = 209.093$$

Максимальное значение амплитуды напряжений

$$\sigma_{\text{ам}} := \max \left( \sigma_{\text{ам}}, \frac{B}{n_{\sigma}} \right) = 209.093 \text{ МПа}$$

Допустимое число циклов эксплуатации

$$N_{\text{доп}} := \frac{1}{n_N} \cdot \left( \frac{A}{\sigma_{\text{ам}} - \frac{B}{n_\sigma}} \cdot \frac{2300 - T_A}{2300} \right)^2$$

$$N_{\text{доп}} = 30738.3$$

Для коэффициента суммирования усталостных повреждений должно выполняться условие

$$U := \frac{N}{N_{\text{доп}}} < 1$$

Имеем

$$U := \frac{N}{N_{\text{доп}}} = 0.244$$

Поскольку  $\frac{N}{N_{\text{доп}}} < 1$  то, условие выполняется.

**Аппарат устойчив к малоцикловым нагрузениям.**

Рис. 3.5. Листинг программы расчета колонного аппарата

## Глава 4. Аппараты высокого давления

### 4.1. Типы аппаратов высокого давления

Аппараты высокого давления (АВД) предназначены для проведения химических и физико-химических процессов при давлении от 10 МПа до 130 МПа. Ниже рассмотрены основные конструкции данных аппаратов.

*Цельносварные АВД* имеют монолитный корпус, изготовленный из одной поковки. Внутренний диаметр аппарата составляет 0,6 – 1,2 м, длина - до 18 м. Данные аппараты применяют при давлении более 32 МПа и высокой температуре, особенно при наружном обогреве корпуса.

*Кованосварные АВД* имеют корпус из нескольких механически обработанных кованых частей (обечаек, днищ, фланцев, горловины), скрепленных между собой кольцевыми сварными швами.

*Штампованные и вальцованные АВД* имеют корпус, выполненный из нескольких штампованных или вальцованных обечаек (или полуобечаек), соединенных между собой продольными и кольцевыми сварными швами, а концевые детали аппарата (днища, фланцы и горловины) изготовлены отдельно из поволоков или штамповок.

*Многослойные АВД с концентрическим расположением тонких слоев* изготавливают из нескольких обечаек, состоящих из слоев, представляющих из себя стальные листы толщиной 4 – 6 мм, обтягивающих с натягом центральную обечайку толщиной 16 – 24 мм, выполненную из коррозионно-стойкого материала. Обечайки соединены между собой и с концевыми элементами корпуса сварными швами.

*Многослойные АВД с концентрическим расположением толстых слоев* выполняют последовательной прессовкой нескольких сварных цилиндрических обечаек из толстого листа толщиной 25 – 60 мм на центральную обечайку, выполненную из коррозионно-стойкого материала.

*Многослойные АД рулонированные* имеют корпус из одной или нескольких многослойных рулонированных обечаяек, соединенных между собой концевыми элементами корпуса с кольцевыми сварными швами. Концевые элементы выполняются из поковок или штамповок. Многослойная рулонированная обечайка состоит из центральной обечайки толщиной 16 – 24 мм и намотанными на нее до необходимой толщины рулонными полосами шириной 1400 – 1800 мм и толщиной 4 – 6 мм. Снаружи на намотанную рулонную обечайку надевается защитный кожух толщиной 8 – 12 мм.

*АВБ витые из профильной ленты* выполняются из специального проката узкой стальной высокопрочной калиброванной профильной ленты, навитой на центральную обечайку с проточкой наружной поверхности по винтовой линии под профиль ленты.

*Спирально-рулонные АД* состоит из центральной обечайки, на которую навивают по спирали под углом к оси обечайки одну или несколько полос. Каждый последующий слой навивают в противоположную сторону по отношению к предыдущему. К обечайке приваривают концевые детали. Навитые на обечайку полосы закрепляют на концевых деталях сварными швами.

*АВД, армированные проволокой,* состоят из корпуса, который дополнительно укрепляется намоткой слоев высокопрочной проволоки в виде отдельного бандаж или путем сплошной намотки на весь корпус до необходимой толщины. Навивка производится по так называемым «геодезическим линиям».

В качестве примера на рис. 4.1 показана схема аппарата высокого давления конденсации и сепарации паров аммиака.



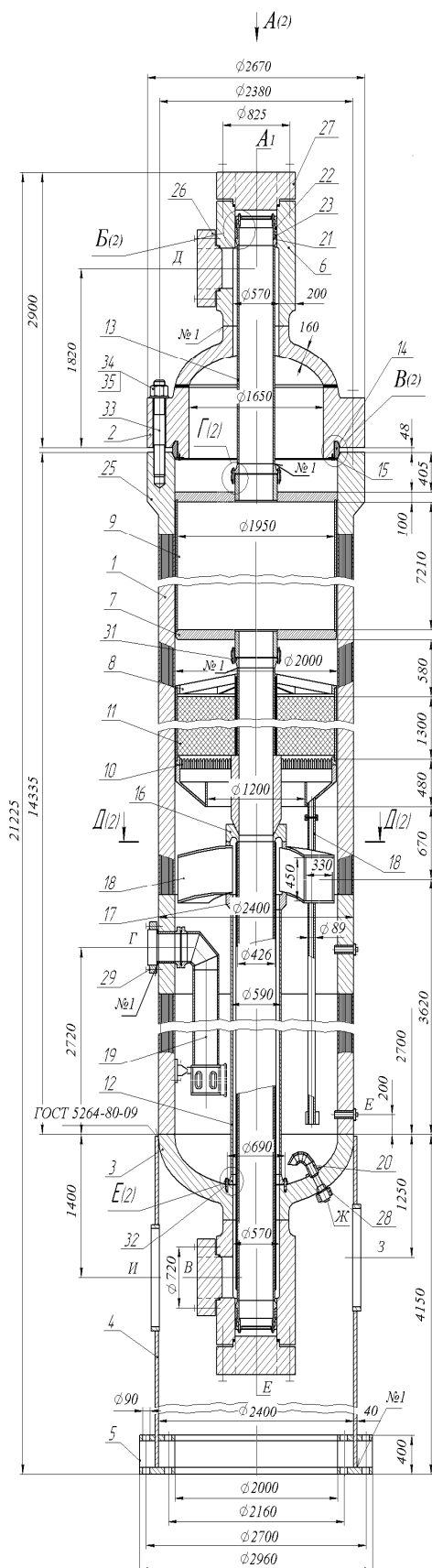


Таблица штуцеров

Обозначение	Наименование	Кол. услов. Ду, мм	Давление услов. Ру, МПа	
			Проход	усл. Ру, МПа
А	Вход газа	1	350	32
Б	Выход газа	1	350	32
В	Вход газа	1	350	32
Г	Вход свежего газа	1	200	32
Д	Выход газа	1	350	32
Е	Указатель уровня	2	15	32
Ж	Выход жидкого аммиака	1	80	32
З	Лаз	1	900	0,1
И	Лаз	1	1000	0,1

Техническая характеристика

1. Колонна предназначена для сепарации аммиака и рекуперации холода
2. Емкость:  $4,8 \text{ м}^3$
3. Производительность по газовой смеси (азотодородная смесь):  $14500 \text{ м}^3/ч$
4. Давление рабочее: 32 МПа
5. Поверхность теплообмена кожухотрубчатого теплообменника:  $2120 \text{ м}^2$
6. Рабочие параметры теплообменника  
 Межтрубное пространство:  
 температура: на входе:  $+55^\circ\text{C}$ ;  
 на выходе:  $+20^\circ\text{C}$ ;  
 Трубное пространство:  
 температура: на входе:  $-5^\circ\text{C}$ ;  
 на выходе:  $+35^\circ\text{C}$ .
7. Перепад давления не более: 1,0 МПа
8. Среда: газовая смесь:  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ , Ag-токсичная, взрывоопасная, некоррозионная  
 Жидкий аммиак.

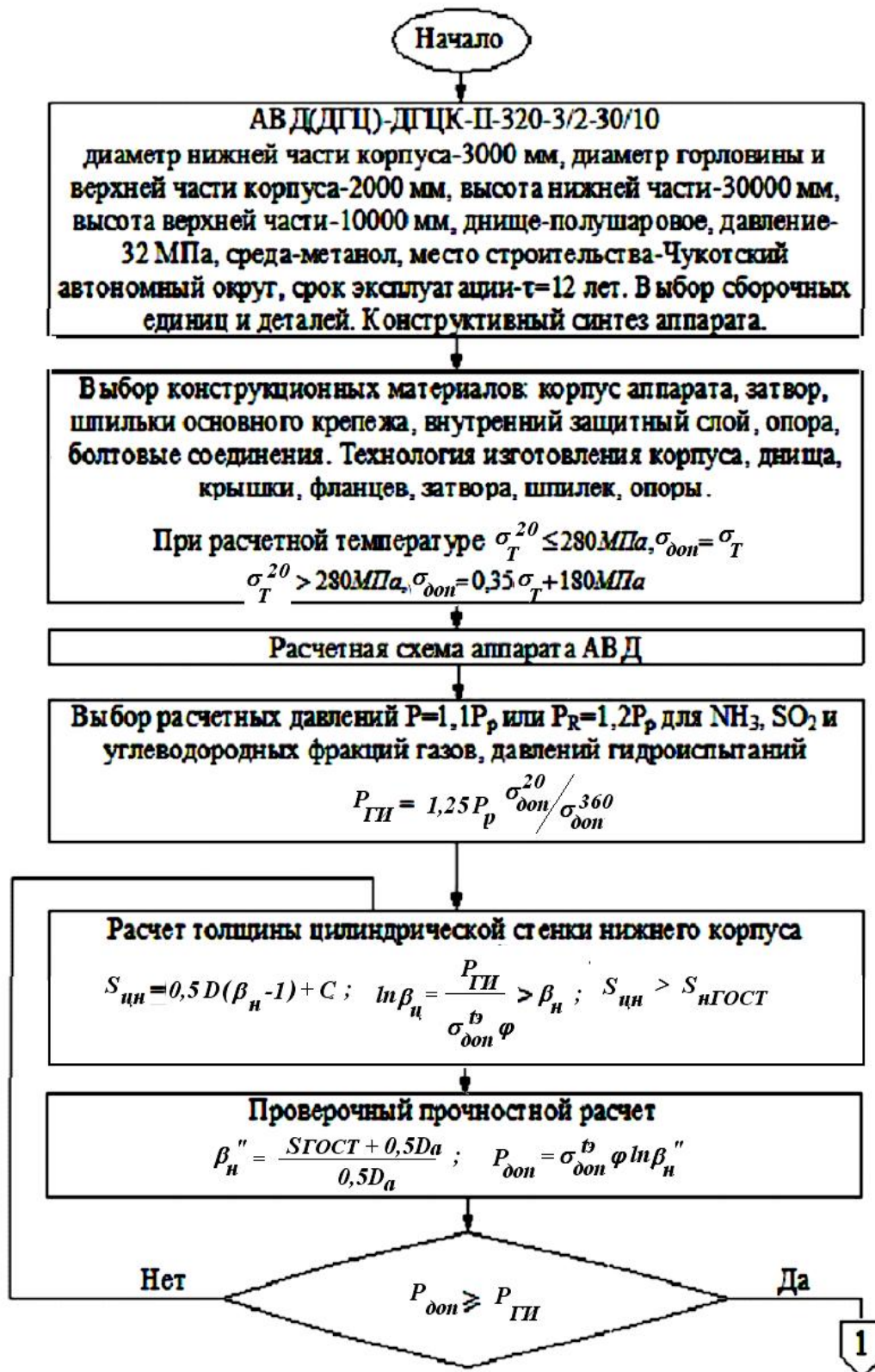
Технические требования

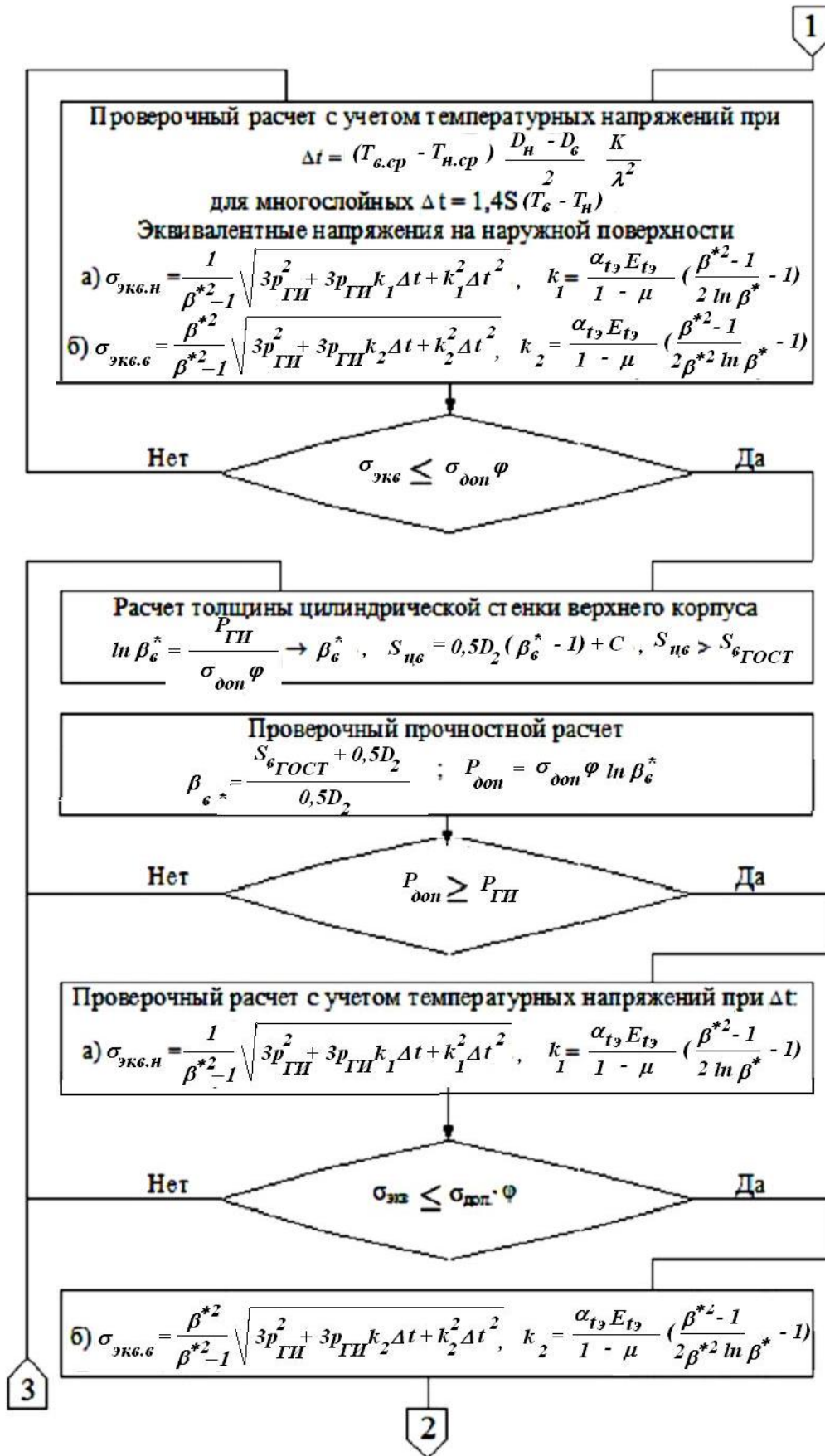
1. При изготовлении колонны руководствоваться ОСТ 26-01-221-80; ОСТ 26-291-79
2. Материал элементов колонны:  
 -обечайка: сталь 22Х3М;  
 -обечайка центральная: сталь 09Г2С;  
 -днище, крышка: сталь 22Х3М;  
 -обтюратор двухконусный: сталь 30ХМА;  
 -шпилька: сталь 34ХН3М;  
 -фланец: сталь 22Х3М;  
 -спиральные слои корпуса: сталь 10Г2С1
3. Сварные соединения должны соответствовать требованиям ОСТ 26-01-82-77 "Сварка в химическом машиностроении".
4. Сварные соединения в объеме 100% контролировать рентгенопросвечиванием
5. \*Размеры для справок.

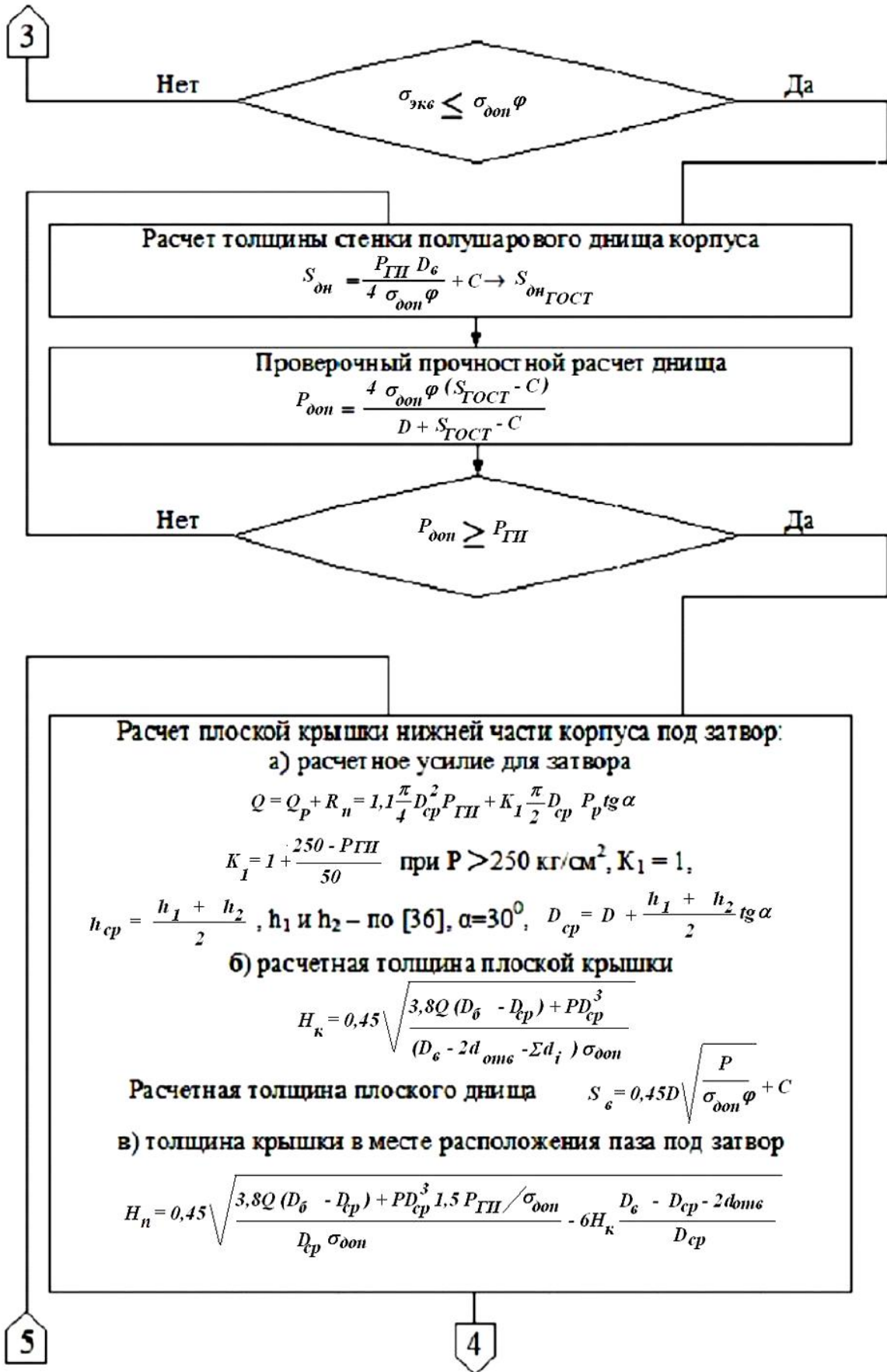
Рис. 4.1. Схема аппарата высокого давления конденсации и сепарации паров аммиака

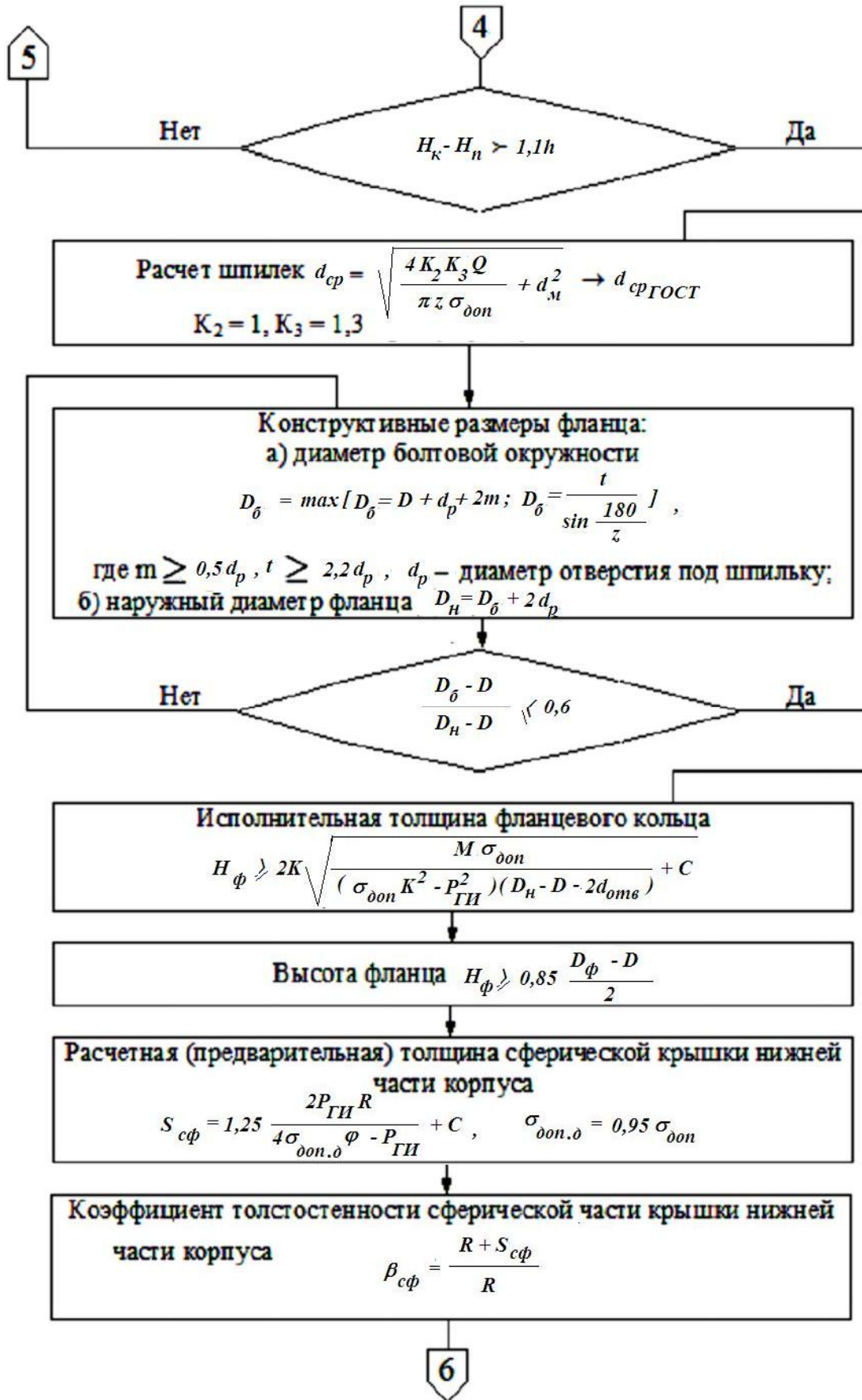
## 2.2. Расчет аппарата высокого давления

Блок-схема алгоритма расчета аппарата высокого давления приведена на рис. 4.2.









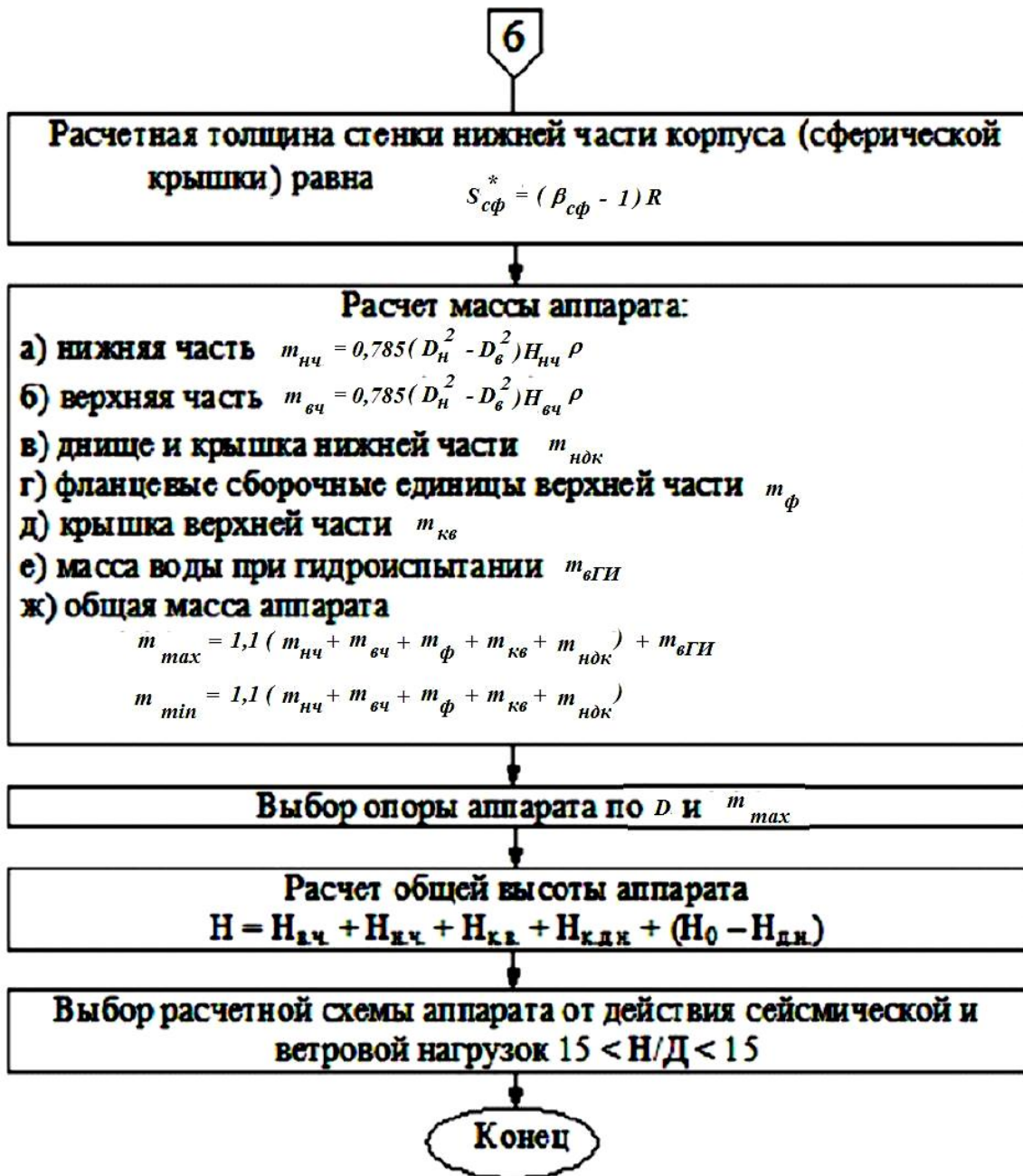


Рис. 4.2. Блок-схема алгоритма расчета аппарата высокого давления

В соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 4.2, составлена программа расчета аппарата высокого давления в системе Mathcad 15. Листинг программы расчета приведен на рис. 4.3.

*Исходные данные*

корпус - цилиндрическая обечайка

диаметр нижней части аппарата  $D_{A.низ} := 2800$  мм

диаметр верхней части аппарата  $D_{A.верх} := 1400$  мм

высота нижней части аппарата  $H_{A.низ} := 25000$  мм

высота верхней части аппарат  $H_{A.верх} := 14000$  мм

днище - сферическое

диаметр днища  $D_d := 2800$  мм

радиус днища  $R_d := \frac{D_d}{2}$

высота днища  $H_d := 1400$  мм

крышка - сферическая

диаметр крышки  $D_{кр} := 1400$  мм

высота крышки  $H_{кр} := 700$  мм

радиус крышки  $R_{кр} := \frac{D_{кр}}{2}$

диаметры штуцеров  $D_{штуц}$

A = 150 мм, Б = 100 мм, В = 100 мм, Г = 150 мм

давление в аппарате  $p_{раб} := 22$  МПа

температура среды в аппарате  $T_A := 360$  °С

температура наружной стенки  $T_{н.ст} := 240$  °С

температура внутренней стенки  $T_{вн.ст} := 280$  °С

среда - аммиак

опора цилиндрическая (ОСТ 26-467-78)

диаметр опоры  $D_{оп} := 2800$  мм

высота опоры  $H_{оп} := 3000$  мм

*Технология изготовления аппарата*

фланцевая часть - кованая

крышка - кованая

днище - кованое

шпильки - точеные

гайки - точеные

шайбы - точеные, подкованные

корпус - рулонированная обечайка

аппарат - цельносварной

Материал конструктивных элементов аппарата  
 корпус внутренний - сталь 30ХМА  
 корпус наружный - сталь 12ХМ  
 опора - сталь Ст5  
 шпильки и болтовые соединения - сталь 15Х5М

Допустимые напряжения для стали 12ХМ при температуре 360 °С

$$\sigma_B \text{ при } 360 \text{ град} := 412 \text{ МПа} \text{ [14, с. 650]}$$

$$\sigma_T \text{ при } 360 \text{ град} := 236 \text{ МПа} \text{ [14, с. 650]}$$

$$n_B \text{ при } 360 \text{ град} := 2.4 \text{ [6, с. 15, табл. 1.7]}$$

$$n_T \text{ при } 360 \text{ град} := 1.5 \text{ [6, с. 15, табл. 1.7]}$$

Нормативное допускаемое напряжение

$$\sigma_{\Theta} \text{ при } 360 \text{ град} := \begin{cases} \frac{\sigma_B \text{ при } 360 \text{ град}}{n_B \text{ при } 360 \text{ град}} & \text{if } \frac{\sigma_B \text{ при } 360 \text{ град}}{n_B \text{ при } 360 \text{ град}} < \frac{\sigma_T \text{ при } 360 \text{ град}}{n_T \text{ при } 360 \text{ град}} \\ \frac{\sigma_T \text{ при } 360 \text{ град}}{n_T \text{ при } 360 \text{ град}} & \text{if } \frac{\sigma_T \text{ при } 360 \text{ град}}{n_T \text{ при } 360 \text{ град}} < \frac{\sigma_B \text{ при } 360 \text{ град}}{n_B \text{ при } 360 \text{ град}} \end{cases}$$

$$\sigma_{\Theta} \text{ при } 360 \text{ град} = 157.333 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение

$$\sigma_{\text{доп}} \text{ при } 360 \text{ град} := \eta \cdot \sigma_{\Theta} \text{ при } 360 \text{ град} :$$

где  $\eta \equiv 1$  - поправочный коэффициент учитывающий условия эксплуатации

$$\sigma_{\text{доп}} \text{ при } 360 \text{ град} = 157.333 \text{ МПа}$$

Допустимые напряжения для стали 12ХМ при температуре 20 °С

$$\sigma_B \text{ при } 20 \text{ град} := 446 \text{ МПа} \text{ [14, с. 650]}$$

$$\sigma_T \text{ при } 20 \text{ град} := 278 \text{ МПа} \text{ [14, с. 650]} ,$$

Коэффициент запаса прочности

$$n_B \text{ при } 20 \text{ град} := 2.4 \text{ [6, с. 15, табл. 1.7]}$$

$$n_T \text{ при } 20 \text{ град} := 1.5 \text{ [6, с. 15, табл. 1.7]}$$

Нормативное допускаемое напряжение

$$\sigma_{\Theta} \text{ при } 20 \text{ град} := \begin{cases} \frac{\sigma_B \text{ при } 20 \text{ град}}{n_B \text{ при } 20 \text{ град}} & \text{if } \frac{\sigma_B \text{ при } 20 \text{ град}}{n_B \text{ при } 20 \text{ град}} < \frac{\sigma_T \text{ при } 20 \text{ град}}{n_T \text{ при } 20 \text{ град}} \\ \frac{\sigma_T \text{ при } 20 \text{ град}}{n_T \text{ при } 20 \text{ град}} & \text{if } \frac{\sigma_T \text{ при } 20 \text{ град}}{n_T \text{ при } 20 \text{ град}} < \frac{\sigma_B \text{ при } 20 \text{ град}}{n_B \text{ при } 20 \text{ град}} \end{cases}$$

$$\sigma_{\Theta} \text{ при } 20 \text{ град} = 185.333 \text{ МПа}$$



Допускаемое напряжение

$$\sigma_{\text{доп.при 20 град}} := \eta \cdot \sigma_{\ominus \text{ при 20 град}}$$

$$\sigma_{\text{доп.при 20 град}} = 185.333 \text{ МПа}$$

Расчетное давление

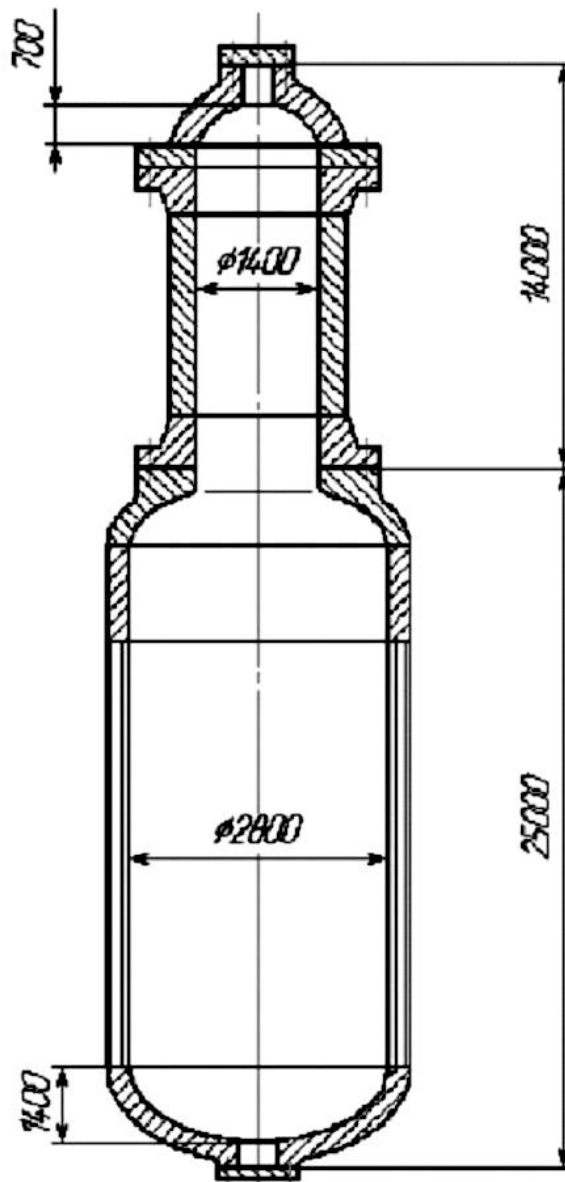
$$P_{\text{расч}} := 1.2 \cdot P_{\text{раб}}$$

$$P_{\text{расч}} = 26.4 \text{ МПа}$$

Давление гидроиспытаний

$$P_{\text{Г.И}} := 1.25 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{\sigma_{\text{доп.при 20 град}}}{\sigma_{\text{доп.при 360 град}}}$$

$$P_{\text{Г.И}} = 38.873 \text{ МПа}$$



Расчетная схема аппарата

Расчет на прочность конструктивных элементов аппарата

Толщина стенки цилиндрической нижней части корпуса

$$\beta_m := e \quad S_{\text{цил.низ.}} = \frac{P \cdot D}{\sigma_{\text{доп. при 360 град}}}$$

$$\beta_m = 1.28$$

$$S_{\text{цил.низ.}} = 0.5 \cdot D_{\text{А.низ.}} \cdot (\beta_m - 1)$$

$$S_{\text{цил.низ.}} = 392.382 \text{ мм}$$

$$S_{\text{цил.низ.ГОСТ}} := \left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow S_{\text{цил.низ.}} \\ \text{ceil}(x) \text{ if } x \leq 6 \\ \text{ceil}(x) \text{ if } 6 < x < 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) = 0 \\ \text{ceil}(x) \text{ if } 6 < x < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) > 0.5 \\ (\text{ceil}(x) + 1) \text{ if } 6 < x < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) \leq 0.5 \\ (\text{ceil}(x)) \text{ if } x = 50 \\ (\text{ceil}(x) + 4) \text{ if } x > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.2 \\ (\text{ceil}(x) + 3) \text{ if } x > 50 \wedge 0.2 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.4 \\ (\text{ceil}(x) + 2) \text{ if } x > 50 \wedge 0.4 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.6 \\ (\text{ceil}(x) + 1) \text{ if } x > 50 \wedge 0.6 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.8 \\ (\text{ceil}(x)) \text{ if } x > 50 \wedge 0.8 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 1 \\ (\text{ceil}(x)) \text{ if } x > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) = 0 \end{array} \right.$$

Стандартное значение толщины стенки цилиндрической обечайки

$$S_{\text{цил.низ.ГОСТ}} = 395 \text{ мм}$$

Проверочный прочностной расчет

$$\beta_{m1} := \frac{S_{\text{цил.низ.ГОСТ}} + 0.5 \cdot D_{\text{А.низ.}}}{0.5 \cdot D_{\text{А.низ.}}}$$

$$\beta_{m1} = 1.282$$

$$\varphi := 1$$

$$R_{доп1} := \sigma_{доп.при.360.град} \cdot \varphi \cdot \ln(\beta_{m1})$$

$$R_{доп1} = 39.102$$

Условие прочности

$$\text{Условие} := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } \sigma_{доп.при.360.град} \cdot \varphi \cdot \ln\left(\frac{S_{ц.низ.ГОСТ} + 0.5 \cdot D_{A.низ}}{0.5 \cdot D_{A.низ}}\right) \geq 1.25 \cdot R_{расч} \cdot \frac{\sigma_{доп.при.20.град}}{\sigma_{доп.при.360.град}} \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Условие = "Выполняется"

$$\text{Принимаем } S_{ц.низ.ГОСТ} := \begin{cases} x \leftarrow S_{ц.низ.ГОСТ} \\ \text{while } \sigma_{доп.при.360.град} \cdot \varphi \cdot \ln\left(\frac{x + 0.5 \cdot D_{A.низ}}{0.5 \cdot D_{A.низ}}\right) < 1.25 \cdot R_{расч} \cdot \frac{\sigma_{доп.при.20.град}}{\sigma_{доп.при.360.град}} \\ \quad \left| \begin{array}{l} x \leftarrow x + 1 \quad \text{if } x < 6 \\ x \leftarrow x + 2 \quad \text{if } 6 \leq x < 50 \\ x \leftarrow x + 5 \quad \text{if } x > 50 \end{array} \right. \end{cases}$$

$$S_{ц.низ.ГОСТ} = 395 \text{ мм}$$

$$\text{Принимаем } S_{ц.низ.ГОСТ..} := 0.395 \text{ м}$$

*Проверочный расчет с учетом температурных напряжений*

$$\Delta t := 1.4 \cdot S_{ц.низ.ГОСТ..} \cdot (T_{вн.ст} - T_{н.ст})$$

$$\Delta t = 22.12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## Эквивалентные напряжения на наружной поверхности

$$\alpha_{T_3} := 12.9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C [14]}$$

Модуль упругости материала цилиндрической обечайки

$$E_{T_3} := 1.914 \cdot 10^5 \text{ МПа [14]}$$

$$\mu := 0.3$$

$$K_2 := \frac{\alpha_{T_3} \cdot E_{T_3}}{1 - \mu} \cdot \left( \frac{\beta_{m1}^2 - 1}{2 \cdot \beta_{m1}^2 \cdot \ln(\beta_{m1})} - 1 \right)$$

Так как  $T_{вн.ст} > T_{н.ст}$ , то

$$K_1 := \frac{\alpha_{T_3} \cdot E_{T_3}}{1 - \mu} \cdot \left( \frac{\beta_{m1}^2 - 1}{2 \cdot \beta_{m1}} - 1 \right)$$

$$K_1 = -2.642$$

$$\sigma_{\text{экр.н}} := \frac{1}{\beta_{m1}^2 - 1} \cdot \sqrt{3 \cdot \text{PГ.И}^2 + 3 \cdot \text{PГ.И} \cdot K_1 \cdot \Delta t + K_1^2 \cdot \Delta t^2}$$

$$\sigma_{\text{экр.н}} = 52.284 \text{ МПа}$$

Условие прочности

$$\text{Условие1} := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{экр.н}} \leq \sigma_{\text{доп.при.360.град}} \cdot \varphi \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Условие1} = \text{"Выполняется"}$$

Толщина цилиндрической стенки верхней части корпуса, мм

$$S_{\text{ц.верх}} := 0.5 \cdot D_{\text{А.верх}} \cdot (\beta_m - 1)$$

$$S_{\text{ц.верх}} = 196.191$$

Стандартное значение толщины стенки цилиндрической обечайки

$$S_{\text{ц.верх.ГОСТ}} := \begin{cases} x \leftarrow S_{\text{ц.верх}} \\ \text{ceil}(x) & \text{if } x \leq 6 \\ \text{ceil}(x) & \text{if } 6 < x < 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) = 0 \\ \text{ceil}(x) & \text{if } 6 < x < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) > 0.5 \\ (\text{ceil}(x) + 1) & \text{if } 6 < x < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) \leq 0.5 \end{cases}$$

$$\begin{array}{l}
 (\text{ceil}(x)) \text{ if } x = 50 \\
 (\text{ceil}(x) + 4) \text{ if } x > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.2 \\
 (\text{ceil}(x) + 3) \text{ if } x > 50 \wedge 0.2 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.4 \\
 (\text{ceil}(x) + 2) \text{ if } x > 50 \wedge 0.4 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.6 \\
 (\text{ceil}(x) + 1) \text{ if } x > 50 \wedge 0.6 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.8 \\
 (\text{ceil}(x)) \text{ if } x > 50 \wedge 0.8 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 1 \\
 (\text{ceil}(x)) \text{ if } x > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) = 0
 \end{array}$$

$$S_{\text{ц.верх.ГОСТ}} = 200 \text{ мм}$$

Проверочный прочностной расчет

$$\beta_{m2} := \frac{S_{\text{ц.верх.ГОСТ}} + 0.5 \cdot D_{\text{А.верх}}}{0.5 \cdot D_{\text{А.верх}}}$$

$$\beta_{m2} = 1.286$$

$$R_{\text{доп2}} := \sigma_{\text{доп.при.360.град}} \cdot \varphi \cdot \ln(\beta_{m2}) \text{ МПа}$$

Условие прочности  $R_{\text{доп2}} \geq R_{\text{Г.И}}$

$$\text{Условие2} := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{доп.при.360.град}} \cdot \varphi \cdot \ln\left(\frac{S_{\text{ц.верх.ГОСТ}} + 0.5 \cdot D_{\text{А.верх}}}{0.5 \cdot D_{\text{А.верх}}}\right) \geq 1.25 \cdot R_{\text{расч}} \cdot \frac{\sigma_{\text{доп.при.20.град}}}{\sigma_{\text{доп.при.360.град}}} \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Условие2 = "Выполняется"

Принимаем  $S_{ц.верх.ГОСТ.} :=$

$x \leftarrow S_{ц.верх.ГОСТ.}$	$\text{while } \sigma_{\text{доп.при.360.град.}} \cdot \varphi \cdot \ln\left(\frac{x + 0.5 \cdot D_{A.верх}}{0.5 \cdot D_{A.верх}}\right) < 1.25 \cdot R_{расч.} \cdot \frac{\sigma_{\text{доп.при.20.град.}}}{\sigma_{\text{доп.при.360.град.}}}$
$x \leftarrow x + 1 \quad \text{if } x < 6$	
$x \leftarrow x + 2 \quad \text{if } 6 \leq x < 50$	
$x \leftarrow x + 5 \quad \text{if } x > 50$	

$S_{ц.верх.ГОСТ.} = 200 \text{ мм}$

Принимаем  $S_{ц.верх.ГОСТ..} := 0.2 \text{ м}$

*Проверочный расчет с учетом температурных напряжений*

$\Delta t_{\text{верх}} := 1.4 \cdot S_{ц.верх.ГОСТ..} \cdot (T_{\text{вн.ст}} - T_{\text{н.ст}})$

$\Delta t_{\text{верх}} = 11.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Принимаем  $\Delta t = 22.12 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Эквивалентные напряжения на наружной поверхности

$$K_2 := \frac{\alpha_{T_3} \cdot E_{T_3}}{1 - \mu} \cdot \left( \frac{\beta_{m2}^2 - 1}{2 \cdot \beta_{m2}^2 \cdot \ln(\beta_{m2})} - 1 \right) = -0.755$$

Так как  $T_{\text{вн.ст}} > T_{\text{н.ст}}$ , то

$$K_1 := \frac{\alpha_{T_3} \cdot E_{T_3}}{1 - \mu} \cdot \left( \frac{\beta_{m2}^2 - 1}{2 \cdot \beta_{m2}} - 1 \right)$$

$$K_1 = -2.631$$

$$\sigma_{\text{экв.н.}} := \frac{1}{\beta_{m2}^2 - 1} \cdot \sqrt{3 \cdot \text{РГ.И}^2 + 3 \cdot \text{РГ.И} \cdot K_1 \cdot \Delta t + K_1^2 \cdot \Delta t^2}$$

$$\sigma_{\text{экв.н.}} = 51.55 \text{ МПа}$$

Условие прочности  $\sigma_{\text{экв.н.}} \leq \sigma_{\text{Доп.приТэ}} \cdot \varphi$

$$\text{Условие3} := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{экв.н.}} \leq \sigma_{\text{доп.при.360.град}} \cdot \varphi \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Условие3 = "Выполняется"

*Толщина стенки сферического днища*

$$S_d := \frac{P_{\text{расч}} \cdot D_{\text{А.низ}}}{4 \cdot \sigma_{\text{доп.при.360.град}}} \cdot Y,$$

где Y - коэффициент формы днища, определяемый путем.

Условия

$$\frac{H_d}{D_{\text{А.низ}}} = 0.5 \quad (0.5 > 0.2) \text{ и } \frac{R_d}{D_{\text{А.низ}}} = 0.5 \quad (0.5 < 1),$$

тогда  $Y \equiv 1.4$  [15, с. 34]

$$S_d = 164.441 \text{ мм}$$

$$S_{\text{д.ГОСТ}} := \begin{cases} x \leftarrow S_d \\ \text{ceil}(x) & \text{if } x \leq 6 \\ \text{ceil}(x) & \text{if } 6 < x < 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) = 0 \\ \text{ceil}(x) & \text{if } 6 < x < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) > 0.5 \\ (\text{ceil}(x) + 1) & \text{if } 6 < x < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) \leq 0.5 \\ (\text{ceil}(x)) & \text{if } x = 50 \\ (\text{ceil}(x) + 4) & \text{if } x > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.2 \\ (\text{ceil}(x) + 3) & \text{if } x > 50 \wedge 0.2 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.4 \\ (\text{ceil}(x) + 2) & \text{if } x > 50 \wedge 0.4 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.6 \end{cases}$$

$$\left| \begin{array}{l} (\text{ceil}(x) + 1) \text{ if } x > 50 \wedge 0.6 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.8 \\ (\text{ceil}(x)) \text{ if } x > 50 \wedge 0.8 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 1 \\ (\text{ceil}(x)) \text{ if } x > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) = 0 \end{array} \right.$$

$$S_{\text{д.ГОСТ}} = 165 \text{ мм}$$

Рабочее допускаемое давление

$$P_{\text{доп}} := \frac{4 \cdot \sigma_{\text{доп.при.360.град}} \cdot \varphi \cdot S_{\text{д.ГОСТ}}}{D_{\text{А.низ}} \cdot Y}$$

$$P_{\text{доп}} = 26.49 \text{ МПа}$$

Условие прочности  $P_{\text{доп}} \geq P_{\text{Г.И}}$

$$\text{Условие4} := \left| \begin{array}{l} \text{"выполняется"} \text{ if } P_{\text{доп}} \geq 1.25 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{\sigma_{\text{доп.при.20.град}}}{\sigma_{\text{доп.при.360.град}}} \\ \text{"Не выполняется"} \text{ otherwise} \end{array} \right.$$

Условие4 = "Не выполняется"

Увеличиваем толщину стенки днища. Принимаем

$$S_{\text{д.ГОСТ.}} := 245 \text{ мм}$$

Рабочее допускаемое давление

$$P_{\text{доп.}} := \frac{4 \cdot \sigma_{\text{доп.при.360.град}} \cdot \varphi \cdot S_{\text{д.ГОСТ.}}}{D_{\text{А.низ}} \cdot Y}$$

$$P_{\text{доп.}} = 39.333 \text{ МПа}$$

Условие прочности  $P_{\text{доп}} \geq P_{\text{Г.И}}$

$$\text{Условие5} := \left| \begin{array}{l} \text{"Выполняется"} \text{ if } P_{\text{доп.}} \geq 1.25 \cdot P_{\text{расч}} \cdot \frac{\sigma_{\text{доп.при.20.град}}}{\sigma_{\text{доп.при.360.град}}} \end{array} \right.$$

Условие5 = "Выполняется"

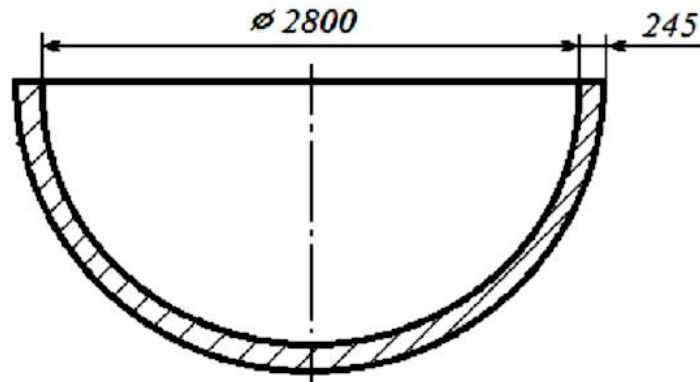
*Толщина стенки сферического днища*

$$S_{\text{кр}} := \frac{P_{\text{расч}} \cdot D_{\text{А.верх}}}{4 \cdot \sigma_{\text{доп.при.360.град}}} \cdot Y$$

Условия

$$\frac{H_{\text{кр}}}{D_{\text{А.верх}}} = 0.5 \quad (0.5 > 0.2)$$





Сферическое днище

$$\frac{R_{кр}}{D_{А.верх}} = 0.5 \quad (0.5 < 1)$$

Принимаем  $Y \equiv 1.4$  [15, с. 34]

$$S_{кр} = 82.22 \text{ мм}$$

$$S_{кр.ГОСТ} := \begin{cases} x \leftarrow S_{кр} \end{cases}$$

$$\text{ceil}(x) \text{ if } x \leq 6$$

$$\text{ceil}(x) \text{ if } 6 < x < 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) = 0$$

$$\text{ceil}(x) \text{ if } 6 < x < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) > 0.5$$

$$(\text{ceil}(x) + 1) \text{ if } 6 < x < 50 \wedge 0 \neq \left( \frac{\text{mod}(x,2)}{2} \right) \leq 0.5$$

$$(\text{ceil}(x)) \text{ if } x = 50$$

$$(\text{ceil}(x) + 4) \text{ if } x > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.2$$

$$(\text{ceil}(x) + 3) \text{ if } x > 50 \wedge 0.2 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.4$$

$$(\text{ceil}(x) + 2) \text{ if } x > 50 \wedge 0.4 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.6$$

$$(\text{ceil}(x) + 1) \text{ if } x > 50 \wedge 0.6 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 0.8$$

$$(\text{ceil}(x)) \text{ if } x > 50 \wedge 0.8 < \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) \leq 1$$

$$S_{кр.ГОСТ} = \begin{cases} \lceil x \rceil & \text{if } x > 50 \wedge \left( \frac{\text{mod}(x,5)}{5} \right) = 0 \\ 85 \text{ мм} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Рабочее допускаемое давление

$$P_{доп.} := \frac{4 \cdot \sigma_{доп.при.360.град} \cdot \varphi \cdot S_{кр.ГОСТ}}{D_{А.верх} \cdot Y}$$

$$P_{доп.} = 27.293 \text{ МПа}$$

Условие прочности  $P_{доп} \geq P_{Г.И}$

$$\text{Условие6} := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } P_{доп.} \geq 1.25 \cdot P_{расч.} \cdot \frac{\sigma_{доп.при.20.град}}{\sigma_{доп.при.360.град}} \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Условие6 = "Не выполняется"

Увеличиваем значения толщины стенки днища. Принимаем

$$S_{кр.ГОСТ.} := 125 \text{ мм.}$$

Рабочее допускаемое давление

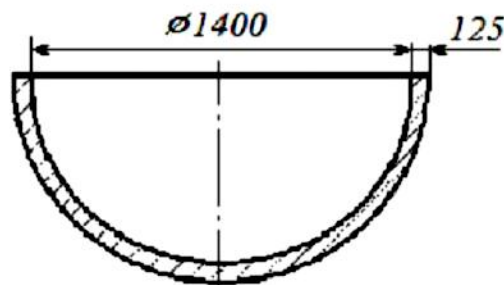
$$P_{доп..} := \frac{4 \cdot \sigma_{доп.при.360.град} \cdot \varphi \cdot S_{кр.ГОСТ.}}{D_{А.верх} \cdot Y}$$

$$P_{доп..} = 40.136 \text{ МПа}$$

Условие прочности  $P_{доп} \geq P_{Г.И}$

$$\text{Условие7} := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } P_{доп..} \geq 1.25 \cdot P_{расч.} \cdot \frac{\sigma_{доп.при.20.град}}{\sigma_{доп.при.360.град}} \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Условие7 = "Выполняется"



Сферическая крышка

Затвор с дельтообразным obtюратором

Принимаем

$$D_0 := 1.439 \text{ м - внутренний диаметр obtюратора [16, табл. 2.4]}$$

$h_0 := 0.036$  м - высота дельтообразного obtюратора [16, табл. 2.4]

$\alpha_k := 47^\circ$  - угол конусности уплотнительной поверхности крышки  
и корпуса затвора с дельтообразным obtюратором

$$F_0 := 0.5 \cdot \pi \cdot D_0 \cdot h_0 \cdot p_{расч} \cdot \tan\left(\frac{\alpha_k \cdot \pi}{180}\right)$$

$$F_0 = 2.304 \text{ МПа}$$

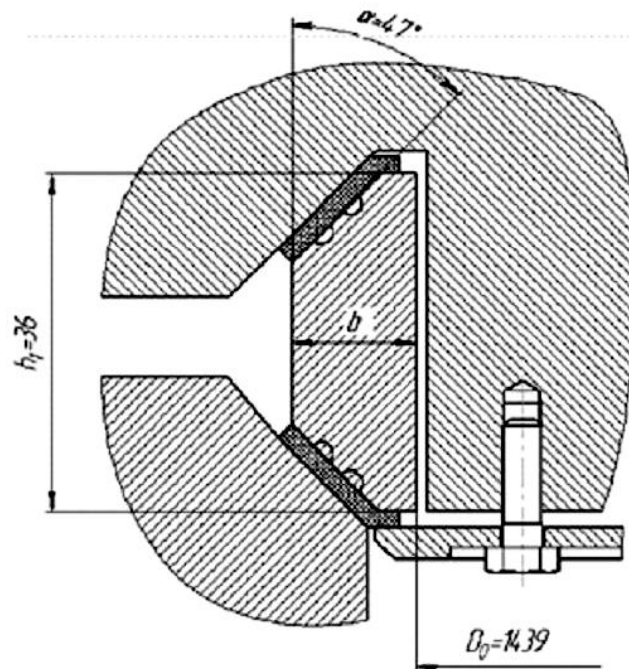
Равнодействующая внутреннего давления на крышку

$$F_p := \frac{\pi \cdot D_0 \cdot p_{расч}}{4}$$

$$F_p = 29.837 \text{ МПа}$$

Расчетное усилие герметизации для затвора с дельтообразным obtюратором

$$F_{0,расчет} := F_0 + F_p = 32.141 \text{ МПа}$$



Затвор с дельтообразным obtюратором

#### Расчет шпилек и болтов

Шпильки изготовлены из стали 15X5M. Для  $T_A = 360^\circ\text{C}$  принимаем

$$\sigma_{В.ш.при.360.град} := 659 \text{ МПа [14, с. 653]}$$

$$\sigma_{Т.ш.при.360.град} := 541 \text{ МПа [14, с. 653]}$$

$$n_{В.ш.при.360.град} := 2.4 [6, с. 15, табл. 1.7]$$

$$n_{Т.ш.при.360.град} := 1.5 [6, с. 15, табл. 1.7]$$

Нормативное допускаемое напряжение

$$\sigma_{\Theta.ш.при.360.град} := \begin{cases} \frac{\sigma_{В.ш.при.360.град}}{n_{В.ш.при.360.град}} & \text{if } \frac{\sigma_{В.ш.при.360.град}}{n_{В.ш.при.360.град}} < \frac{\sigma_{Т.ш.при.360.град}}{n_{Т.ш.при.360.град}} \\ \frac{\sigma_{Т.ш.при.360.град}}{n_{Т.ш.при.360.град}} & \text{if } \frac{\sigma_{Т.ш.при.360.град}}{n_{Т.ш.при.360.град}} < \frac{\sigma_{В.ш.при.360.град}}{n_{В.ш.при.360.град}} \end{cases}$$

$$\sigma_{\Theta.ш.при.360.град} = 271.583 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение

$$\sigma_{ш.при.360.град} := \eta \cdot \sigma_{\Theta.ш.при.360.град}$$

где  $\eta \equiv 1$  - поправочный коэффициент, учитывающий условия эксплуатации.

$$\sigma_{ш.при.360.град} = 274.583 \text{ МПа}$$

Принимаем

$k_4 := 1$  - коэффициент, учитывающий тангенциальные напряжения, возникающие в шпильке при ее затяжке

$k_5 := 1.3$  - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки между шпильками

$n_{ш} := 24$  - количество шпилек

$d_M := 0.012 \text{ м}$  - диаметр центрального отверстия с резьбой до М85

Диаметр стержня шпильки

$$d_{с.р} := \sqrt{\frac{4 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot F_{0.расчет}}{\pi \cdot n_{ш} \cdot \sigma_{ш.при.360.град}} + d_M^2}$$

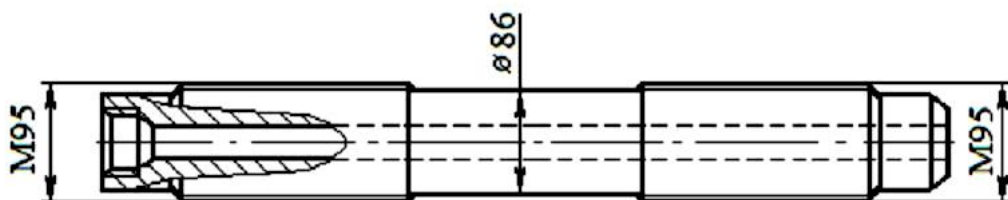
$$d_{с.р} = 0.091 \text{ м}$$

Принимаем стандартное значение резьбы М95

$d_c := 0.0865 \text{ м}$  - диаметр стержня шпильки [16, с. 148, табл. 2.5]

$d_p := 0.095 \text{ м}$  - диаметр резьбы [16, с. 148, табл. 2.5]

$D := 1.4 \text{ м}$  - диаметр  $D = D_{А.верх}$



Шпилька

Диаметр болтовой окружности

$$D_6 := \max \left( \frac{2.42 \cdot d_c}{\sin \left( \frac{\pi}{n_{\text{ш}}} \right)}, D + 2.42 \cdot d_c \right)$$

$$D_6 = 1.609 \text{ м}$$

Длины резьбы гнезда корпуса аппарата

$$\frac{\sigma_{\text{доп. при 360 град}}}{275} = 0.572 < 2$$

Принимаем длину резьбы гнезда корпуса аппарата [16, с. 148, табл. 2.5]

$$L_1 := 0.155 \text{ м}$$

Расчет фланцев

Наружный диаметр фланца:

$$D_{\text{ф}} := D_6 + 2 \cdot d_p = 1.799 \text{ м}$$

$$\text{Принимаем } D_{\text{ф}} := 1.8 \text{ м}$$

Принимаем глубину гнезда под шпильку [16, с. 148, табл. 2.5]

$$L_2 := 0.170 \text{ м}$$

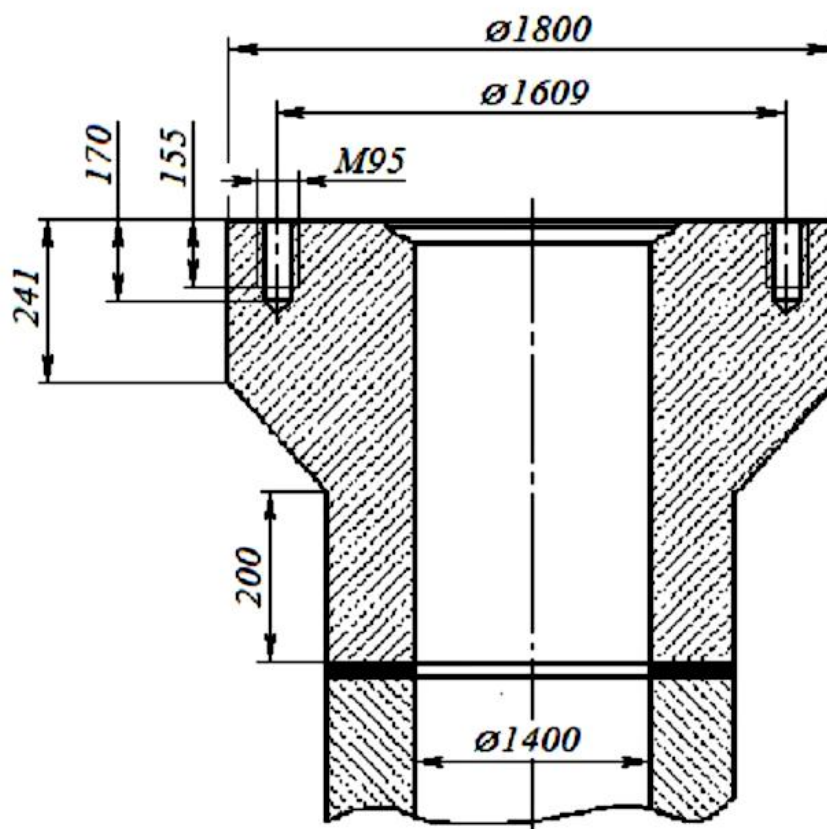


Рис. Фланец

Высоты цилиндрических частей фланца  $h_3$  и  $h_4$

Принимаем  $\gamma := 45^\circ$

$$h_3 := S_{\text{ц.верх.ГОСТ..}} = 0.2 \text{ м}$$

$$h_4 := L_2 + 0.75 \cdot d_p = 0.241 \text{ м}$$

Максимальное напряжение в материале фланца

$$h_\phi := h_4 + \frac{\left[ (D_\phi - D)^2 - 4 \cdot S_{\text{ц.верх.ГОСТ..}}^2 \right]}{4 \cdot (D_\phi - D) \cdot \tan\left(\frac{\gamma \cdot \pi}{180}\right)}$$

$$h_\phi = 0.241 \text{ м}$$

$$\sigma_{\text{max}} := \text{РГ.И.} \cdot \frac{D_\phi^2 + D^2}{D_\phi^2 - D^2} + \frac{F_p \cdot (D_6 - D - S_{\text{ц.верх.ГОСТ..}}) + F_0 \cdot (D_6 - D_0)}{h_\phi^2 \cdot D \cdot \ln\left(\frac{D_\phi}{D}\right)}$$

$$\sigma_{\text{max}} = 190.726 \text{ МПа}$$

Условие прочности фланца

$$\text{Условие8} := \begin{cases} \text{"Выполняется"} & \text{if } \sigma_{\text{max}} \leq \frac{\sigma_{\text{T.при 360 град}}}{1.1} \\ \text{"Не выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Условие8} = \text{"Выполняется"}$$

*Расчет массы аппарата*

Масса корпуса аппарата

$$D_{\text{н}} := 3.195 \text{ м - наружный диаметр корпуса}$$

$$D_{\text{вн}} := 2.8 \text{ м - внутренний диаметр корпуса}$$

$$H_1 := 25 \text{ м - высота цилиндрической части корпуса}$$

$$\rho := 7800 \text{ кг/м}^3 \text{ - плотность стали}$$

$$m_{\text{к}} := 0.785 \cdot (D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2) \cdot H_1 \cdot \rho = 3.625 \cdot 10^5 \text{ кг}$$

Масса корпуса горловины

$$D_{\text{нг}} := 1.6 \text{ м - наружный диаметр корпуса}$$

$$D_{\text{внг}} := 1.4 \text{ м - внутренний диаметр корпуса}$$

$$H_2 := 14 \text{ м - высота цилиндрической части корпуса}$$

$$m_{\text{г}} := 0.785 \cdot (D_{\text{нг}}^2 - D_{\text{внг}}^2) \cdot H_2 \cdot \rho = 5.143 \cdot 10^4 \text{ кг}$$

Масса днища

$$D_{\text{д.н}} := 3.045 \text{ м}$$

$$D_{\text{кр.вн}} := 1.4 \text{ м}$$

$$V_{\text{кр.}} := \frac{\pi}{6} \cdot D_{\text{кр.н}}^3 - \frac{\pi}{6} \cdot D_{\text{кр.вн}}^3 = 0.42 \text{ м}^3$$

$$m_{\text{кр.}} := V_{\text{кр.}} \cdot \rho = 3.278 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

Принимаем массу вспомогательных устройств (штуцеров, фланцев и т.д.) 10% от основной массы аппарата.

Общая масса аппарата

$$m_{\text{А}} := (m_{\text{к}} + m_{\text{Г}} + m_{\text{д}} + m_{\text{кр.}}) \cdot 1.1 = 4.871 \cdot 10^5 \text{ кг}$$

Масса воды в аппарате при гидроиспытании

$$V_{\text{д1}} := \frac{\pi}{6} \cdot D_{\text{д.вн}}^3 = 11.494 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{к1}} := 1.436 \text{ м}^3$$

$$D_{\text{внГ}} := 1.4 \text{ м}$$

$$H_2 := 14 \text{ м}$$

$$m_{\text{в1}} := (0.785 \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot H_1 + 0.785 \cdot D_{\text{внГ}}^2 \cdot H_2 + V_{\text{д1}} + V_{\text{к1}}) \cdot 1000 = 1.883 \cdot 10^5 \text{ кг}$$

Максимальная масса аппарата

$$m_{\text{А.мах}} := m_{\text{А}} + m_{\text{в1}} = 6.755 \cdot 10^5 \text{ кг}$$

Максимальный вес аппарата

$$G_{\text{А.мах.}} := \frac{9.81 \cdot m_{\text{А.мах}}}{10^6} = 6.626 \text{ МН}$$

*Расчет аппарата на сейсмическую нагрузку*

Отношение  $H/D=39/2.8=14 < 15$ . Расчетная схема принимается в виде упругозащемленного стержня. Условно разбиваем высоту аппарата на 4 участка по 9.75 метров. Вес участка принимаем сосредоточенным в середине участка. Ветровая нагрузка, равномерно распределенная по высоте аппарата, заменяется сосредоточенными силами, приложенными в середине участка. При  $H/D < 15$  имеем

$$H := 39 \text{ м}$$

$$K_c := 0.05 \text{ - сейсмический коэффициент при 8 баллах [15, табл. 3.2]}$$

$$\beta := 0.55 \text{ - коэффициент динамичности}$$

$$G := \frac{G_{\text{А.мах.}}}{4} = 1.657 \text{ МН - вес } i\text{-го участка аппарата}$$

$$D_{\text{ср}} := 3.195 \text{ м - средний диаметр корпуса}$$

$D_{\text{ср}} := 3.195 \text{ м}$  - средний диаметр корпуса

$J_{\text{н}} := \pi \cdot D_{\text{ср}}^3 \cdot \frac{S_{\text{ц.низ.ГОСТ.}}}{8} = 5.059 \text{ м}^4$  - момент инерции верхнего сечения

корпуса аппарата относительно центральной оси

$C_{\text{ф}} := 50 \text{ МН/м}^3$  - коэффициент неравномерности сжатия грунта

$L_{\text{кол}} := 0.3 \text{ м}$  - ширина кольца

$J_{\text{кол}} := \pi \cdot \frac{2.8^3 \cdot L_{\text{кол}}}{8} = 2.586 \text{ м}^4$  - момент инерции фундаментного кольца

$J_{\text{ф}} := 1.3 \cdot J_{\text{кол}} = 3.362 \text{ м}^4$  - момент инерции подошвы фундамента  
относительно центральной оси

Обозначим

$x_j$  - расстояние от середины  $j$ -го участка до основания аппарата

$\alpha_j$  - относительные координаты центров тяжести

$A_j$  - коэффициент

$x_1 := 4.875 \text{ м}$

$x_2 := 14.625 \text{ м}$

$x_3 := 24.375 \text{ м}$

$x_4 := 34.125 \text{ м}$

$\alpha_1 := \frac{x_1}{H} = 0.125$                        $A_1 := 0.05$

$\alpha_2 := \frac{x_2}{H} = 0.375$                        $A_2 := 0.185$

$\alpha_3 := \frac{x_3}{H} = 0.625$                        $A_3 := 0.4$

$\alpha_4 := \frac{x_4}{H} = 0.875$                        $A_4 := 0.85$

$\varphi_0 := \frac{1}{C_{\text{ф}} \cdot J_{\text{ф}}} = 5.949 \cdot 10^{-3} \text{ 1/МН м}$  - угол поворота опорного сечения

$E_0 := 1.97 \cdot 10^5$  - модуль упругости

$K_{1..} := \frac{H}{3 \cdot E_0 \cdot J_{\text{н}}} \cdot A_1 + \varphi_0 \cdot \alpha_1 = 7.443 \cdot 10^{-4} \text{ 1/МН м}$



$$K_{2..} := \frac{H}{3 \cdot E_0 \cdot J_H} \cdot A_2 + \varphi_0 \cdot \alpha_2 = 2.233 \times 10^{-3} \text{ 1/МН м}$$

$$K_{3..} := \frac{H}{3 \cdot E_0 \cdot J_H} \cdot A_3 + \varphi_0 \cdot \alpha_3 = 3.723 \cdot 10^{-3} \text{ 1/МН м}$$

$$K_{4..} := \frac{H}{3 \cdot E_0 \cdot J_H} \cdot 0.85 + \varphi_0 \cdot \alpha_4 = 5.216 \cdot 10^{-3} \text{ 1/МН м}$$

Сейсмическая сила в середине каждого участка

$$K_{\text{произведение1}} := G \cdot (K_{1..} + K_{2..} + K_{3..} + K_{4..}) = 0.02$$

$$K_{\text{произведение2}} := G \cdot (K_{1..}^2 + K_{2..}^2 + K_{3..}^2 + K_{4..}^2) = 7.722 \cdot 10^{-5}$$

$$P_1 := K_c \cdot \beta \cdot G \cdot K_{1..} \cdot K_{\text{произведение1}} \div K_{\text{произведение2}} = 8.668 \cdot 10^{-3} \text{ МН}$$

$$P_2 := K_c \cdot \beta \cdot G \cdot K_{2..} \cdot K_{\text{произведение1}} \div K_{\text{произведение2}} = 0.026 \text{ МН}$$

$$P_3 := K_c \cdot \beta \cdot G \cdot K_{3..} \cdot K_{\text{произведение1}} \div K_{\text{произведение2}} = 0.043 \text{ МН}$$

$$P_4 := K_c \cdot \beta \cdot G \cdot K_{4..} \cdot K_{\text{произведение1}} \div K_{\text{произведение2}} = 0.061 \text{ МН}$$

Расчетный изгибающий момент в нижнем сечении опоры аппарата от сейсмической нагрузки

$$M_c := P_1 \cdot x_1 + P_2 \cdot x_2 + P_3 \cdot x_3 + P_4 \cdot x_4 = 3.553 \text{ МН}$$

*Расчет опоры аппарата*

Принимаем толщину цилиндрической стенки опоры  $S_{\text{оп}} := 0.024 \text{ м}$

Материал опоры сталь Ст3 ГОСТ 380-88

$$\sigma_{\text{воп}} := 380 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{Топ}} := 220 \text{ МПа}$$

$$E_{\text{оп}} := 2.10 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Нормативное допускаемое напряжение

$$\sigma_{\Theta_{\text{оп}}} := \begin{cases} \frac{\sigma_{\text{воп}}}{n_{\text{В.при 20 град}}} & \text{if } \frac{\sigma_{\text{воп}}}{n_{\text{В.при 20 град}}} < \frac{\sigma_{\text{Топ}}}{n_{\text{Т.при 20 град}}} \\ \frac{\sigma_{\text{Топ}}}{n_{\text{Т.при 20 град}}} & \text{if } \frac{\sigma_{\text{Топ}}}{n_{\text{Т.при 20 град}}} < \frac{\sigma_{\text{воп}}}{n_{\text{В.при 20 град}}} \end{cases}$$

$$\sigma_{\Theta_{\text{оп}}} = 146.667 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение

$$\sigma_{\text{оп}} := \eta \cdot \sigma_{\Theta_{\text{оп}}}$$

$$\sigma_{\text{оп}} = 146.667 \text{ МПа}$$

Принимаем диаметр опоры  $D_{\text{оп}} := 2.8 \text{ м}$

Размеры опонного кольца

$D_2 := 2.650$  м - внутренний диаметр кольца

$D_1 := 3.140$  м - наружный диаметр кольца

Опорная площадь кольца

$$F := 0.785 \cdot (D_1^2 - D_2^2) = 2.227 \text{ м}^2$$

Момент сопротивления опорной площадки кольца:

$$W := \frac{\pi \cdot (D_1^4 - D_2^4)}{32 \cdot D_1} = 1.498 \text{ м}^3$$

Напряжения сжатия в стенке опоры с учетом отверстия для лаза  $d := 0.5$  м

$$G_{\max} := M_c + G_{A.\max} = 10.179 \text{ МН}$$

$$\sigma_c := \frac{G_{\max}}{[\pi \cdot (D_{\text{оп.}} + S_{\text{оп.}}) - d] \cdot (S_{\text{оп.}} - 0.001)} = 52.864 \text{ МН/м}^2$$

Напряжение на изгиб в стенке опоры

$$\sigma_{\text{и}} := \frac{M_c}{[\pi \cdot (D_{\text{оп.}} + S_{\text{оп.}}) - d] \cdot (S_{\text{оп.}} - 0.001)} = 18.451 \text{ МН/м}^2$$

$$\text{Отношение } \frac{D_{\text{оп.}}}{2 \cdot (S_{\text{оп.}} - 0.001)} = 60.87$$

Допускаемые напряжения на сжатие и изгиб в обечайке опоры

$$\sigma_{\text{сд}} := \frac{0.073 \cdot E_{\text{оп.}} \cdot (S_{\text{оп.}} - 0.001)}{D_{\text{оп.}}} = 125.925 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{ид}} := \frac{0.055 \cdot E_{\text{оп.}} \cdot (S_{\text{оп.}} - 0.001)}{D_{\text{оп.}}} = 94.875 \text{ МПа}$$

Устойчивость цилиндрической опоры

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{\text{сд}}} + \frac{\sigma_{\text{и}}}{\sigma_{\text{ид}}} = 0.614 \text{ - устойчивость обеспечена}$$

Максимальное напряжение на сжатие в сварном шве, соединяющем цилиндрическую опору с корпусом аппарата, при коэффициенте сварного шва  $\varphi_{\text{ш}} := 0.7$

$$\sigma_{\text{max.}} := \frac{G_{\max}}{\varphi_{\text{ш}} \cdot F} + \frac{M_c}{\varphi_{\text{ш}} \cdot W} = 9.919 \text{ МПа} < \sigma_{\text{сд}}$$

Максимальное напряжение сжатия на опорной поверхности кольца

$$\sigma_{\text{max.}} := \frac{G_{\max}}{\varphi_{\text{ш}} \cdot F} + \frac{M_c}{\varphi_{\text{ш}} \cdot W} = 9.919 \text{ МПа} < \sigma_{\text{сд}}$$

Максимальное напряжение сжатия на опорной поверхности кольца

$$\sigma_{\max..} := \frac{G_{\max}}{F} + \frac{M_c}{W} = 6.943 < 10 \text{ МПа}$$

Номинальная расчетная толщина опорного кольца при  $l := 0.1 \text{ м}$

$$S_{\text{кол}} := 1.73 \cdot l \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{\max..}}{\sigma_{\text{ид}}}} = 0.047 \text{ м}$$

Учтем прибавку на коррозию. Принимаем  $S_{\text{кол}} := 0.06 \text{ м}$

Наименьшее напряжение на опорной поверхности кольца

$$\sigma := \frac{G_{\max}}{F} - \frac{M_c}{W} = 2.198 \text{ МПа}$$

Общая условная расчетная нагрузка на фундаментные болты

$$P_{\text{б}} := 0.785 \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot \sigma = 4.895 \text{ МН}$$

Принимаем количество фундаментных болтов  $z := 12$ ,  
тогда нагрузка на один болт составит

$$P_{\text{б1}} := \frac{P_{\text{б}}}{z} = 0.408 \text{ МН}$$

Расчетный внутренний диаметр резьбы фундаментных болтов

$$d_1 := \sqrt{\frac{4 \cdot P_{\text{б1}}}{\pi \cdot \sigma_{\text{оп}}}} + 0.001 = 0.061 \text{ м}$$

Принимаем болты М64

Диаметр болтовой окружности:  $D_{\text{б}} := D_{\text{оп}} + 0.12 = 2.92 \text{ м}$

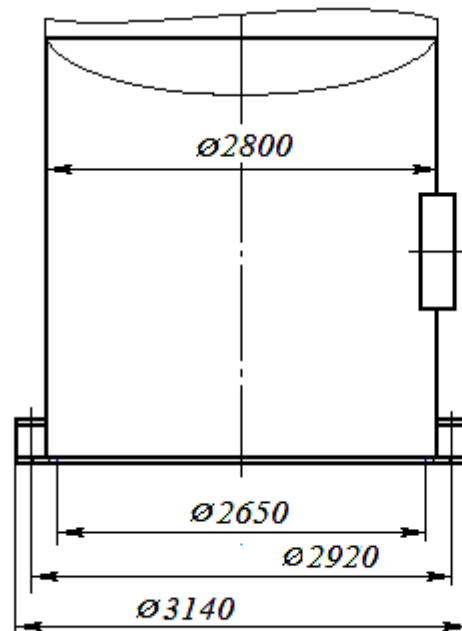


Рис. Опора

*Расчет аппарата на малоцикловую усталость*

Принимаем число циклов нагружения

1. Эксплуатационные  $N_{\text{экс}} := 150$
2. В цикле – технологических остановок  $N_{\text{то}} := 40$
3. В цикле – КИПиА  $N_{\text{кип}} := 50$
4. В цикле – аварий  $N_{\text{ас}} := 22$
5. Число гидравлических испытаний  $N_{\text{г.и.}} := 12$

Реальное число нагружений

$$N := N_{\text{экс}} \cdot (N_{\text{кип}} + N_{\text{то}} + N_{\text{ас}}) + N_{\text{г.и.}} = 1.681 \cdot 10^4$$

Принимаем.

Коэффициенты запаса прочности по числу циклов и по напряжениям

$$n_N := 10$$

$$n_{\sigma} := 2$$

Прочностные характеристики конструкционного материала, определяемые по ГОСТ 25859-89 [15, с. 67, табл. 4.1]

$$A := 0.6 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

$$B := 270 \text{ МПа}$$

Допускаемую амплитуду напряжений

$$\sigma_{\text{ам.доп}} := \left( \frac{2300 - T_A}{2300} \right) \cdot \frac{A}{\sqrt{n_N \cdot N}} + \frac{B}{n_{\sigma}} = 258.429 \text{ МПа}$$

 $\zeta := 1$  - коэффициент, учитывающий тип сварных соединений [1]

Модули продольной упругости сопрягаемых элементов при расчетной температуре, температуре внутренней и наружной стенок [14, с. 598]

$$E_{T_2} := 1.914 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

$$E_1 := 196.2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

$$E_2 := 198.6 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Температурные коэффициенты линейного расширения [14, с. 586]

$$\alpha_{T_2} := 12.9 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_1 := 12.7 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_2 := 12.6 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$$

$\Delta T_T := 80 \text{ }^\circ\text{C}$  - размах колебания разности температур двух соседних точек  
 стенки аппарата  
 $\Delta T_a := 40 \text{ }^\circ\text{C}$  - размах колебания расчетной температуры в месте соединения  
 двух материалов с различными коэффициентами линейного расширения  
 $P_0 := 12.47 \text{ МПа}$  - размах колебаний давления  
 $F_0 := 14.8 \text{ МН}$  - размах осевой сжимающей силы  
 $M_0 := 1.512 \text{ МН}$  - размах изгибающего момента  
 $D_0 := 1.4 \text{ м}$  - диаметр обечайки  
 $s_0 := 0.2 \text{ м}$  - толщина стенки обечайки  
 $\sigma_0 := 158 \text{ МПа}$  - допускаемое напряжение  
 $\varphi_1 := 1$  - коэффициент [12, рис. 8]  
 $\eta := 1.8$  - коэффициент, учитывающий местные напряжения  
 $P_{\text{доп2}} := 38.873 \text{ МПа}$  - допускаемое внутреннее избыточное давление  
 Допускаемое усилие  
 $F_{\text{доп}} := \pi \cdot (D_0 + s_0 - 0.001) \cdot (s_0 - 0.001) \cdot \sigma_0 \cdot \varphi_1 = 157.946 \text{ МН}$   
 Допускаемый изгибающий момент  
 $M_{\text{доп}} := \frac{\pi}{4} \cdot D_0 \cdot (D_0 + s_0 - 0.001) \cdot (s_0 - 0.001) \cdot \sigma_0 \cdot \varphi_1 = 55.281 \text{ МН м}$   
 Амплитуда колебаний напряжений конструкционного материала  

$$\sigma_{\text{ам}} := \frac{\sigma_{\text{ам.доп}} \cdot \zeta \cdot \eta}{2} \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{доп2}}} + \frac{F_0}{F_{\text{доп}}} + \frac{M_0}{M_{\text{доп}}} \right) + \frac{\eta}{2} \cdot [E_{T3} \cdot \alpha_{T3} \cdot \Delta T_T + (E_1 \cdot \alpha_1 - E_2 \cdot \alpha_2) \cdot \Delta T_a]$$
 $\sigma_{\text{ам}} = 242.306 \text{ МПа}$   
 Выбираем максимальное значение амплитуды напряжений  

$$\sigma_{\text{ам.макс}} := \max \left( \sigma_{\text{ам}}, \frac{B}{n_\sigma} \right) = 242.306 \text{ МПа}$$
 Допускаемое число циклов нагружения  

$$N_{\text{доп}} := \frac{1}{n_N} \cdot \left( \frac{A}{\sigma_{\text{ам}} - \frac{B}{n_\sigma}} \cdot \frac{2300 - T_A}{2300} \right)^2 = 2.224 \cdot 10^4$$
 Проверка выполнения условий  
 Условие :=  $\left\{ \begin{array}{l} \text{"Выполняется"} \quad \text{if } \frac{N}{N_{\text{доп}}} \leq 1 \\ \text{"Не выполняется"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$   
 Условие = "Выполняется"  
 Условие прочности на малоцикловую усталось :=  $\left\{ \begin{array}{l} \text{"Выполняется"} \quad \text{if } \sigma_{\text{ам}} \leq \sigma_{\text{ам.доп}} \\ \text{"Не выполняется"} \quad \text{otherwise} \end{array} \right.$   
 Условие прочности на малоцикловую усталось = "Выполняется"

Рис. 4.3. Листинг программы расчета аппарата высокого давления

## Глава 5. Аппараты из пластических масс

### 5.1. Изготовление аппаратов из стеклопластика

Продукция из пластмасс и армированных композиционных материалов (углепластика, стеклопластика и органопластика) в настоящее время представлена горизонтальными и вертикальными химическими, топливными и пищевыми емкостями, теплообменниками, абсорбционными и ректификационными колоннами, фильтрами, скрубберами, коррозионно-стойкими технологическими трубопроводами и газоходами, насосами, арматурой и др.

Стеклопластики - материалы, получаемые из стеклянного волокна и разного вида пластмасс на основе синтетических смол (полиэфирных, феноло-формальдегидных, эпоксидных, кремнийорганических и др.). В результате сочетания свойств стекловолокна и синтетических смол стеклопластики обладают высокой прочностью, они трудновоспламеняемы, атмосфероустойчивы, негигроскопичны, не поддаются гниению и устойчивы в химических агрессивных средах. Эти свойства позволяют использовать для изготовления различных аппаратов гладкие или гофрированные листы из стеклопластиков.

Армирующий наполнитель - стекловолокнистые материалы из непрерывного волокна, расположенного слоями по толщине материала.

Связующее - модифицированные феноло-формальдегидные, эпоксидные и другие смолы. В качестве связующего принимаем эпоксидную смолу марки ЭД-16 ГОСТ 10587-84.

Общее количество стекловолокна составляют 45 - 65 % по объему.

В промышленности широкое применение получил метод формования изделий из стеклопластиков путем намотки стекловолокнистого материала на форму. Использование в качестве наполнителей жгутов, лент, нитей обеспечивает максимальную прочность изделий. К тому же такие наполнители дешевые. Данная технология нашла применение для изготовления тел

вращения: труб для нефтегазовой и химической промышленности, газоотводящих труб, цистерн для хранения и транспортировки химически активных продуктов, воды и горюче-смазочных материалов, промышленных резервуаров [15].

Высокая прочность при малом собственном весе, что значительно снижает издержки по транспортировке, погрузочно-разгрузочным операциям и монтажным работам.

Высокая надежность в эксплуатации в температурном диапазоне от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Высокая атмосферостойкость, химстойкость, неподверженность коррозии и гниению.

Сущность метода намотки заключается в намотке стекложгута, пропитанного связующим, на вращающуюся оправку. Для того чтобы обеспечить определенную ориентацию жгута на поверхность оправки, скорость перемещения отжимных валков в ванне согласуется со скоростью вращения оправки.

Содержание компонентов в системе смола - стекловолокно регулируется отжимными валиками.

Обязательная стадия процесса - отверждение намотанной на оправку заготовки. При этом заготовка может быть дополнительно уплотнена с помощью вакуумного или надувного мешков.

Высокая прочность изделий, полученных намоткой, достигается за счет ориентированной укладки наполнителя, его высокого содержания в материале изделия.

Однако метод намотки применим только для изделий оболочкового типа, причем предпочтительно имеющих форму тел вращения. Наибольшее применение метод намотки нашел в авиа- и ракетостроении для формования корпусов ракет и ракетных двигателей, а также фюзеляжей самолетов, в химической промышленности для изготовления аппаратов, емкостей, трубопроводов. Изделия, полученные методом намотки, могут иметь весьма

большие размеры (например, железнодорожные цистерны объемом 60м и более). В производстве труб метод намотки позволяет полностью механизировать технологический процесс и сделать его непрерывным. Трубы, изготовленные методом намотки, имеют гладкую внутреннюю поверхность, характеризуются высокими прочностными показателями.

Стеклопластиковые трубы чаще всего в мире изготавливаются методом непрерывной намотки стекловолокна со связующим компонентом (таким, как полиэфирная или эпоксидная смола) на оправку. После намотки труба отверждается, снимается с оправки, испытывается и отгружается заказчику.

После полимеризации образуется монолитная, инертная и высокопрочная структура со стенкой следующего строения:

**Стеклопластиковый (армированный терморезистивный) лайнер (внутренняя стенка)**

Обеспечивает герметичность и стойкость к воздействию агрессивной и/или абразивной среды, транспортируемой по трубопроводу. Абсолютная шероховатость внутренней стенки составляет 23 мкм.

**Силовой стеклопластиковый слой** обеспечивает механическую прочность при совместном действии внутренних и внешних нагрузок в процессе эксплуатации трубопровода.

**Внешний слой (гель-коут)** обеспечивает гладкость внешней поверхности и стойкость к воздействию влаги, атмосферных явлений, ультрафиолетовых лучей и химических веществ.

**Стеклопластиковые трубы: структура, изготовление методом непрерывной намотки**

Оборудование для изготовления стеклопластиковых труб, емкостей и других тел вращения по технологии намотки состоит из следующих составляющих:

секция подачи стеклянного ровинга;

установка для приготовления связующего: смесь полиэфирная смола -катализатор или другой тип связующего;



ванна с связующим - катализированной полиэфирной смолой или другим типом смолы, через которую проходят и смачиваются нити ровинга;

секция намотки с валами вращения, размер которых определяет диаметр конечного изделия из стеклопластика;

органы управления оборудованием для намотки.

Преимущества применения труб, изготовленных по технологии непрерывной намотки:

- высокая удельная прочность;
- малый вес в 4 раза легче стальных труб;
- высокая коррозионная стойкость;
- высокая надежность и долговечность;
- минимальные затраты на монтаж и обслуживание, высокая ремонтпригодность;
- малое гидравлическое сопротивление, отсутствие "зарастания" внутреннего сечения;
- экологическая чистота транспортируемых продуктов. Имеется гигиенический сертификат;
- длительный срок эксплуатации труб: в зависимости от конкретных условий - от 20 до 60 лет, без ремонта.

Изготовление будем начинать с царг колонны. Царги изготавливаются методом намотки стеклопластика на заготовку вместе с фланцами. При изготовлении царг надо сразу предусмотреть место крепления клапанной тарелки, а также питающей тарелки. В качестве связующего применяем эпоксидную смолу марки ЭД-16 ГОСТ 10587-84. Соответственно также изготавливаем крышки аппарата. Остальные вспомогательные элементы (тоже методом намотки) будем приклеивать к аппарату. Опору изготавливаем из стали 3 ГОСТ 380-94. К опоре привариваем фланец для крепления аппарата. В местах соединения фланцев применяем резиновую прокладку ГОСТ 15180-86.

## 5.2. Расчет колонного аппарата

Для расчета на прочность выбрана цельносварная тарельчатая ректификационная колонна непрерывного действия (рис. 5.1). Структурная схема расчета представлена на рис. 5.2. Блок-схема алгоритма расчета колонны приведена на рис. 5.3.

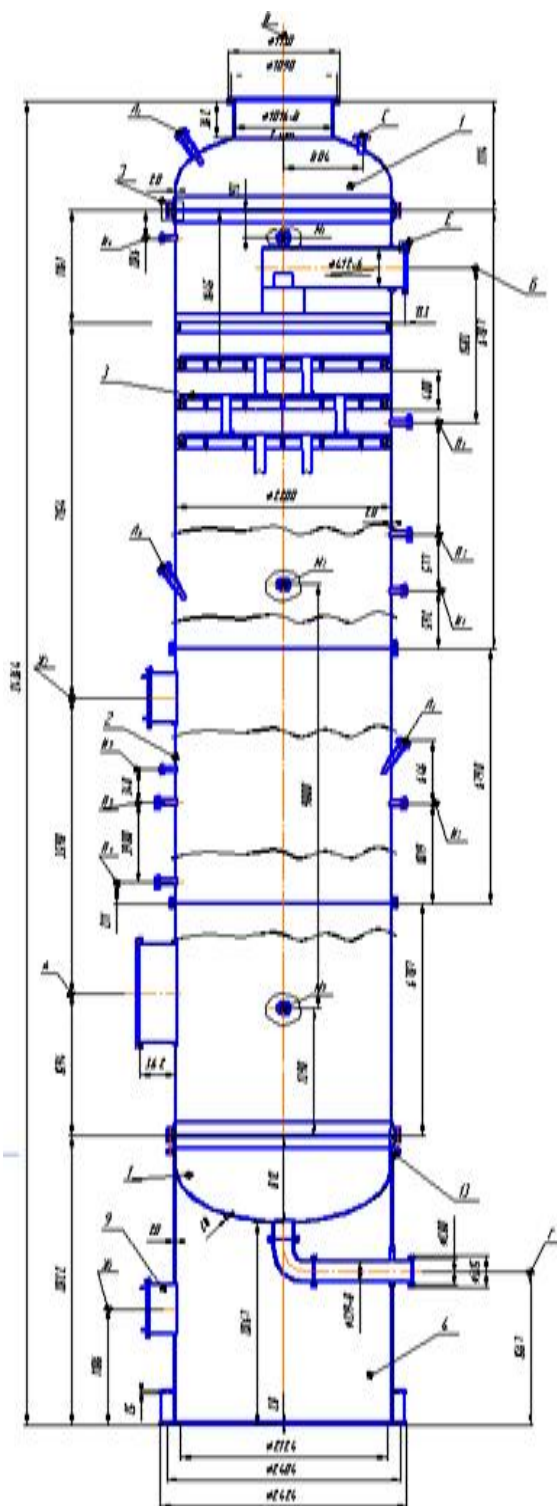
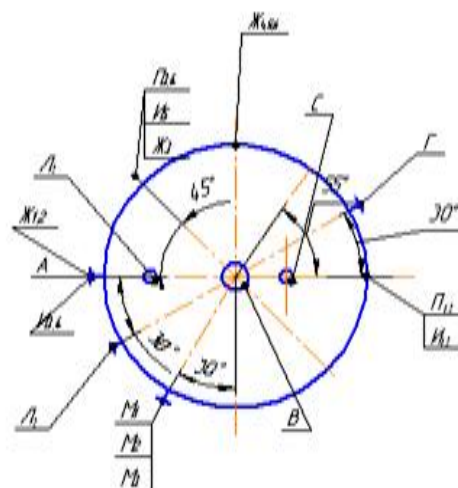


Таблица штуцеров

Обозначение	Наименование	Кол.	Проклад. условн. Ду, мм	Давление условное Ру, МПа
А	Вход пара (газа)	1	1000	0,2
Б	Вход питания	1	100	0,2
В	Выход пара	1	1000	0,2
Г	Выход кубового остатка	1	500	0,2
И1-5	Для термометра сопротивления	5	35	0,2
Ж1-6	Люк	6	600	0,2
Л1-6	Для термометра ртутного	1	35	0,2
М1-3	Для замера давления	3	25	0,2
П1-4	Для отбора проб	4	25	0,2
С	Для предохранительного клапана	1	50	0,2

Схема расположения штуцеров и люков



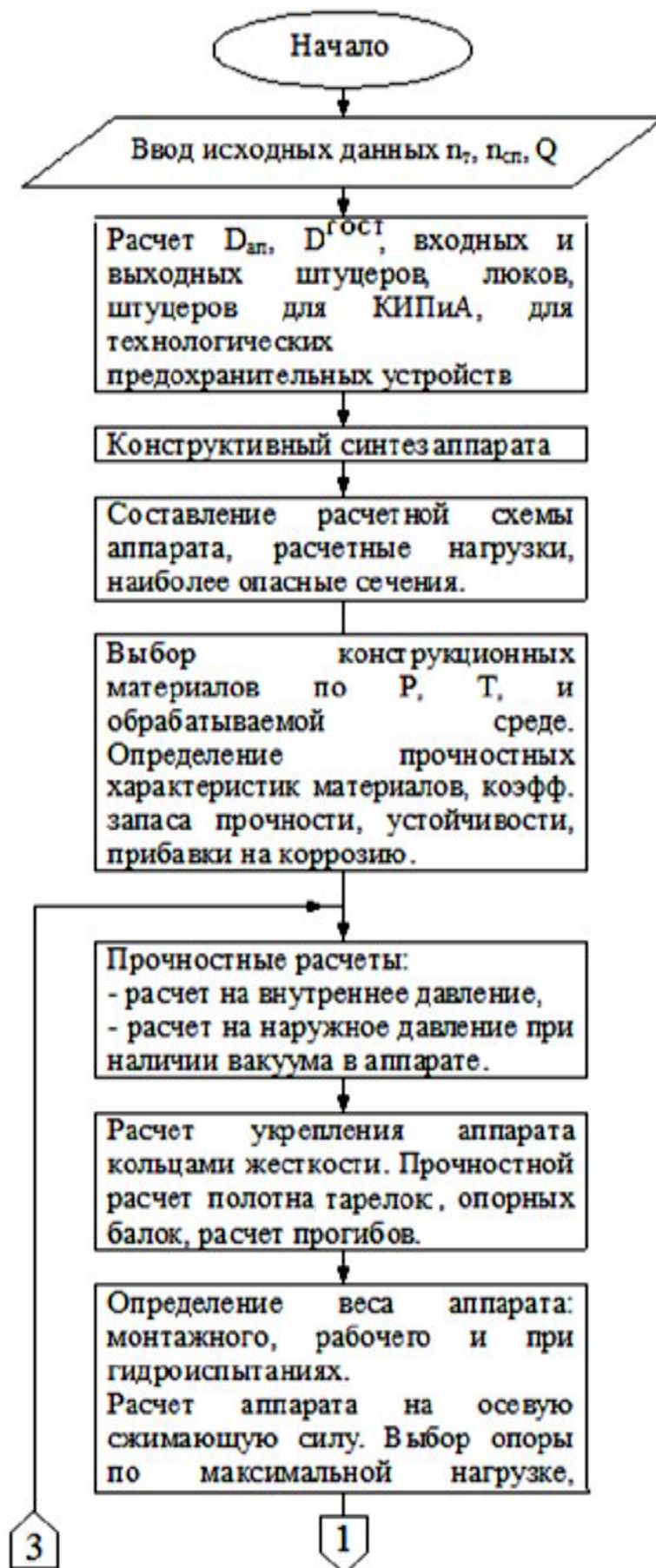
Техническая характеристика

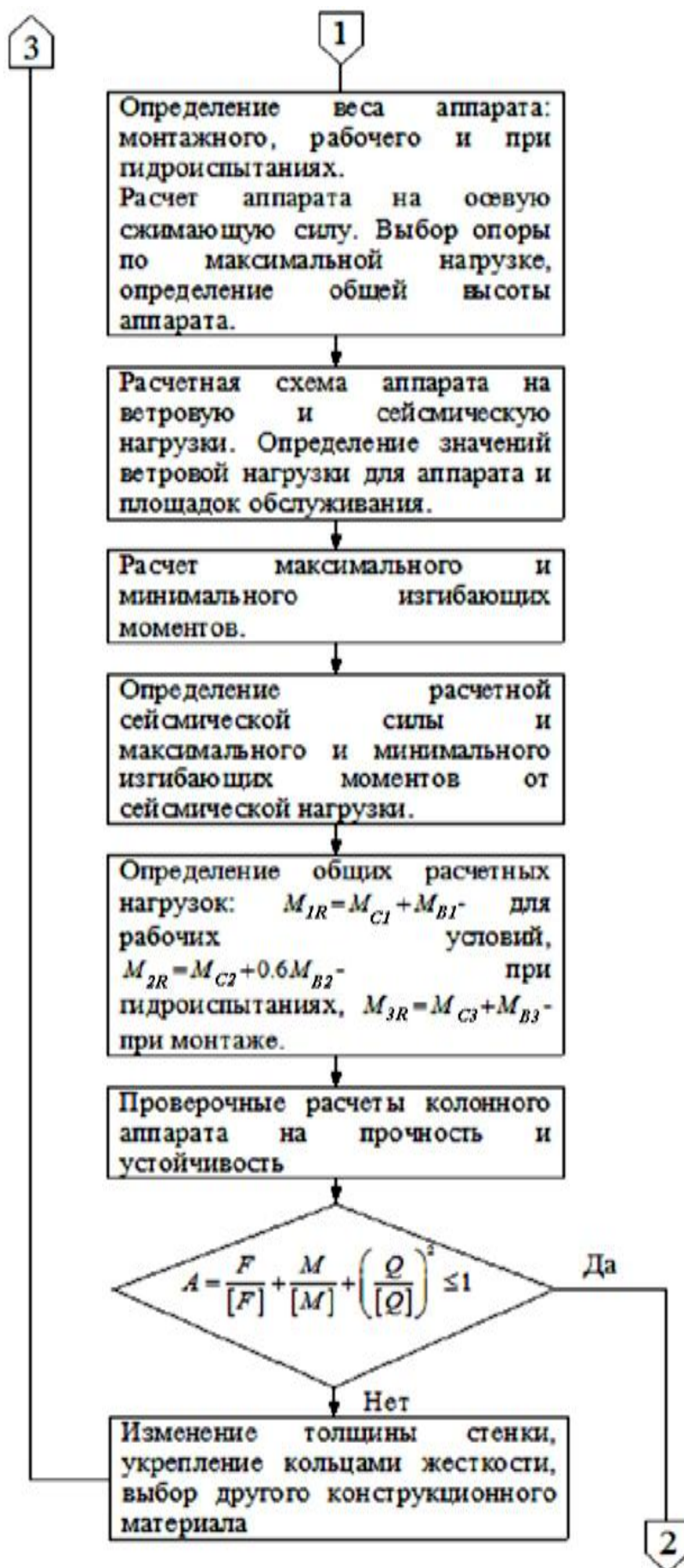
1. Аппарат предназначен для проведения процессов ректификации
2. Давление в колонне 0,2 МПа
3. Температура среды 50°
4. Тип тарелок-клапанные
5. Число тарелок-40
6. Габаритные размеры аппарата ДН=2200#24365

### Технические требования

1. Аппарат подлежит действию правил Госгортехнадзора РФ
2. При изготовлении, испытании и постановке аппарата должны выполняться требования:
  - а) ГОСТ 12.2.003-74 "Оборудование производственное. Общие требования безопасности";
3. Материал деталей-стеклопластик АГ-4В, опоры - ст.3 ГОСТ 380-71. Материал прокладок - паронит ПОН-1 ГОСТ 481-71.
4. Аппарат испытать на прочность и плотность гидравлически в вертикальном положении под давлением 0,2 МПа

Рис. 5.1. Ректификационная тарельчатая колонна из стеклопластика





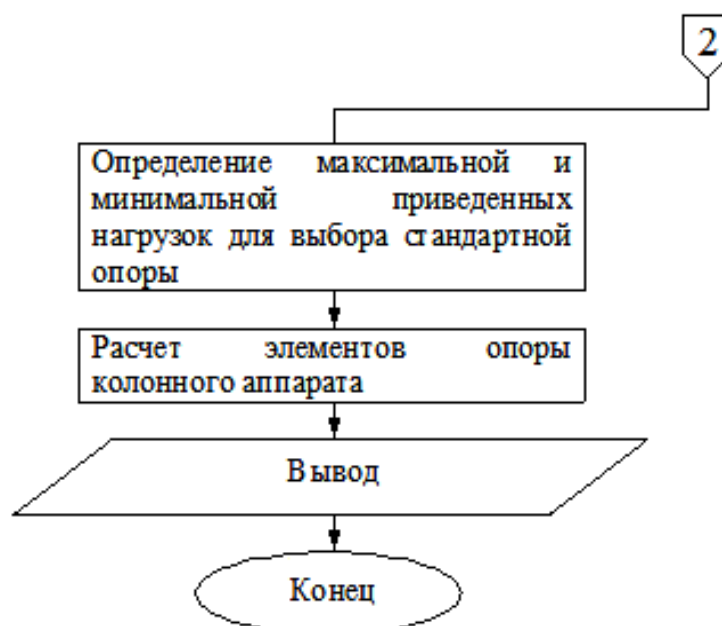
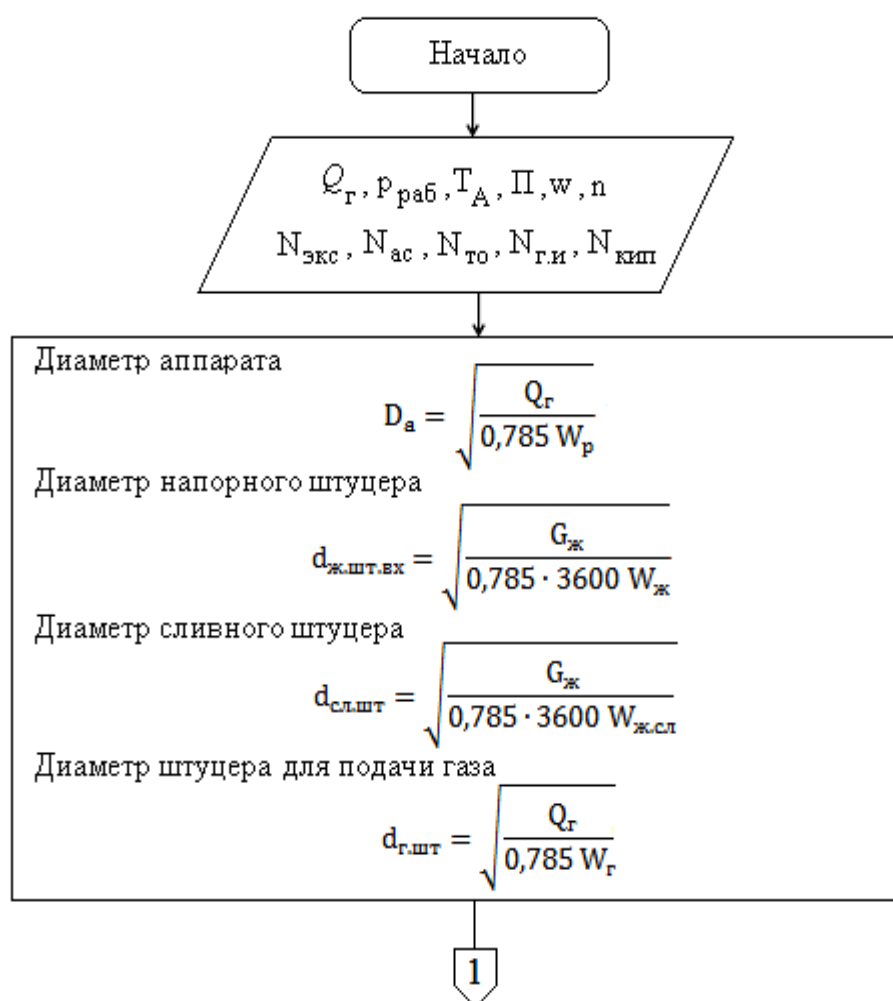
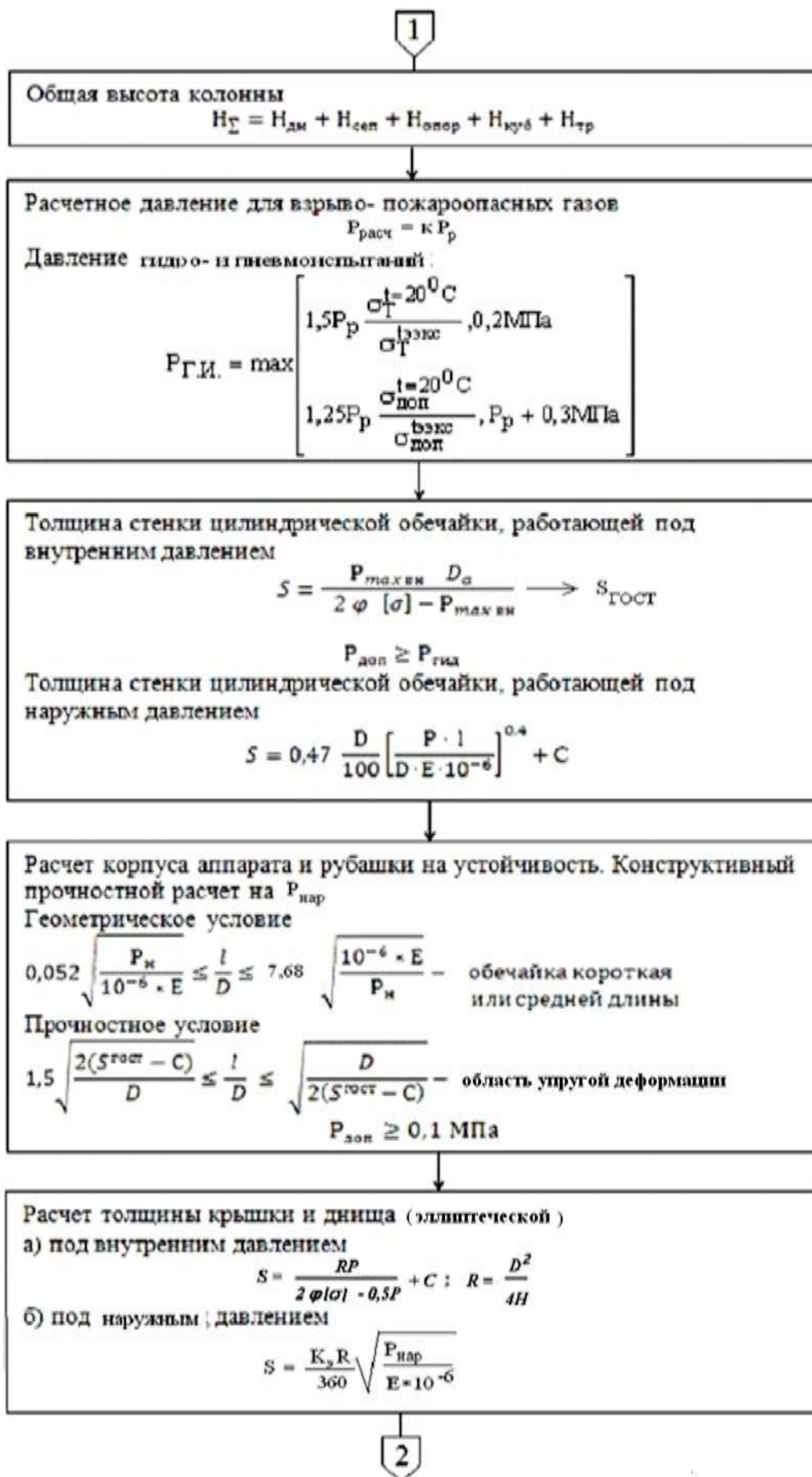
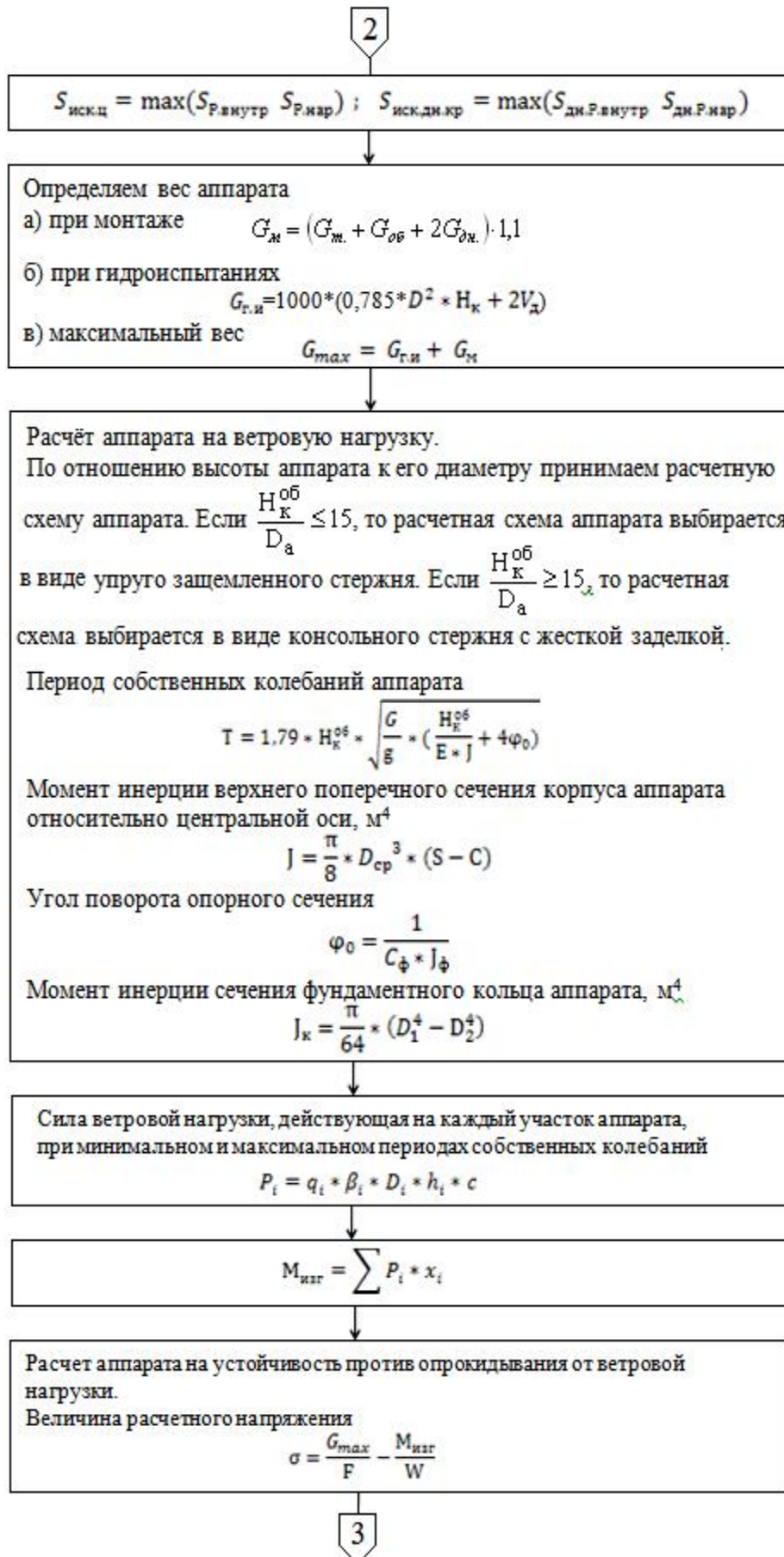
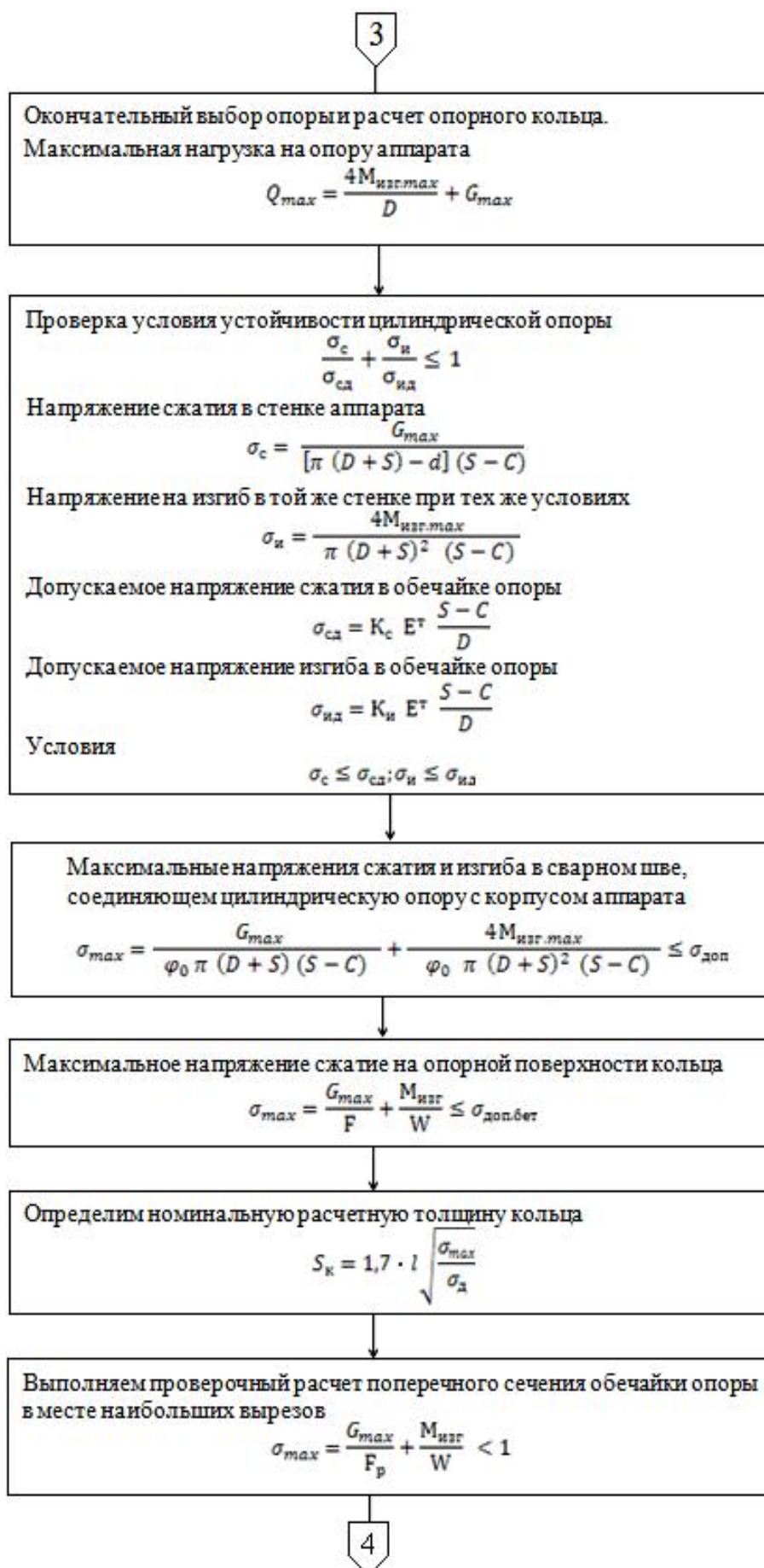


Рис.5.2. Структурная схема алгоритма расчета колонного аппарата

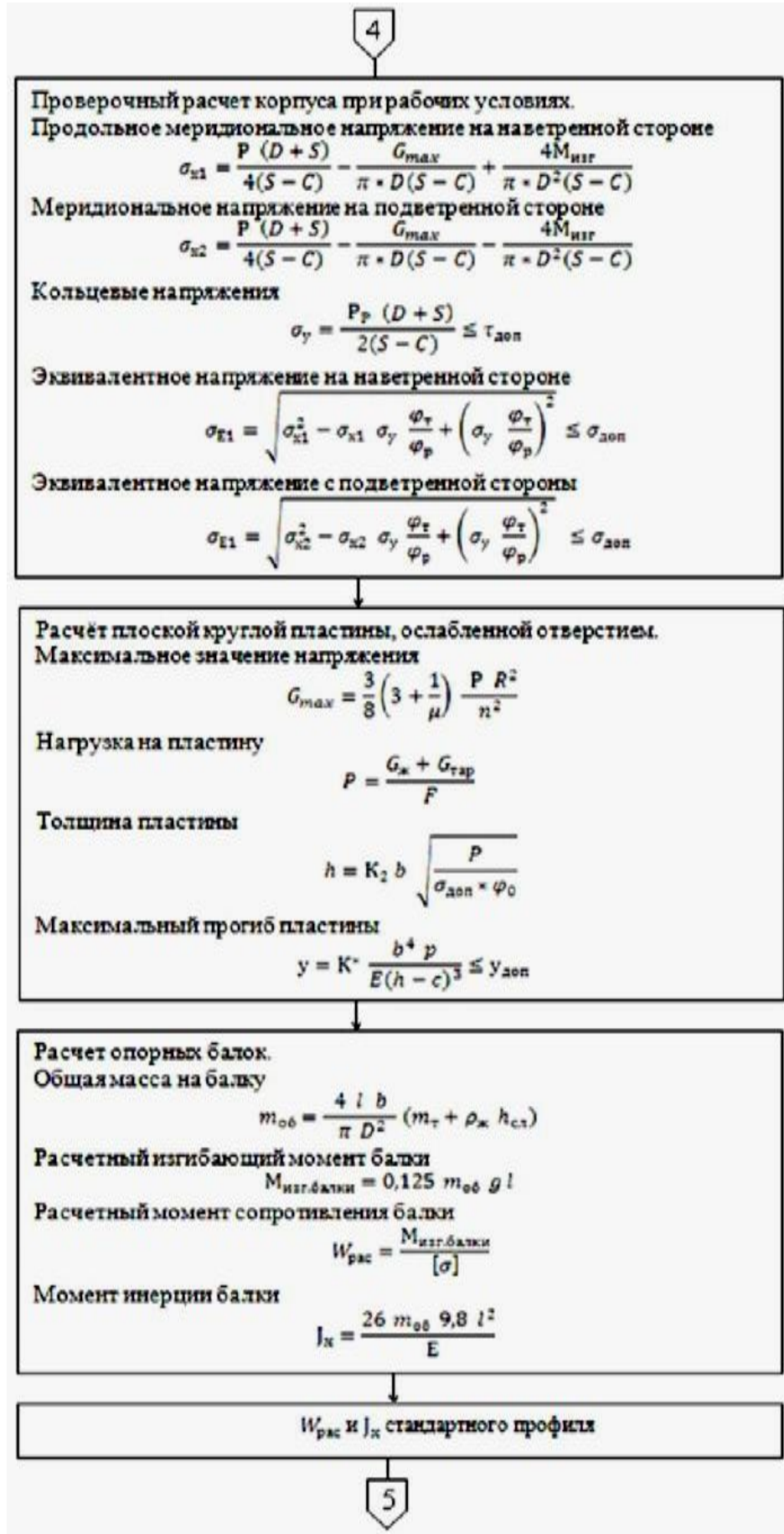












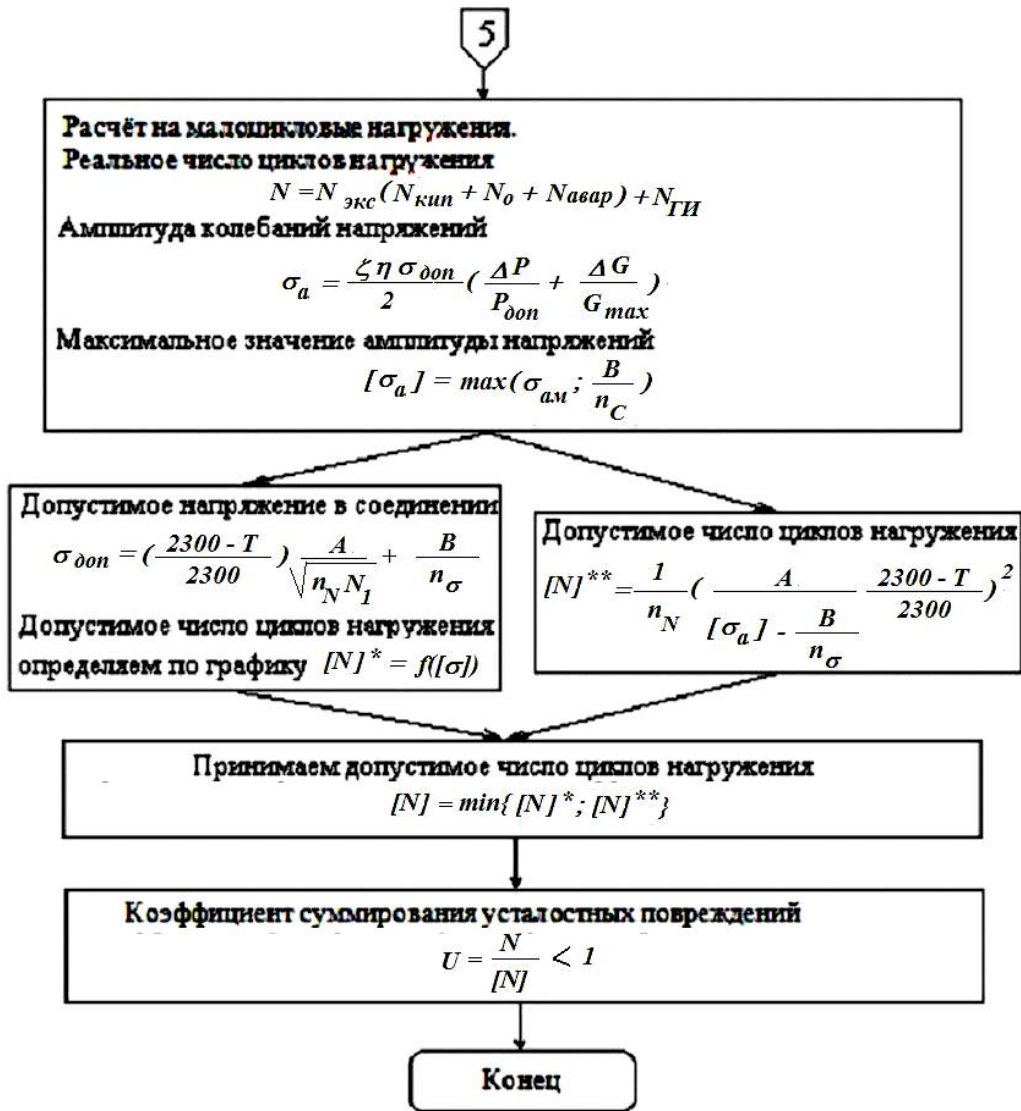


Рис.5.3. Блок-схема алгоритма расчета колонного аппарата

В соответствии с блок-схемой, приведенной на рис.5.3, составлена программа расчета тарельчатого колонного аппарата в системе Mathcad 15. Листинг программы расчета приведен на рис. 5.4.

### Исходные данные

Тип контактных устройств - клапанные тарелки	
Аппарат колонного типа установлен в производственном помещении	
Географический район - о. Сахалин	
Среда в аппарате - азотная кислота	
Материал корпуса - стеклопластик	
Производительность аппарата по газовой фазе, м <sup>3</sup> /с	$Q_{\Gamma} := 12$
Температура среды в аппарате, °С	$T_A := 50$
Количество тарелок	$n_{\text{тар}} := 40$
Давление внутри аппарата, МПа	$P_{\text{внутр}} := 0.2$
Плотность орошения, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)	$\Pi := 2.22 \cdot 10^{-3}$
Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>	$g := 9.81$
Рабочая скорость газа в аппарате, м/с	$w_{\text{раб}} := 3.5$
Коэффициент запаса прочности	$n := 5$
Циклы нагружения	
циклы эксплуатации	$N_{\text{экс}} := 10$
аварийные ситуации	$N_{\text{ас}} := 10$
технические остановки	$N_{\text{то}} := 10$
гидравлические испытания	$N_{\text{г.и}} := 15$
срабатывание средств автоматизации	$N_{\text{кшп}} := 20$

### Расчет

Диаметр аппарата, м

$$D_A := \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\Gamma}}{\pi \cdot w_{\text{раб}}}} = 2.089$$

В соответствии с ГОСТ 9617-76 принимаем стандартный диаметр аппарата, м

$$D_A := 2.2$$

Объемный расход жидкой фазы

$$G_{\text{ж}} := 0.785 \cdot D_A^2 \cdot \Pi = 8.435 \cdot 10^{-3}$$

Принимаем скорость жидкости во входном штуцере, м/с

$$\omega_2 := 3.5$$

Диаметр напорного штуцера, м

$$d_{\text{напор.штуц}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{ж}}}{\pi \cdot \omega_2}} = 0.055$$

Принимаем диаметр штуцера 100 мм

Принимаем скорость жидкости самотеком в сливном штуцере, м/с

$$\omega_3 := 0.5$$

Диаметр сливного штуцера, м

$$d_{\text{штуц.ж.слив}} := \sqrt{\frac{G_{\text{ж}}}{0.785 \cdot \omega_3}} = 0.147$$

Принимаем диаметр сливного штуцера 200 мм

Принимаем скорость газа в штуцере на входе в аппарат, м/с

$$\omega_{\text{штуц.г.вх}} := 20$$

Диаметр штуцера для выхода газа из аппарата, м

$$d_{\text{штуц.г.вх}} := \sqrt{\frac{Q_{\text{г}}}{0.785 \cdot \omega_{\text{штуц.г.вх}}}} = 0.874$$

Принимаем скорость газа в штуцере на выходе из аппарата, м/с

$$\omega_{\text{штуц.г.вых}} := 20$$

Диаметр штуцера для подачи газа в аппарат, м/с

$$d_{\text{штуц.г.вых}} := \sqrt{\frac{Q_{\text{г}}}{0.785 \cdot \omega_{\text{штуц.г.вых}}}} = 0.874$$

Принимаем диаметры штуцеров для подачи и вывода газа по ГОСТу, мм

$$d_{\text{шт.г.ГОСТ}} := 1000$$

*Общая высота колонны*

Расстояние между тарелками, м

$$H_{\text{тар}} := 0.4$$

Высота эллиптического днища, м

$$H_{\text{д}} := 0.55$$

Высота эллиптической крышки, м

$$H_{\text{кр}} := 0.55$$

Высота кубовой части аппарата, м

$$H_{\text{куб}} := 3$$

Отбортовка днища и крышки, м

$$H_{\text{с}} := 0.06$$

Высота сепарационной части аппарата, м

$$H_{\text{сеп}} := 1.5$$

Вылет выходного штуцера для газа, м

$$H_{\text{штуц.г.вых}} := 0.3$$

Вылет выходного штуцера для жидкости, м

$$H_{\text{штуц.ж.вых}} := 0.18$$

Общая высота колонны, м

$$H_{\text{А}} := H_{\text{тар}} \cdot (n_{\text{тар}} - 1) + H_{\text{д}} + H_{\text{кр}} + H_{\text{куб}} + H_{\text{сеп}} + 2 \cdot H_{\text{с}} + H_{\text{штуц.г.вых}} + H_{\text{штуц.ж.вых}}$$

$$H_{\text{А}} = 21.8$$

Принимаем высоту аппарата, м  $H_A := 22$

*Расчет колонны на прочность*

Допустимое напряжение для материала  
при температуре 20 °С, МПа

$$\sigma_{в.при.20.град} := 300$$

Допустимое напряжение для материала  
с учетом коэффициента прочности при  
температуре 20 °С, МПа

$$\sigma_{в.доп.при.20.град} := \frac{\sigma_{в.при.20.град}}{5} = 60$$

Допустимое напряжение для материала  
при температуре 50 °С, МПа

$$\sigma_{в.при.50.град} := 225$$

Допустимое напряжение для материала  
с учетом коэффициента прочности при  
температуре 50 °С, МПа

$$\sigma_{в.доп.при.50.град} := \frac{\sigma_{в.при.50.град}}{5} = 45$$

Плотность воды, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{в} := 1000$$

Давление расчетное, МПа

$$P_{расч} := 0.2 + H_A \cdot \rho_{в} \cdot g \cdot 10^{-6} = 0.416$$

Примем давление гидронспытаний равным  
давлению среды внутри аппарата

$$P_{г.н} := P_{расч}$$

Коэффициент прочности сварных швов обечайки  $\varphi := 0.5$

Прибавка на коррозию, м

$$C := 0.001$$

Толщина стенки обечайки, м

$$s_{1об} := \frac{P_{расч} \cdot D_A}{2.3 \cdot \varphi \cdot \sigma_{в.доп.при.50.град} - P_{расч}} + C = 0.019$$

Принимаем толщину стенки обечайки, м

$$s_{об.ГОСТ} := 0.02$$

Толщина стенок днища и крышки, м

$$s_{1д} := \frac{P_{расч} \cdot D_A}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma_{в.доп.при.50.град} - P_{расч}} \cdot \frac{D_A}{2 \cdot (H_d + H_c)} + C = 0.019$$

Принимаем толщину стенок днища и крышки, м

$$s_{д.ГОСТ} := 0.02$$

Давление допустимое для обечайки, МПа

$$P_{доп.об} := \frac{2.3 \cdot \varphi \cdot \sigma_{в. доп. при 50. град} \cdot (s_{об.ГОСТ} - C)}{D_A + (s_{об.ГОСТ} - C)} = 0.443$$

Условие выполняется, поскольку

$$P_{доп.об} > P_{г.н}$$

Давление допустимое для днища, МПа

$$P_{доп.дн} := \frac{8 \cdot \varphi \cdot \sigma_{в. доп. при 50. град} \cdot (s_{д.ГОСТ} - C) \cdot (H_d + H_c)}{D_A + 2 \cdot \frac{(H_d + H_c)}{D_A} \cdot (s_{д.ГОСТ} - C)} \cdot \frac{(H_d + H_c)}{D_A} = 0.429$$

Условие выполняется, поскольку

$$P_{доп.об} > P_{г.н}$$

*Расчет тарелок*

Коэффициент, зависящий от  
способа крепления тарелки

$$K := 0.432$$

Масса тарелки, опертой на балку, кг

$$m_{тар} := 15$$

Высота слоя жидкости на тарелке, м

$$H_{ж.тар} := 0.075$$

Коэффициент ослабления  
тарелки

$$\phi_{0.т} := 0.47$$

Ширина сектора тарелки  
(между смежными балками)

$$b := 0.4$$

Плотность среды, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_c := 1000$$

Толщина тарелки, м

$$s_{тар} := K \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\left( \frac{m_{тар} \cdot g}{0.785 \cdot D_A^2} + \frac{H_{ж.тар} \cdot \rho_c \cdot g \cdot 0.785 \cdot D_A^2}{0.785 \cdot D_A^2} \right) \cdot 10^{-6}}{\sigma_{в. доп. при 50. град}}}$$

$$s_{тар} = 7.169 \cdot 10^{-4}$$

Принимаем толщину тарелки 10 мм.

*Расчет опорных балок*

Максимальная длина сектора тарелки, м

$$l_{тар} := 2.2$$

Модуль упругости стеклопластика, МПа

$$E := 18000$$

Общая масса, воздействующая на балку, кг

$$m_{\text{балк}} := \frac{4 \cdot l_{\text{тар}} \cdot b}{\pi \cdot D_A} \cdot (m_{\text{тар}} + \rho_c \cdot H_{\text{ж.тар}} \cdot 0.785 \cdot D_A^2) = 69.439$$

Момент сопротивления балки, м<sup>3</sup>

$$W_{\text{балк}} := \frac{0.125 \cdot m_{\text{балк}} \cdot g \cdot l_{\text{тар}}}{\sigma_{\text{в.доп.при.50.град}}} = 4.163$$

Момент инерции балки при относительном прогибе, м<sup>4</sup>

$$J_{\text{х.балк}} := \frac{26 \cdot m_{\text{балк}} \cdot g \cdot l_{\text{тар}}^2}{E} = 4.762$$

Выбираем тавр № 18.

*Определение массы аппарата*

Масса тарелки

$$m_{\text{тар}} := 60$$

Плотность стеклопластика, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{пл}} := 2000$$

Площадь днища, м<sup>2</sup>

$$F_{\text{д}} := 5.66$$

Объем днища, м<sup>3</sup>

$$V_{\text{д}} := 1.616$$

Объем крышки, м<sup>3</sup>

$$V_{\text{кр}} := 1.616$$

Вес тарелки, Н

$$G_{\text{тар}} := m_{\text{тар}} \cdot g = 588.6$$

Вес всех тарелок, Н

$$\Sigma G_{\text{тар}} := n_{\text{тар}} \cdot G_{\text{тар}} = 2.354 \cdot 10^4$$

Высота обечайки, м

$$H_{\text{об}} := H_A - H_{\text{д}} - H_{\text{кр}} - 2 \cdot H_c - H_{\text{штуц.г.вых}} - H_{\text{штуц.г.вых}}$$

$$H_{\text{об}} = 20.18$$

Вес обечайки, Н

$$G_{\text{об}} := \pi \cdot D_A \cdot s_{\text{об.ГОСТ}} \cdot H_{\text{об}} \cdot \rho_{\text{пл}} \cdot g = 5.473 \cdot 10^4$$

Вес днища, Н

$$G_{\text{д}} := F_{\text{д}} \cdot s_{\text{д.ГОСТ}} \cdot \rho_{\text{пл}} \cdot g = 2.221 \cdot 10^3$$

Вес крышки, Н

$$G_{кр} := G_d$$

Вес при монтаже, Н

$$G_{монт} := 1.2 \cdot (G_{об} + G_d + G_{кр} + \Sigma G_{тар}) = 9.926 \cdot 10^4$$

Вес жидкости в аппарате, Н

$$G_{жк} := \left( \frac{\pi \cdot D_A^2 \cdot H_{об}}{4} + V_d + V_{кр} \right) \cdot \rho_c \cdot g = 7.842 \cdot 10^5$$

Максимальный вес аппарата, Н

$$G_{ап. макс} := G_{монт} + G_{жк} = 8.835 \cdot 10^5$$

Максимальный вес аппарата, Н

$$G_{ап. мин} := G_{монт} = 9.926 \cdot 10^4$$

*Расчет на сейсмическую нагрузку*

Коэффициент сейсмичности  $K_c := 0.1$

Коэффициент динамичности

$$\beta := 0.1 \quad \beta_{max} := 2.3 \quad \beta_{min} := 5$$

$$G_{1. макс} := \frac{G_{ап. макс}}{5} = 1.767 \cdot 10^5$$

$$G_{1. мин} := \frac{G_{ап. мин}}{5} = 1.985 \cdot 10^4$$

Момент инерции верхнего основного поперечного сечения аппарата относительно центральной оси,  $m^4$

$$J := \frac{\pi}{8} \cdot D_A^3 \cdot (s_{об.ГОСТ} - C) = 0.079$$

Максимальный период собственных колебаний аппарата, с

$$T_{max} := 1.79 \cdot H_{об} \cdot \sqrt{\frac{G_{ап. макс} \cdot 10^{-6} \cdot H_A}{g \cdot E \cdot J}} = 1.345$$

Минимальный период собственных колебаний аппарата, с

$$T_{min} := 1.79 \cdot H_{об} \cdot \sqrt{\frac{G_{ап. мин} \cdot 10^{-6} \cdot H_A}{g \cdot E \cdot J}} = 0.451$$



Расстояния от середины участка до основания аппарата

$$x_1 := 2.5$$

$$x_2 := 7.5$$

$$x_3 := 12.5$$

$$x_4 := 17.5$$

$$x_5 := 22.5$$

Сейсмическая сила в середине каждого участка аппарата, Н

$$P_{1.\min} := K_c \cdot \beta_{\min} \cdot G_{1.\min} \cdot x_5^2 \cdot \frac{G_{1.\max} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2)}{G_{1.\max} \cdot (x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 + x_4^4 + x_5^4)}$$

$$P_{1.\min} = 1.372 \cdot 10^4$$

$$P_{2.\min} := K_c \cdot \beta_{\min} \cdot G_{1.\min} \cdot x_4^2 \cdot \frac{G_{1.\max} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2)}{G_{1.\max} \cdot (x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 + x_4^4 + x_5^4)}$$

$$P_{2.\min} = 8.3 \cdot 10^3$$

$$P_{3.\min} := K_c \cdot \beta_{\min} \cdot G_{1.\min} \cdot x_3^2 \cdot \frac{G_{1.\max} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2)}{G_{1.\max} \cdot (x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 + x_4^4 + x_5^4)}$$

$$P_{3.\min} = 4.235 \cdot 10^3$$

$$P_{4.\min} := K_c \cdot \beta_{\min} \cdot G_{1.\min} \cdot x_2^2 \cdot \frac{G_{1.\max} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2)}{G_{1.\max} \cdot (x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 + x_4^4 + x_5^4)}$$

$$P_{4.\min} = 1.524 \cdot 10^3$$

$$P_{5.\min} := K_c \cdot \beta_{\min} \cdot G_{1.\min} \cdot x_1^2 \cdot \frac{G_{1.\max} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2)}{G_{1.\max} \cdot (x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 + x_4^4 + x_5^4)}$$

$$P_{5.\min} = 169.384$$

Минимальный изгибающий момент от действия сейсмической нагрузки, Нм

$$M_{\min} := P_{1.\min} \cdot x_1 + P_{2.\min} \cdot x_2 + P_{3.\min} \cdot x_3 + P_{4.\min} \cdot x_4 + P_{5.\min} \cdot x_5$$

$$M_{\min} = 1.8 \cdot 10^5$$

$$P_{1.\max} := K_c \cdot \beta_{\max} \cdot G_{1.\max} \cdot x_5^2 \cdot \frac{G_{1.\max} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2)}{G_{1.\max} \cdot (x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 + x_4^4 + x_5^4)}$$

$$P_{1.\max} = 5.618 \cdot 10^4$$

$$P_{2.\max} := K_c \cdot \beta_{\max} \cdot G_{1.\max} \cdot x_4^2 \cdot \frac{G_{1.\max} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2)}{G_{1.\max} \cdot (x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 + x_4^4 + x_5^4)}$$

$$P_{2.\max} = 3.398 \cdot 10^4$$

$$P_{3.\max} := K_c \cdot \beta_{\max} \cdot G_{1.\max} \cdot x_3^2 \cdot \frac{G_{1.\max} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2)}{G_{1.\max} \cdot (x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 + x_4^4 + x_5^4)}$$

$$P_{3.\max} = 1.734 \cdot 10^4$$

$$P_{4.\max} := K_c \cdot \beta_{\max} \cdot G_{1.\max} \cdot x_2^2 \cdot \frac{G_{1.\max} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2)}{G_{1.\max} \cdot (x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 + x_4^4 + x_5^4)}$$

$$P_{4.\max} = 6.242 \cdot 10^3$$

$$P_{5.\max} := K_c \cdot \beta_{\max} \cdot G_{1.\max} \cdot x_1^2 \cdot \frac{G_{1.\max} \cdot (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2)}{G_{1.\max} \cdot (x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 + x_4^4 + x_5^4)}$$

$$P_{5.\max} = 693.53$$

Максимальный изгибающий момент от действия сейсмической нагрузки, Нм

$$M_{\max} := P_{1.\max} \cdot x_1 + P_{2.\max} \cdot x_2 + P_{3.\max} \cdot x_3 + P_{4.\max} \cdot x_4 + P_{5.\max} \cdot x_5$$

$$M_{\max} = 7.369 \cdot 10^5$$

*Расчет опор*

Толщина стенки опоры, м

$$s_{\text{оп}} := 0.02$$

Предел текучести для  
стаклопластика, МПа

$$\sigma_T := 200$$

Осевое сжимающее напряжение, МПа

$$\sigma_c := \frac{G_{\text{ап. min}}}{\pi \cdot D_A \cdot (s_{\text{оп}} - C)} \cdot 10^{-6} = 0.756$$

Изгибающее напряжение, МПа

$$\sigma_{\text{И}} := \frac{4 \cdot M_{\text{max}}}{\pi \cdot D_A^2 \cdot (s_{\text{оп}} - C)} \cdot 10^{-6} = 10.202$$

Вычислим соотношение

$$\frac{D_A}{2 \cdot (s_{\text{оп}} - C)} = 57.895$$

Для данного отношения определим коэффициенты  $k_{\text{И}}$  и  $k_{\text{с}}$  по графикам на рис. П13

$$k_{\text{И}} := 0.046$$

$$k_{\text{с}} := 0.026$$

Коэффициент изгиба

$$K_{\text{И}} := 875 \cdot \frac{\sigma_{\text{Г}}}{E} \cdot k_{\text{И}} = 0.447$$

Коэффициент сжатия

$$K_{\text{с}} := 875 \cdot \frac{\sigma_{\text{Г}}}{E} \cdot k_{\text{с}} = 0.253$$

Допускаемое напряжение на сжатие в обечайке опоры, МН/м<sup>2</sup>

$$\sigma_{\text{сд}} := K_{\text{с}} \cdot E \cdot \frac{s_{\text{оп}} - C}{D_A}$$

$$\sigma_{\text{сд}} = 39.295$$

Допускаемое напряжение на изгиб в обечайки опоры, МН/м<sup>2</sup>

$$\sigma_{\text{Ид}} := K_{\text{И}} \cdot E \cdot \frac{s_{\text{оп}} - C}{D_A}$$

$$\sigma_{\text{Ид}} = 69.523$$

Имеем

$$\frac{\sigma_{\text{с}}}{\sigma_{\text{сд}}} + \frac{\sigma_{\text{И}}}{\sigma_{\text{Ид}}} = 0.166$$

Поскольку  $0,237 < 1$ , то устойчивость обеспечена.

Внутренний диаметр кольца, м

$$D_{\text{вн.кол}} := D_A - 0.06$$

Наружный диаметр кольца, м

$$D_{\text{н.кол}} := D_A + 2 \cdot s_{\text{оп}} + 0.2 = 2.44$$

Опорная площадь кольца, м<sup>2</sup>

$$F_{\text{оп}} := 0.785 \cdot (D_{\text{н.кол}}^2 - D_{\text{вн.кол}}^2) = 1.079$$

Момент сопротивления опорного кольца, м<sup>3</sup>

$$W := \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D_{\text{н.кол}}^4 - D_{\text{вн.кол}}^4)}{D_{\text{н.кол}}} = 0.582$$

Напряжение на опорной поверхности при максимальной силе тяжести, МПа

$$\sigma_{\text{max.кол}} := \frac{G_{\text{ап.мах}} \cdot 10^{-6}}{F_{\text{оп}}} + \frac{M_{\text{мах}} \cdot 10^{-6}}{W} = 2.085$$

Допускаемое напряжение сжатия бетона  
фундамента  $\sigma_{\text{фун}} = 10$  МПа

Условие выполняется, поскольку  $\sigma_{\text{мах.кол}} < \sigma_{\text{фун}}$

Напряжение на опорной поверхности при минимальной силе тяжести, МПа

$$\sigma_{\text{min}} := \frac{G_{\text{ап.мин}} \cdot 10^{-6}}{F_{\text{оп}}} + \frac{M_{\text{мин}} \cdot 10^{-6}}{W} = 0.401$$

Выбираем фундаментные болты М24 ГОСТ 24379.1-80

*Укрепление выреза отверстия под штуцер*

Диаметр штуцера, м  $D_{\text{штуц}} := 0.5$

Условный проход под штуцер, м  $D_{\text{ус.штуц}} := 0.53$

Толщина стенки штуцера, м  $s_{\text{штуц}} := 0.012$

Коэффициент прочности сварного шва,  
соединяющего штуцер с корпусом  $\varphi_{\text{штуц}} := 0.35$

Давление рабочее, МПа  $P_{\text{раб}} := 0.2$

Расчетная толщина стенки штуцера, м

$$s_{\text{штуц.расч}} := P_{\text{раб}} \cdot \frac{(D_{\text{ус.штуц}} + 2C)}{\sigma_{\text{в.доп.при 50 град}} \cdot 2 \cdot \varphi_{\text{штуц}} - P_{\text{раб}}}$$

$$s_{\text{штуц.расч}} = 3.399 \cdot 10^{-3}$$

Расчетная длина внешней части штуцер, м

$$l_{\text{штуц.расч}} := 125 \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{ус.штуц}} + 2 \cdot C}{s_{\text{штуц}} - C}} = 869.3$$

Ширина зоны укрепления, м

$$b_{\text{штуц}} := \sqrt{D_{\text{штуц}} \cdot (s_{\text{об.ГОСТ}} - C)} = 0.097$$

Расчетная ширина зоны укрепления, м

$$b_{\text{штуц.расч}} := b_{\text{штуц}}$$

Расчетный диаметр отверстия

$$d_{\text{штуц.расч}} := 0.4 \cdot b_{\text{штуц.расч}} = 0.039$$

Расчетная площадь вырезанного сечения, м<sup>2</sup>

$$S_{\text{расч}} := 0.5 \cdot (D_{\text{ус.штуц}} - d_{\text{штуц.расч}}) \cdot s_{\text{штуц.расч}} = 8.346 \cdot 10^{-4}$$

Расчетная площадь укрепляющего сечения укрепляемой стенки, м<sup>2</sup>

$$S_{\text{ст.расч}} := b_{\text{штуц.расч}} \cdot (s_{\text{об.ГОСТ}} - s_{\text{штуц.расч}} - C)$$

$$S_{\text{ст.расч}} = 1.521 \cdot 10^{-3}$$

Расчетная площадь укрепляющего сечения внешней части штуцера, м<sup>2</sup>

$$S_{\text{ст.штуц.расч}} := l_{\text{штуц.расч}} \cdot (s_{\text{штуц}} - s_{\text{штуц.расч}} - C) \cdot \varphi_{\text{штуц}}$$

$$S_{\text{ст.штуц.расч}} = 2.313$$

Общая площадь, м<sup>2</sup>

$$S_{\text{ст.расч}} + S_{\text{ст.штуц.расч}} = 2.314$$

Укрепление выреза приварным штуцером достаточно, поскольку

$$S_{\text{расч}} < S_{\text{ст.расч}} + S_{\text{ст.штуц.расч}}$$

*Расчет на малоцикловое нагружение колонны*

Число циклов нагружения

$$N_{\text{экв}} := N_{\text{экс}} \cdot (N_{\text{кшп}} + N_{\text{то}} + N_{\text{ас}}) + N_{\text{г.л}} = 415$$

Допускаемые напряжения текучести

$$\sigma_{\text{т.доп.при 20 град}} := 60$$

материала при температуре 20 °С, МПа

Прочностные характеристики стеклопластика

$$A := 4000$$

$$B := 230$$

Коэффициент запаса прочности по числу циклов  $n_N := 10$

Коэффициент запаса прочности по напряжениям  $n_\sigma := 5$

Коэффициент, учитывающий местные напряжения  $\eta := 1.5$

Коэффициент, учитывающий тип сварного соединения  $\zeta := 1.5$

Допускаемая амплитуда напряжений, МПа

$$\sigma_{\text{ам.доп}} := \zeta \cdot \eta \cdot \frac{\sigma_{\text{в.доп.при.50.град}}}{2} \cdot \left( \frac{P_{\text{г.н}} - P_{\text{раб}}}{P_{\text{раб}}} + \frac{G_{\text{ап.мах}} - G_{\text{ап.мин}}}{G_{\text{ап.мах}}} \right)$$

$$\sigma_{\text{ам.доп}} = 99.567$$

Допускаемое число циклов напряжения

$$N_{\text{доп}} := \frac{1}{n_N} \cdot \left( \frac{A}{\sigma_{\text{ам.доп}} - \frac{B}{n_\sigma}} \cdot \frac{2300 - T_A}{2300} \right)^2$$

$$N_{\text{доп}} = 533.6$$

Для коэффициента суммирования усталостных повреждений должно выполняться условие

$$U := \frac{N}{N_{\text{доп}}} < 1$$

Имеем

$$U := \frac{N}{N_{\text{доп}}} = 0.778$$

Поскольку  $\frac{N}{N_{\text{доп}}} < 1$ , то условие выполняется.

Следовательно, аппарат устойчив к малоцикловым нагрузениям.

*Расчет фланцев*

Диаметр фланца, м

$$D_\phi := 2.33$$

Высота фланца, м

$$H_\phi := 0.052$$

Диаметр окружности центров болтов, м	$D_6 := 2.29$
Диаметр под болт, м	$d_6 := 0.023$
Температура болта, °C	
$t_6 := 0.95 \cdot T_A = 47.5$	
Температура фланца, °C	
$t_f := 0.96 \cdot T_A = 48$	
Допустимое напряжение для материала болта при температуре 20 °C, МПа	
$\sigma_{в.доп.б.при.20.град} := 110$	
Допустимое напряжение для материала фланца при температуре 20 °C, МПа	
$\sigma_{в.доп.ф.при.20.град} := 60$	
Прокладка - резина ГОСТ 7338-77	
Ширина уплотнительной прокладки, м	$b_{гр} := 0.025$
Высота прокладки, м	$H_{гр} := 0.003$
Вспомогательная величина, м	$l_{min} := 0.030$
Наружный диаметр прокладки, м	
$D_{н.гр} := D_6 - l_{min} = 2.26$	
Меньшая толщина конической втулки фланца, м	
$s_{в.ф.min} := 1.35 \cdot s_{об.ГОСТ} = 0.027$	
Отношение большей толщины втулки фланца к меньшей	$\beta_{в.ф} := 2.2$
Большая толщина втулки фланца, м	
$s_{в.ф.max} := \beta_{в.ф} \cdot s_{в.ф.min} = 0.059$	
Длина втулки приварного встык фланца, м	
$l_{в.ф} := 3 \cdot (s_{в.ф.max} - s_{в.ф.min}) = 0.097$	
Средний диаметр прокладки, м	
$D_{ср.гр} := D_{н.гр} - b_{гр} = 2.235$	
Эффективная ширина прокладки, м	

$$b_{\text{гр.эф}} := 0.6 \cdot \sqrt{b_{\text{гр}}} = 0.095$$

Прокладочный коэффициент  $m_{\text{гр}} := 2.5$

Допустимое давление смятия прокладки, МПа  $qd := 18$

Удельное давление смятия прокладки, МПа  $q := 2$

Линейная податливость фланца

$$E_p := 3 \cdot \left( 1 + \frac{b_{\text{гр}}}{2 \cdot H_{\text{гр}}} \right) = 15.5$$

Шаг между болтами, м

$$\Delta_{\text{б}} := 4.2 \cdot d_{\text{б}} = 0.097$$

Количество болтов, шт

$$z_{\text{б}} := \pi \cdot \frac{D_{\text{б}}}{\Delta_{\text{б}}} = 74.475$$

Принимаем коэффициент

$$\chi := 1.45$$

Эквивалентная толщина втулки фланца, м

$$se := s_{\text{в.ф.мин}} \cdot \chi = 0.039$$

Вычисляем коэффициенты

$$x := \frac{l_{\text{в.ф}}}{\sqrt{D_A \cdot s_{\text{в.ф.мин}}}} = 0.399$$

$$\lambda := \frac{H_{\text{ф}}}{\sqrt{D_A \cdot se}} = 0.177$$

$$j := \frac{H_{\text{ф}}}{se} = 1.328$$

$$K := \frac{D_{\text{ф}}}{D_A} = 1.059$$

$$\psi := 1.28 \cdot \log(K)$$

$$\psi = 0.032$$



$$\omega := \left[ 1 + 0.9 \cdot \lambda \cdot (1 + \psi \cdot j^2) \right]^{-1}$$

$$\omega = 0.856$$

$$T1 := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)}$$

$$T1 = 1.889$$

$$\psi2 := \frac{K + 1}{K - 1}$$

$$\psi2 = 34.846$$

Угловая податливость фланца

$$y_{\phi, \text{уг}} := \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0.9 \lambda)] \cdot \psi2}{H_{\phi}^3 \cdot E} = 0.106$$

Линейная податливость фланца

$$y_{\phi, \text{л}} := \frac{H_{\text{гр}}}{\pi \cdot D_{\text{ср.гр}} \cdot b_{\text{гр}} \cdot E_{\text{р}}} = 1.103 \cdot 10^{-3}$$

Расчетная длина болта, м

$$l_{\text{б.расч}} := 2 \cdot H_{\phi} + H_{\text{гр}} + 0.28 \cdot d_{\text{б}} = 0.113$$

Площадь поперечного сечения болта, м<sup>2</sup>

$$S_{\text{б}} := 2.35 \cdot 10^{-4}$$

Модуль упругости материала болта, МПа  $E_{\text{б}} := 2 \cdot 10^5$

Линейная податливость болтов

$$y_{\text{б}} := \frac{l_{\text{б.расч}}}{E_{\text{б}} \cdot S_{\text{б}} \cdot z_{\text{б}}} = 3.241 \cdot 10^{-5}$$

Угловая податливость фланца

$$y_{\phi 1} := \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0.9 \lambda)] \cdot \psi2}{H_{\phi}^3 \cdot E} = 0.106$$

$$y_{\phi 2} := y_{\phi 1}$$

**Коэффициенты**

$$B1 := y_{\phi 1} \cdot (D_{\phi} - D_A - se) = 5.38 \cdot 10^{-3}$$

$$B2 := B1$$

$$A := \left[ y_{\phi, л} + y_{\phi} + 0.25 \cdot (y_{\phi 1} + y_{\phi 2}) \cdot (D_{\phi} - D_{ср.гр})^2 \right]^{-1}$$

$$A = 772.181$$

**Коэффициент жесткости фланцевого соединения**

$$\alpha := A \cdot \left[ y_{\phi} + 0.25 \cdot (B1 + B2) \cdot (D_{\phi} - D_{ср.гр}) \right]$$

$$\alpha = 0.139$$

**Коэффициент**

$$\gamma := A \cdot y_{\phi} = 0.025$$

**Нагрузка, действующая на фланцевое соединение от внутреннего избыточного давления**

$$Q_g := 0.785 \cdot D_{ср.гр}^2 \cdot P_{раб} = 0.784$$

**Реакция прокладки в рабочих условиях**

$$R_p := 2\pi \cdot D_{ср.гр} \cdot b_{гр.эф} \cdot m_{гр} \cdot P_{раб} = 0.666$$

**Коэффициенты**

$$\alpha_{\phi} := 35 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_{\phi} := 11.65 \cdot 10^{-6}$$

**Усилие, возникающее от температурных деформаций**

$$Q_t := \gamma \cdot z_{\phi} \cdot S_{\phi} \cdot E_{\phi} \cdot (\alpha_{\phi} \cdot t_{\phi} - \alpha_{\phi} \cdot t_{\phi}) = 0.099$$

**Болтовая нагрузка в условиях монтажа, Н**

$$P_{\phi 1} := \alpha \cdot Q_g + R_p = 0.775$$

$$P_{\phi 1} := \pi \cdot D_{ср.гр} \cdot b_{гр.эф} \cdot q = 1.332$$

$$P_{\phi 1} := 0.4 \cdot \sigma_{в.доп.б.при.20.град} \cdot z_{\phi} \cdot S_{\phi} = 0.77$$

**Принимаем**

$$P_{\phi 1} := 1.332$$

**Болтовая нагрузка в рабочих условиях, Н**

$$P_{\phi 2} := P_{\phi 1} + (1 - \alpha) \cdot Q_g + Q_t = 2.106$$

**Приведенные изгибающие моменты в диаметральном сечении фланца, Н·м**

$$M_{\phi 1} := 0.5 \cdot P_{\phi 1} \cdot (D_{\phi} - D_{\text{ср.гр}}) = 0.037$$

$$M_{\phi 2} := 0.5 \cdot [P_{\phi 2} \cdot (D_{\phi} - D_{\text{ср.гр}}) + Qg \cdot [D_{\text{ср.гр}} - (D_A - se)]]$$

$$M_{\phi 2} = 0.087$$

Принимаем

$$M_{\phi} := M_{\phi 2}$$

Предел прочности болтов при различных нагрузках, МПа

$$\sigma_{\phi 1} := \frac{P_{\phi 1}}{z_{\phi} \cdot S_{\phi}} = 76.108$$

$$\sigma_{\phi 2} := \frac{P_{\phi 2}}{z_{\phi} \cdot S_{\phi}} = 120.316$$

Условие выполнено, поскольку

$$\sigma_{\phi 1} < \sigma_{\text{в.доп.б.при.20.град}}$$

Условие не выполнено, поскольку

$$\sigma_{\phi 2} > \sigma_{\text{в.доп.б.при.20.град}}$$

Увеличиваем количество болтов до 92

$$z_{\phi} := 92$$

$$\sigma_{\phi 1} := \frac{P_{\phi 1}}{z_{\phi} \cdot S_{\phi}} = 61.61$$

$$\sigma_{\phi 2} := \frac{P_{\phi 2}}{z_{\phi} \cdot S_{\phi}} = 97.397$$

Условие выполнено, поскольку

$$\sigma_{\phi 1} < \sigma_{\text{в.доп.б.при.20.град}}$$

Условие выполнено,

$$\sigma_{\phi 2} < \sigma_{\text{в.доп.б.при.20.град}}$$

Принимаем меньшую толщину конической втулки фланца, м

$$s_{\text{в.ф.мин}} := 0.05$$

Максимальное напряжение в сечении фланца в месте соединения втулки с плоскостью фланца, МПа

$$\sigma 1 := \frac{T 1 \cdot M_{\phi} \cdot \omega}{D_A \cdot (s_{\text{в.ф.мин}} - C)^2} = 26.627$$

$$\psi_3 := 2$$

Максимальное напряжение в сечении фланца в месте соединения втулки с обечайкой, МПа

$$\sigma_0 := \psi_3 \cdot \sigma_1$$

$$\sigma_0 = 53.254$$

Напряжение в кольце фланца от действия изгибающего момента, МПа

$$\sigma_k := M_\phi \cdot [1 - \omega \cdot (1 + 0.9 \cdot \lambda)] \cdot \frac{\psi_2}{D_A \cdot H_\phi^2}$$

$$\sigma_k = 3.915$$

Напряжения во втулке фланца от внутреннего давления, МПа

$$\sigma_x := \frac{P_{\text{раб}} \cdot D_A}{2 \cdot (s_{\text{в.ф.мин}} - C)} = 4.49$$

$$\sigma_y := \frac{P_{\text{раб}} \cdot D_A}{4 \cdot (s_{\text{в.ф.мин}} - C)} = 2.245$$

Прочность фланца в сечениях  $s_{\text{в.ф.макс}}$  и  $s_{\text{в.ф.мин}}$  МПа

$$\Sigma\sigma_1 := \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_k^2 + (\sigma_1 \cdot \sigma_k)} = 28.785$$

Условие выполняется, поскольку

$$\Sigma\sigma_1 < 60$$

$$\Sigma\sigma_2 := \sqrt{(\sigma_0 + \sigma_y)^2 + \sigma_x^2} - (\sigma_0 + \sigma_y) \cdot \sigma_x = 53.396$$

Условие выполняется, поскольку

$$\Sigma\sigma_2 < 60$$

Угол поворота фланца

$$\theta := \sigma_k \cdot \frac{D_A}{E \cdot H_\phi} = 9.202 \cdot 10^{-3}$$

Условие выполняется, поскольку

$$\theta < 0.013.$$

Рис. 5.4. Листинг программы расчета тарельчатой колонны

## Список литературы

1. Тимонин, А.С. Основы конструирования и расчета технологического и природоохранного оборудования: справочник / А.С. Тимонин. Изд. 3-е, испр. – Калуга: Изд-во Бочкаревой Н.Ф. – 2006. - Т. 1. - 1025 с.
2. Тимонин, А.С. Основы конструирования и расчета технологического и природоохранного оборудования: справочник / А.С. Тимонин. Изд. 3-е, испр. – Калуга: Изд-во Бочкаревой Н.Ф. - 2006. - Т. 2. – 851 с.
3. Поникаров, И.И. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки: учебник / И.И. Поникаров, М.Г. Гайнуллин. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Альфа-М, 2006. – 608 с.
4. Правила устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением /ПБ 03-576-03/. - М.: ГУП НТЦ по безопасности в промышленности ГосГортехнадзора России, 2003. – 192 с.
5. Конструирование и расчет машин химических производств: учебник для машиностроительных вузов по специальности «Химическое машино- и аппаратостроение» / Ю.И. Гусев [и др.] - М.: Машиностроение, 1985. –408 с.
6. Лашинский, А.А. Конструирование сварных химических аппаратов / А.А. Лашинский. – Л.: Машиностроение, 1981. – 382 с.
7. Миронов, В.П. Лабораторный практикум по курсу «Конструирование и расчет элементов оборудования» для студентов специальностей 170500 и 170600 / В.П. Миронов, Н.В. Фрякин, И.В. Постникова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2005. – 100 с.
8. Правила устройства и безопасности эксплуатации технических трубопроводов /ПБ 03-585-03/. - М.: ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности ГосГортехнадзора России», 2004. – 152 с.

9. Правила устройства и безопасности эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды /ПБ 10-573-03/- М.: ГУП НТЦ по безопасности в промышленности ГосГортехнадзора России, 2004. – 128 с.
10. ГОСТ Р 52857.4 – 2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. - М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2007. – 41 с.
11. ГОСТ Р 24755-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепленных отверстий. - М.: Изд-во Стандартов, 1989. — 33 с.
12. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. - М.: Изд-во Стандартов, 1989. — 55 с.
13. Лацинский, А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: справочник / А.А. Лацинский, А.Р. Толчинский. - Изд. 3-е; исп. – М.: Альянс, 2008. – 752 с.
14. Марочник сталей и сплавов /под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
15. Миронов, В.П. Расчет сосудов и аппаратов. В 2 ч. Ч 2. Расчет аппаратов: учебное пособие / В.П. Миронов, И.В. Постникова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2010. – 122 с.
16. Михалев, М.Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи: учеб. пособие / М.Ф. Михалев и [др.], - Л.:Машиностроение, 1984.- 301 с.

## Приложение

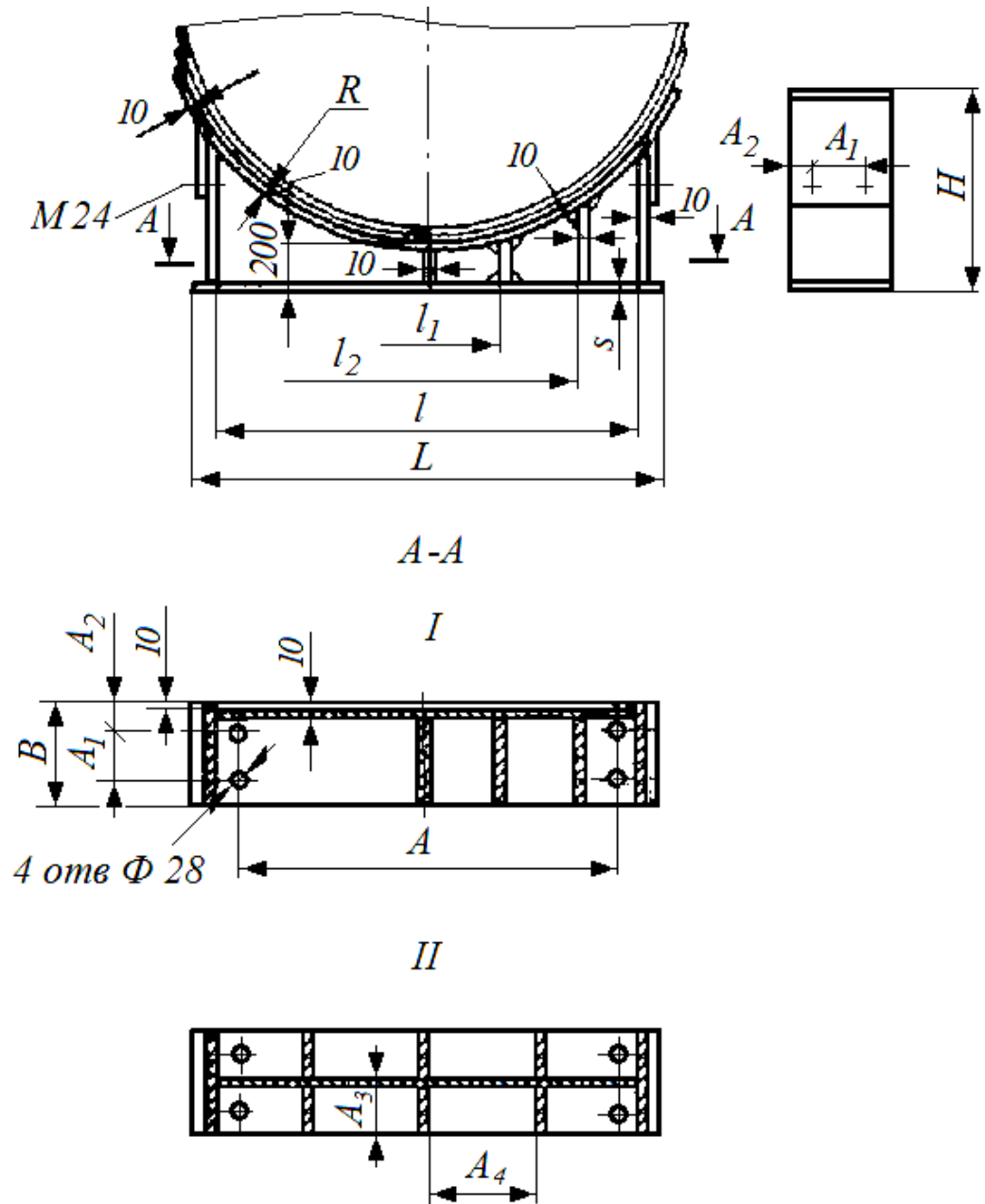


Рис. П1. Опора седловая:

$I$  – с поперечными ребрами, расположенными по одну сторону продольного ребра;  $II$  – с поперечными ребрами, расположенными симметрично по обе стороны продольного ребра

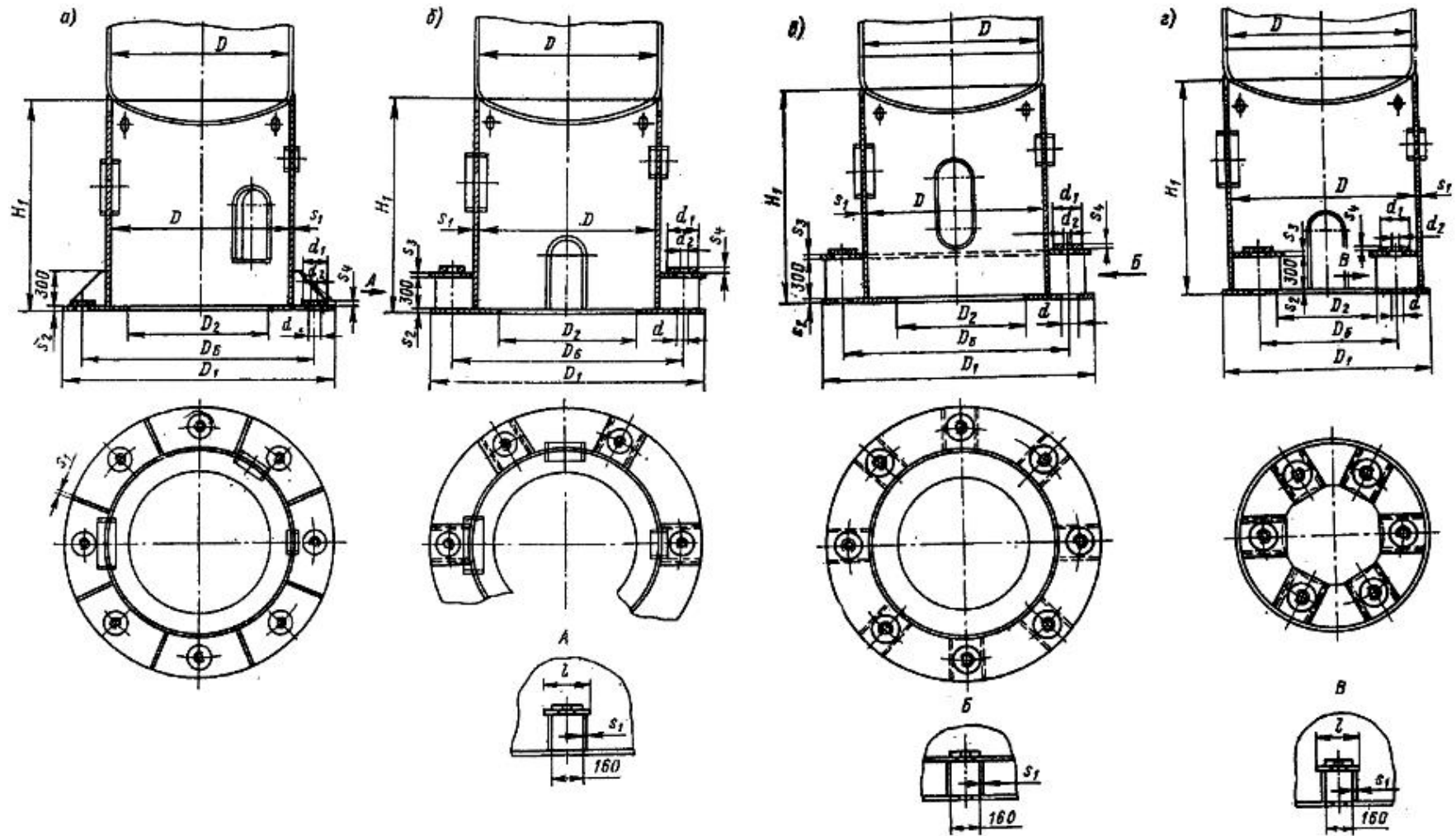


Рис. П2. Опоры для колонных аппаратов: а – тип 1 (с местными косынками), б – тип 2 (с наружными стойками под болты), в – тип 3 (с кольцевым опорным поясом), з – тип 5 (с внутренними стойками под болты)



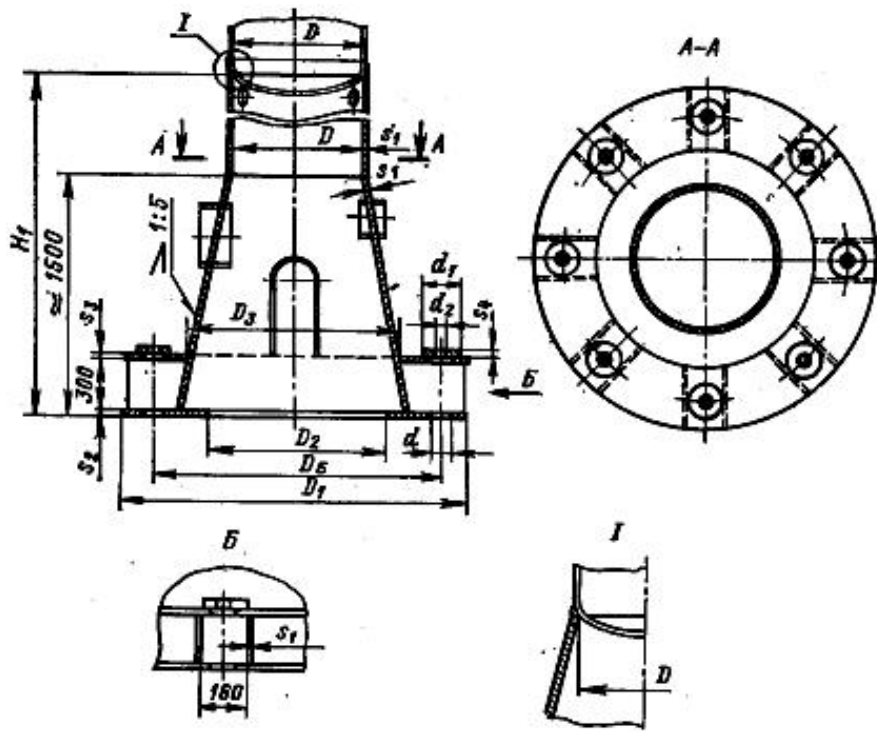


Рис. ПЗ. Коническая опора (тип 4) с кольцевым опорным поясом для колонных аппаратов

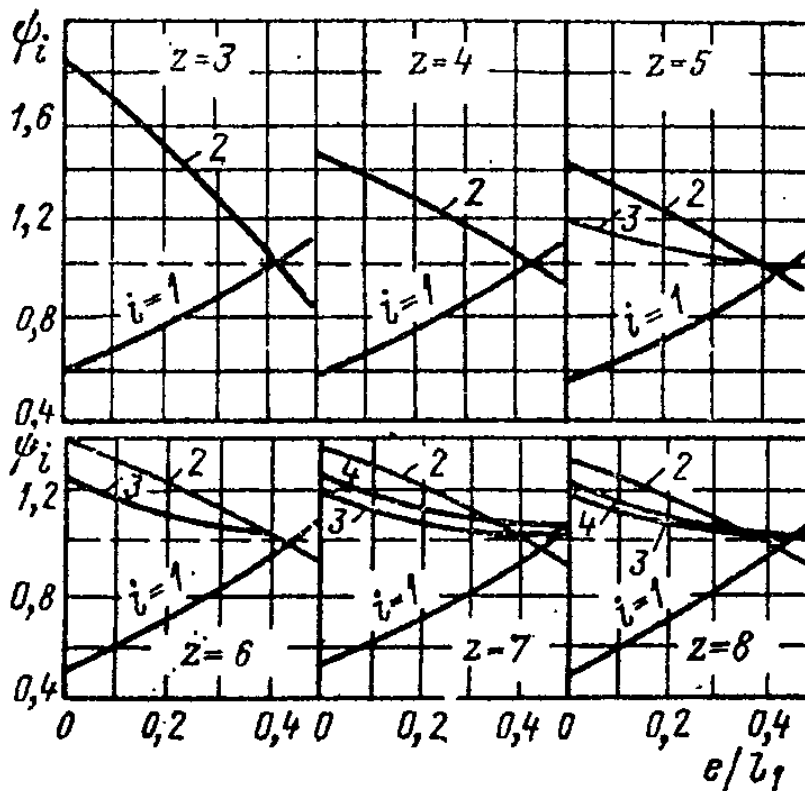


Рис. П4. Графики для определения коэффициента  $\psi_i$ :

$i$  – порядковый номер опоры,  $z$  – количество опор

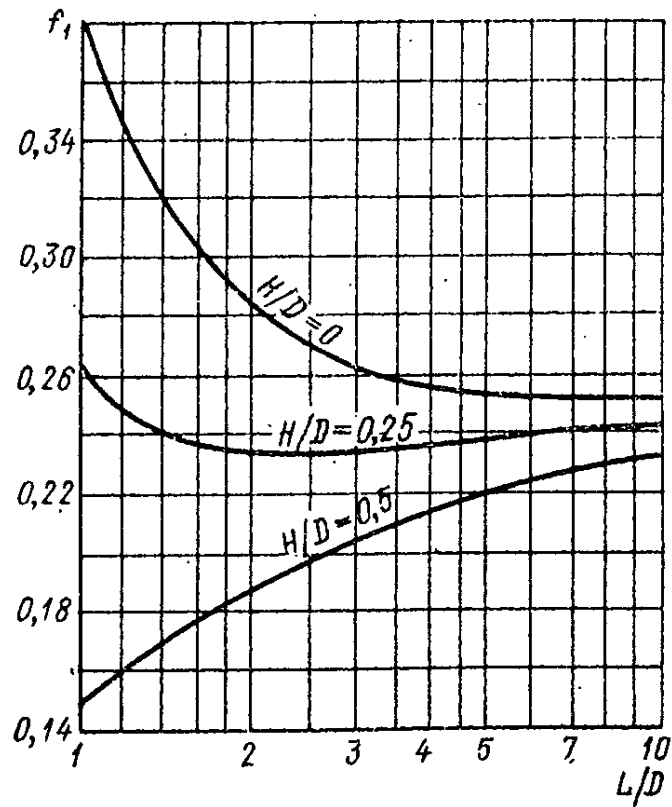


Рис. П5. Графики для определения коэффициента  $f_1$

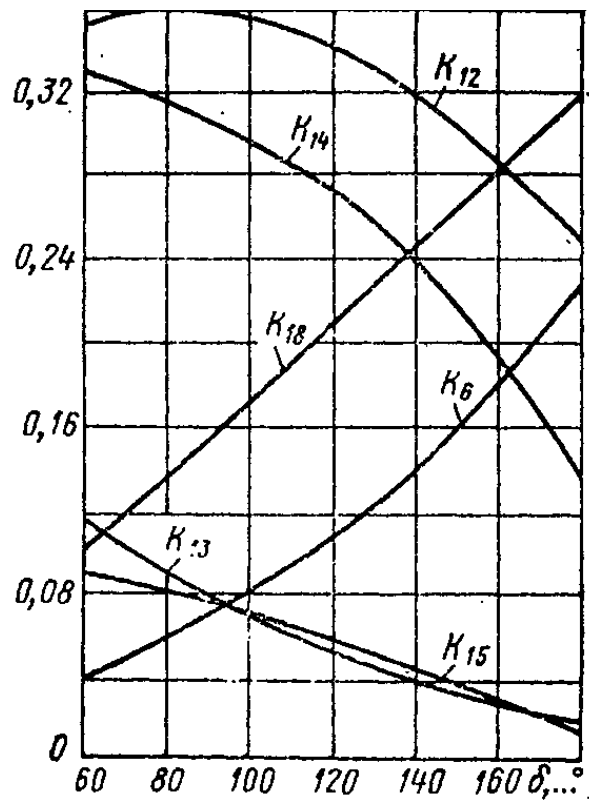


Рис. П6. Графики для определения коэффициентов  $K_6$ ,  $K_{12} - K_{15}$  и  $K_{18}$

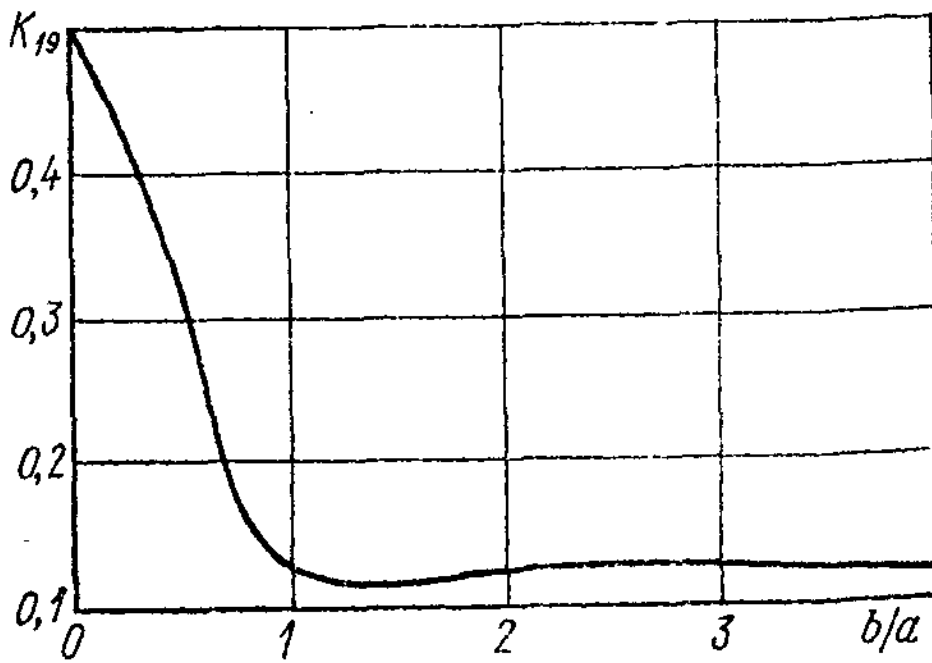


Рис. П7. График для определения коэффициента  $K_{19}$

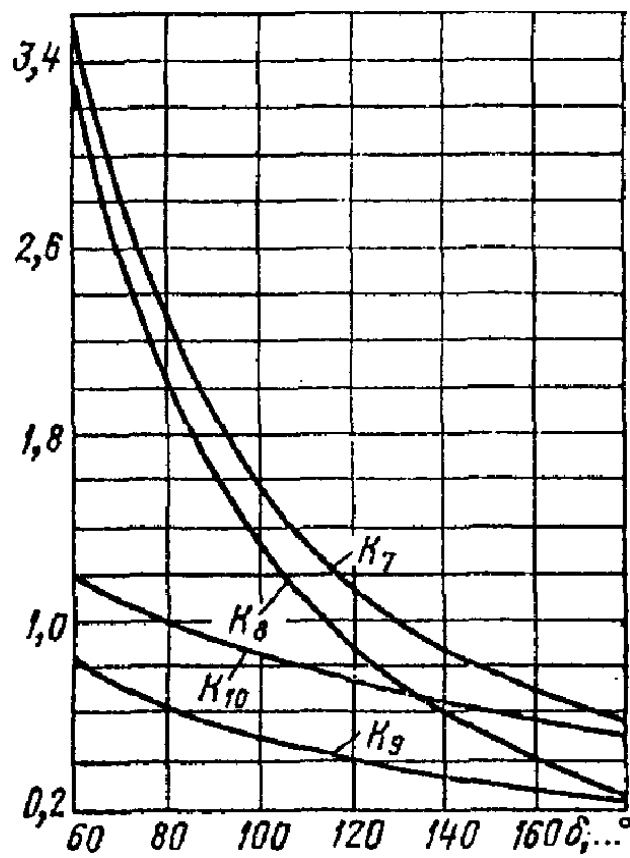


Рис. П8. Графики для определения коэффициентов  $K_7 - K_{10}$

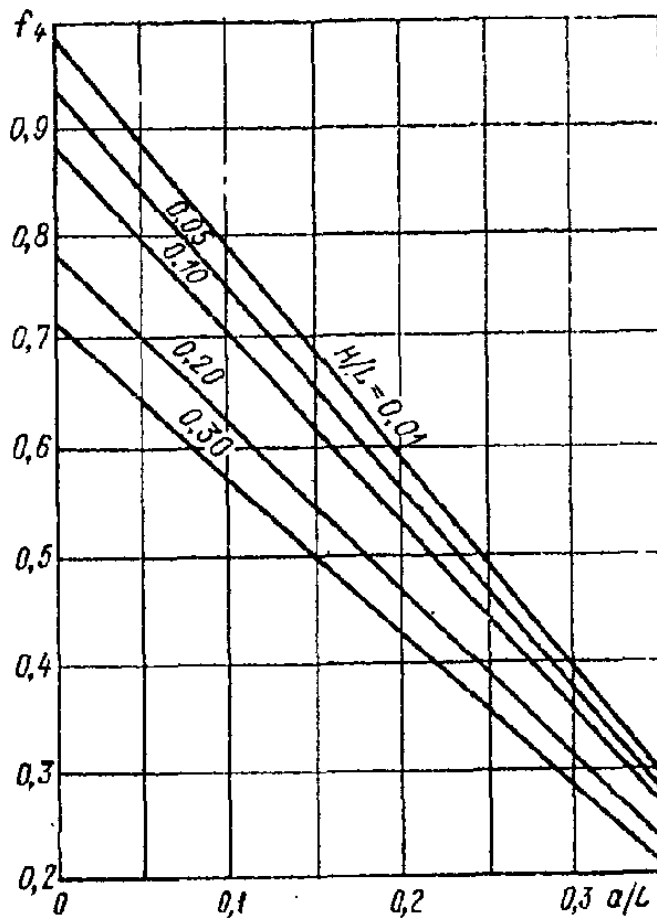


Рис. П9. Графики для определения коэффициентов  $f_4$

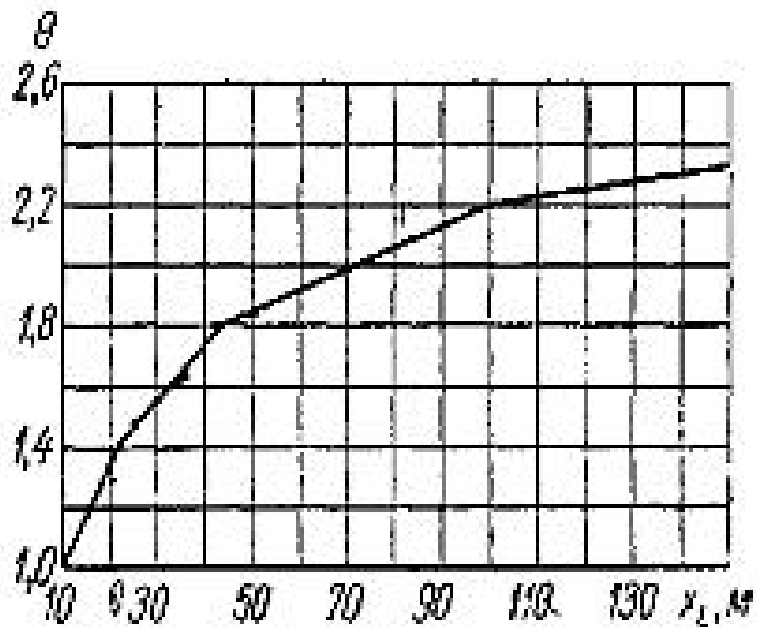


Рис. П10. График для определения поправочного коэффициента  $\theta$   
 На увеличение скоростного напора ветра для высот более 10 м

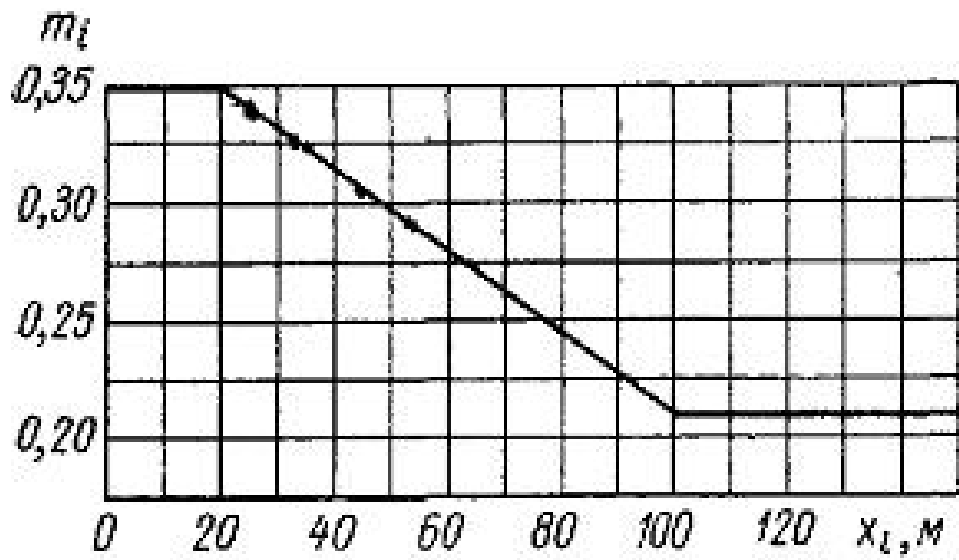


Рис. П11. График для определения коэффициента пульсации скоростного напора ветра  $m_i$

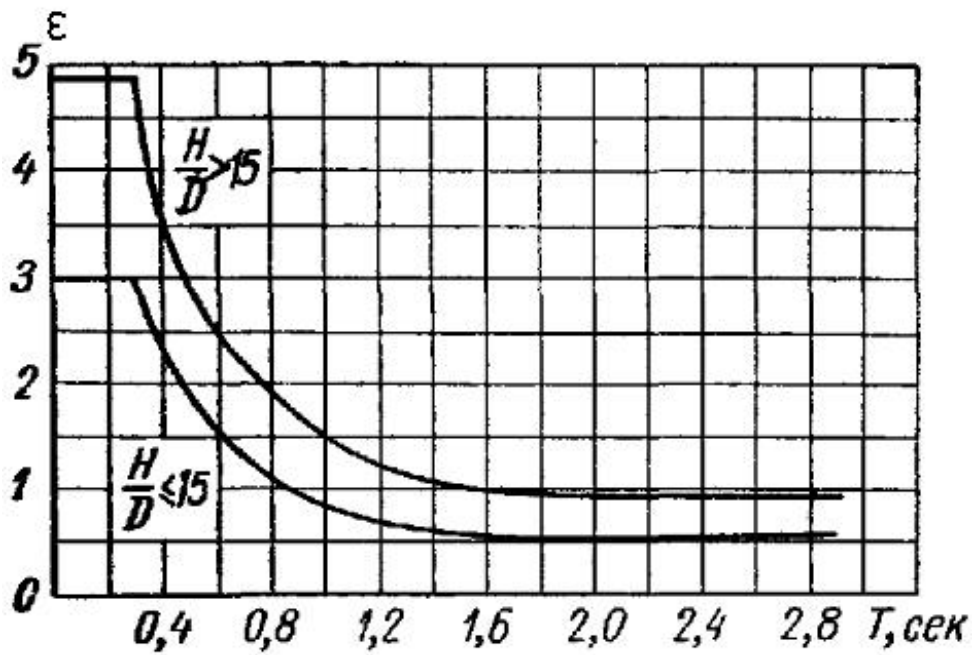


Рис. П12. Графики для определения коэффициента динамичности  $\epsilon$

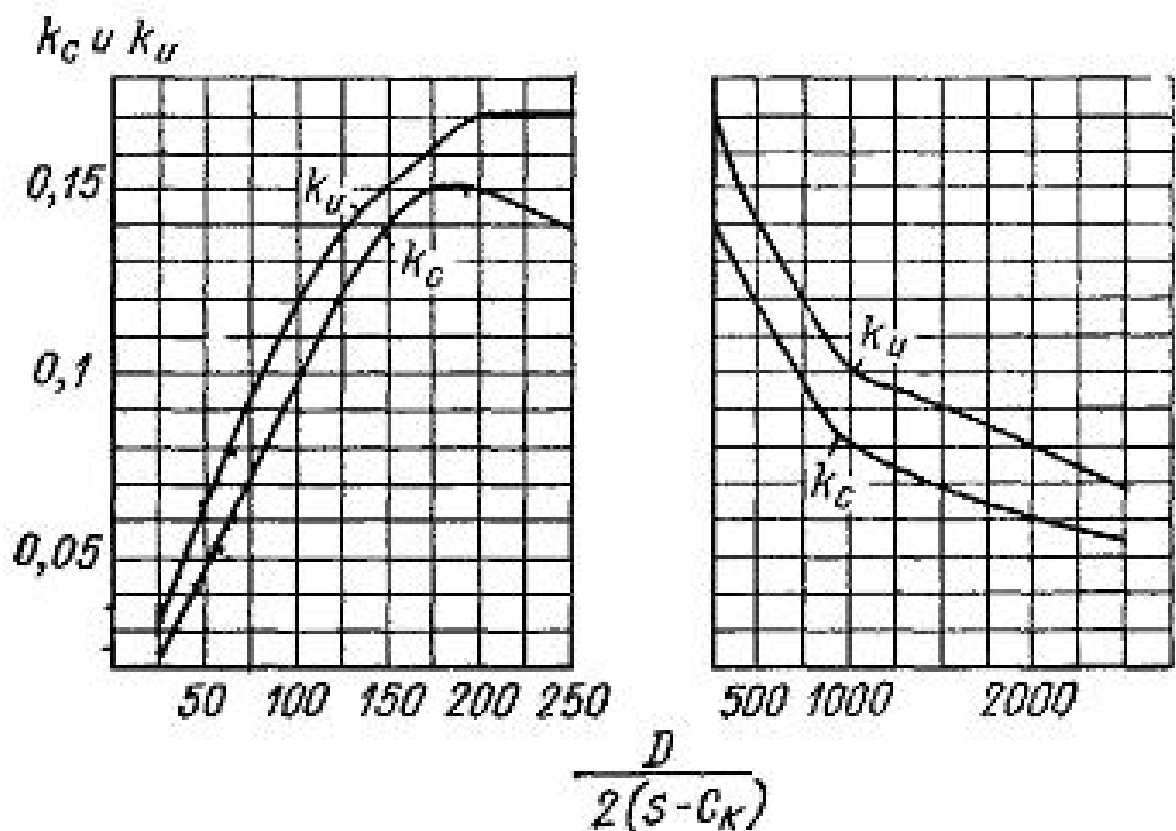


Рис. П13. Графики для определения коэффициента  $k_c$  и  $k_u$

## Глоссарий

**Агрегат** – совокупность сосудов и аппаратов, обеспечивающих одну технологическую операцию.

**Алгоритм расчета** – последовательность расчетных операций.

**Аппарат** - устройство для осуществления, преимущественно, химических, тепловых, массообменных процессов.

**Аппараты высокого давления** - класс технологического оборудования, функционирующего при давлении больше 10 МПа.

**Арматура** – устройство, обеспечивающее регулирование движения рабочей среды по трубопроводам.

**Блок-схема** – графическое изображение алгоритма расчета аппарата.

**Герметичность** – способность разъемных и неразъемных соединений аппарата обеспечивать плотность соединения, отсутствие утечек рабочей среды из внутренних полостей аппарата или подсоса воздуха внутрь аппарата. *(Обеспечение непроницаемости для газов и жидкостей поверхностей и мест соединения деталей. Герметизация поверхностей обеспечивается за счёт покрытия материалами непроницаемыми для газов и жидкостей. Места соединений герметизируются за счёт применения дополнительных деталей из упругого материала, или заполнения зазоров уплотняющим материалом – «Википедия»).*

**Гидроиспытания** – вид контрольных испытаний аппарата для проверки герметичности разъемных и неразъемных соединений при максимально возможных нагрузках (аппарат при этом заполняется водой).

**Горизонтальные аппараты** – класс технологического оборудования (емкости, реакторы), длина которых много больше диаметра.

**Госгортехнадзор** – государственный горнотехнический надзор – система мероприятий по обеспечению государственного контроля за соблюдением профилактических мер по технике безопасности и охране недр.

**Длительная прочность** – прочность материала, находящегося длительное время в напряженном состоянии при повышенной температуре.

**Жаропрочность** – способность металлических сплавов при высокой температуре выдерживать без разрушения механические нагрузки.

**Жесткость** – свойство конструкции или отдельных элементов сопротивляться деформации при действии рабочих нагрузок.

**Затвор** – внутреннее устройство аппарата высокого давления, обеспечивающее герметичность разъемного соединения.

**Износостойкость** – это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания. Износостойкость зависит от состава и структуры обрабатываемого материала, исходной твёрдости, шероховатости и технологии обработки детали, состояния ответной детали.

**Концентрация напряжений** - резкое увеличение напряжений, возникающее в местах изменения формы тела.

**Колонные аппараты** – класс технологического оборудования, имеющего высоту корпуса  $H$  больше 15 м и соотношение  $H/D$  больше 5.



**Компоновка** – взаимное расположение основных узлов и деталей аппарата в пространстве (*расположение, структуризация отдельных частей в целостном объекте – «Википедия»*).

**Люк** – технологическое отверстие в корпусе аппарата, обеспечивающее доступ к внутренним устройствам.

**Модуль упругости** – характеристика сопротивления материала упругой деформации.

**Момент инерции тела относительно оси** – геометрическая характеристика, являющаяся мерой инертности тела во вращательном движении вокруг этой оси.

**Момент сопротивления** – геометрическая характеристика поперечного сечения тела, показывающая сопротивляемость тела в рассматриваемом сечении изгибу или кручению.

**Насадка** – внутреннее устройство аппарата, обеспечивающее максимальный контакт между рабочими средами.

**Обечайка** – открытая оболочка вращения (цилиндрическая, коническая, сферическая, эллиптическая), используемая в изготовлении сварных сосудов.

**Оболочка** – пространственная конструкция, ограниченная двумя криволинейными поверхностями, расстояние между которыми мало по сравнению с остальными ее размерами. Оболочки бывают различной кривизны: положительной (Гаусовской) – сферические и эллиптические; отрицательной (гиперболической); нулевой – цилиндрические и конические.

**Опора** – конструктивный элемент, обеспечивающий прочное крепление аппарата к фундаменту или несущим конструкциям.

**Перепад** – разность уровней температур, давлений и других параметров.

**Пластическое течение** – деформирование под действием постоянно нарастающего напряжения от действия внешних нагрузок: давления, температурных воздействий и т.п.

**Пластическая деформация** – остаточная деформация без макроскопических нарушений сплошности материала, образующаяся в результате воздействия силовых факторов.

**Пневмоиспытания** – вид контрольных испытаний аппарата для проверки герметичности разъемных и неразъемных соединений при максимально возможных нагрузках (аппарат при этом заполняется воздухом).

**Предел длительной прочности** – условное напряжение, равное отношению нагрузки, при которой происходит разрушение образца через определенный промежуток времени, к первоначальной площади поперечного сечения образца.

**Предел ползучести** – наибольшее напряжение, при котором скорость или деформация ползучести за определенный промежуток времени не превышает значения, установленного техническими условиями.

**Предел прочности** – временное сопротивление – условное напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке образца, предшествующей его разрушению.

**Предел текучести** – напряжение, отвечающее нижнему положению площадки текучести в диаграмме растяжения.

**Предел упругости** – напряжение, при котором остаточные деформации впервые достигают некоторого значения, определенного техническими условиями.

**Проектирование** – последовательность операций для разработки конкретной конструкции аппарата с заданными характеристиками для осуществления какого-либо технологического процесса. *(Деятельность человека или организации по созданию проекта, то есть прототипа, прообраза предполагаемого или возможного объекта, состояния; комплекта документации, предназначенной для создания определённого объекта, его эксплуатации, ремонта и ликвидации, а также для проверки или воспроизведения промежуточных и конечных решений, на основе которых был разработан данный объект – «Википедия»).*

**Прочность** – свойство материала сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, возникающих под воздействием внешних сил. Свойство конструкции выполнять назначение, не разрушаясь в течение заданного времени. Различают прочность: теоретическую, техническую, конструкционную, динамическую, длительную.

**Работоспособность** – способность аппарата сохранять в течение всего срока эксплуатации свои технологические и прочностные параметры *(это состояние объекта, при котором он способен выполнять заданную функцию с параметрами, установленными требованиями технической документации – «Википедия»).*

**Расчетная нагрузка** – наибольшая нагрузка на аппарат, сосуд, конструкцию, определенная с учетом возможных отклонений от заданных условий или норм эксплуатации. Вычисляют путем умножения нормативных нагрузок на соответствующие коэффициенты, зависящие от вида нагрузки и параметров проектируемого объекта.

**Ребра и кольца жесткости** – элементы конструкции в виде тонких пластин или стандартных профилей, предназначенных для увеличения жесткости отдельных участков и царг путем повышения их сопротивления выпучиванию.

**Сопротивление срезу** – истинное касательное напряжение в момент окончательного разрушения путем среза.

**Сосуд** – герметически закрытая емкость, предназначенная для ведения химических, тепловых и других технологических процессов, а также для хранения и транспортировки газообразных, жидких и других веществ.

**Стандартизация** – приведение размеров основных конструктивных элементов аппарата к стандартному ряду размеров, зафиксированных в ГОСТах.

**Статическая нагрузка** – нагрузка, значение, направление и место приложения которой изменяется столь незначительно, что при расчетах конструкции ее принимают не зависящей от времени и поэтому пренебрегают влиянием сил инерции.

**Температурные напряжения** – напряжения, возникающие в твердом теле вследствие неравномерного распределения температуры в различных его частях или ограничения возможности теплового расширения тела. Могут вызывать пластические деформации и разрушения аппаратов, конструкций и машин.

**Унификация** – приведение многообразия узлов и деталей аппарата к минимальному перечню стандартных элементов (*приведение к единообразию, к единой форме или системе – «Википедия»*).

**Упругая деформация** – деформация, исчезающая после снятия вызвавшей ее нагрузки.

**Усталость металла** – изменение состояния металла в результате многократного (циклического) деформирования, приводящее к его прогрессирующему разрушению.

**Устойчивость** – свойство конструкции или отдельных элементов противостоять динамическим усилиям, старающимся вывести его из исходного состояния или динамического равновесия.

**Фланец** – конструктивный элемент, обеспечивающий герметичность разъемного соединения.

**Футеровка** – средство защиты поверхности аппарата от воздействия агрессивной среды и температуры.

**Штуцер** – конструктивный элемент, обеспечивающий присоединение к аппарату материальных трубопроводов, средств автоматизации, смотровых окон и т.п.

**Царга** – часть цилиндрического корпуса аппарата, присоединяемая к другим элементам с помощью сварки или через фланцевое соединение.

**Цикл напряжений** – совокупность изменений напряжения за один полный период при установившемся режиме нагружения изделия (сосуда, аппарата) или конструкции.

Учебное издание

Миронов Виктор Павлович  
Натареев Сергей Валентинович  
Постникова Ирина Викторовна

Расчет и проектирование машин и аппаратов химических производств

Алгоритмы и программы расчета

Учебное пособие

Редактор В.Л. Родичева

Подписано в печать 09.10.2015. Формат 60x84 1/16. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 10,46. Тираж 150 экз. Заказ

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический  
университет»

Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики и  
финансов ФГБОУ ВО «ИГХТУ»

153000, г. Иваново, Шереметевский пр.,7