ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСТ Р 52857.7— 2007**

# Сосуды и аппараты

# НОРМЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ

## Теплообменные аппараты

Издание официальное

gost.e-ecolog.ru

## Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»

**Сведения о стандарте**

1 РАЗРАБОТАН 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)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 260 «Оборудование химическое и нефтегазоперерабатывающее»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2007 г. № 503-ст

4 В настоящем стандарте учтены основные нормативные положения следующих международных и европейских стандартов: Директивы 97/23 ЕС Европейского Парламента и Совета от 29 мая 1997 г. по сближению законодательств государств-членов, касающейся оборудования, работающего под давлением; ЕН 13445-3:2002 «Сосуды, работающие под давлением. Часть 3. Расчет» (EN 13445-3:2002 «Unfired pressure vessel — Part 3: Design»)

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячно издаваемых информационных указателях «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет*

© Стандартинформ, 2008

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

## Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Обозначения . . . 2
4 Общие положения . . . 7
5 Расчет элементов кожухотрубчатых теплообменных аппаратов . . . 8
6 Расчет элементов аппаратов воздушного охлаждения . . . 21
Приложение А (обязательное) Определение коэффициентов изменения жесткости $K_q^*$ и $K_p^*$ для аппаратов с компенсатором на кожухе, расширителем на кожухе и компенсатором на расширителе . . . 28
Приложение Б (обязательное) Коэффициенты влияния перфорации на параметры трубной решетки . . 35
Приложение В (обязательное) Определение коэффициентов системы кожух — решетка, обечайка — фланец камеры и коэффициента жесткости фланцевого соединения при изгибе . . . 36
Приложение Г (обязательное) Коэффициенты $T_1$, $T_2$, $T_3$, $A$ и $B$, используемые в формулах для определения сил и моментов в элементах кожухотрубчатых теплообменных аппаратов . . . 37
Приложение Д (обязательное) Определение допускаемой амплитуды условных упругих напряжений при работе материала в условиях ползучести . . . 39
Приложение Е (справочное) Допускаемая нагрузка на вальцовочное соединение трубы с решеткой . . 40
Приложение Ж (обязательное) Определение вспомогательных величин для расчета аппаратов воздушного охлаждения . . . 41
Приложение И (обязательное) Коэффициенты податливости элементов аппаратов воздушного охлаждения . . . 43
Приложение К (справочное) Расчетные зависимости для определения величин, приведенных в таблицах и на графиках . . . 45

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Сосуды и аппараты**

# НОРМЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ

**Теплообменные аппараты**

Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation.
Heat-exchangers

**Дата введения — 2008—04—01**

## 1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает нормы и методы расчета на прочность элементов кожухотрубчатых теплообменных аппаратов и аппаратов воздушного охлаждения, применяемых в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и смежных отраслях промышленности, работающих в условиях однократных и многократных нагрузок под внутренним избыточным давлением, вакуумом или наружным давлением. Нормы и методы расчета на прочность применимы, если отклонение от геометрической формы и неточности изготовления рассчитываемых элементов сосудов не превышают допусков, установленных нормативными документами. Настоящий стандарт применяется совместно с ГОСТ Р 52857.1.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

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

ГОСТ Р 52857.3—2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлении. 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

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим ежемесячно издаваемым информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться заменяющим (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

**Издание официальное**

## 3 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

$A$ — коэффициент для определения максимального изгибающего момента в перфорированной части трубной решетки;

$A_B$ — суммарная площадь сечения болтов (шпилек) по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра, мм$^2$;

$A_{ком}$ — коэффициент формы компенсатора;

$A_{р1}$, $A_{р2}$ — вспомогательные коэффициенты, используемые при расчете теплообменных аппаратов с расширителем на кожухе;

$A_y$ — коэффициент для определения максимального прогиба трубы, мм;

$a$ — внутренний радиус кожуха, мм;

$a_n$ — расстояние от оси пучка до оси наиболее удаленной трубы, мм;

$a_1$ — расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы, мм;

$B$ — коэффициент для определения максимального изгибающего момента в перфорированной части трубной решетки;

$B_п$ — ширина канавки под прокладку в многоходовом аппарате, мм;

$B_{пер}$ — ширина перегородки в трубном пространстве, мм;

$B_{р1}$, $B_{р2}$ — вспомогательные коэффициенты, используемые при расчете теплообменных аппаратов с расширителем на кожухе;

$B_0$ — внутренний размер камеры аппарата воздушного охлаждения в поперечном направлении, мм;

$B_1$ — ширина зоны решетки камеры аппарата воздушного охлаждения, в пределах которой толщина решетки равна $s_1$, мм;

$B_2$ — наружный размер прокладки в поперечном направлении для камеры аппарата воздушного охлаждения по рисункам 15—18, мм;

$B_3$ — расстояние между осями болтов (шпилек) в поперечном направлении для камеры аппарата воздушного охлаждения по рисункам 15—18, мм;

$B_4$ — наружный размер в поперечном направлении для камеры аппарата воздушного охлаждения по рисункам 15—18, мм;

$B_р$ — расчетный поперечный размер решетки камеры аппарата воздушного охлаждения, мм;

$B_T$ — расчетная ширина перфорированной зоны решетки камеры аппарата воздушного охлаждения, мм;

$b_i$ — ширина промежуточных пролетов камер (см. рисунки 23, 24), мм;

$b_п$ — ширина плоской прокладки, мм;

$b_0$ — эффективная ширина прокладки, мм;

$b_1$ — ширина тарелки фланца кожуха, мм;

$b_2$ — ширина тарелки фланца камеры, мм;

$C_f$ — параметр компенсатора;

$c$ — расчетная прибавка к толщине трубной решетки, крышке плавающей головки, элементам аппаратов воздушного охлаждения, мм. При назначении величины «$c$» для трубной решетки и крышки плавающей головки следует учитывать коррозию как со стороны трубного, так и межтрубного пространства;

$c_к$ — расчетная прибавка к толщине стенки кожуха, мм;

$c_п$ — расчетная прибавка к толщине перегородки теплообменного аппарата или аппарата воздушного охлаждения, мм. При назначении величины «$c_п$» следует учитывать, что перегородка подвергается двусторонней коррозии;

$c_р$ — глубина канавки под прокладку под пробку в задней стенке неразъемной камеры, мм;

$D$ — внутренний диаметр кожуха или плавающей головки, мм;

$D_B$ — наименьший диаметр утоненной части решетки, мм;

$D_E$ — диаметр окружности, вписанной в максимальную беструбную площадь, мм;

$D_{ком}$ — наружный диаметр компенсатора, мм;

$D_н$ — наружный диаметр фланца, мм;

$D_р$ — диаметр сечения полукольца плавающей головки, имеющего наименьшую толщину, мм;

$D_{с.п}$ — средний диаметр прокладки, мм;

$D_1$ — внутренний диаметр расширителя, мм;

$d_E$ — эффективный диаметр отверстия в трубной решетке или задней стенке, мм;

$d_{ком}$ — внутренний диаметр компенсатора, мм;
$d_{пi}$ — размер отверстий в $i$-й перегородке, мм;
$d_{пр}$ — диаметр резьбы пробок в задних стенках камер аппаратов воздушного охлаждения, мм;
$d_т$ — наружный диаметр трубы, мм;
$d_о$ — диаметр отверстия в решетке, мм;
$E$ — модуль продольной упругости материала крышки камеры аппарата воздушного охлаждения, МПа;
$E_р$ — модуль продольной упругости материала решетки, МПа;
$E_{р1}$ — модуль продольной упругости материала 1-й решетки, если модули упругости двух трубных решеток отличаются друг от друга, МПа;
$E_{р2}$ — модуль продольной упругости материала 2-й решетки, если модули упругости двух трубных решеток отличаются друг от друга, МПа;
$E_D$ — модуль продольной упругости материала камеры, МПа;
$E_к$ — модуль продольной упругости материала кожуха, МПа;
$E_{ком}$ — модуль продольной упругости материала компенсатора, МПа;
$E_п$ — модуль продольной упругости материала прокладки, МПа;
$E_т$ — модуль продольной упругости материала труб, МПа;
$E_1$ — модуль продольной упругости материала фланца кожуха, МПа;
$E_2$ — модуль продольной упругости материала фланца камеры, МПа;
$F$ — суммарная осевая сила, действующая на кожух, Н;
$F_п$ — усилие на прокладке плавающей головки, Н;
$F_B$ — усилие в болтах (шпильках) камеры аппарата воздушного охлаждения в условиях эксплуатации, Н;
$F_0$ — усилие в болтах (шпильках) камеры аппарата воздушного охлаждения в условиях испытания или монтажа, Н;
$F_1$ — усилие от болтовой нагрузки на единицу длины решетки или крышки камеры аппарата воздушного охлаждения, Н/мм;
$f_п$ — коэффициент, зависящий от соотношения сторон перегородки по трубному пространству;
$f_0$ — коэффициент, зависящий от соотношения сторон перфорированной зоны решетки аппарата воздушного охлаждения;
$f_1$ — коэффициент, зависящий от соотношения сторон крышки аппарата воздушного охлаждения;
$f_2$ — коэффициент, зависящий от соотношения сторон крышки аппарата воздушного охлаждения;
$f_3$ — коэффициент, зависящий от соотношения сторон задней стенки камеры аппарата воздушного охлаждения;
$f_4$ — коэффициент, зависящий от соотношения сторон боковой стенки камеры аппарата воздушного охлаждения;
$H$ — глубина крышки камеры аппарата воздушного охлаждения (см. рисунки 15—18), мм;
$h$ — выступающая часть отбортовки эллиптического днища плавающей головки, мм;
$h_п$ — толщина прокладки, мм;
$h_1$ — толщина тарелки фланца кожуха, мм;
$h_2$ — толщина тарелки фланца камеры, мм;
$i$ — число труб;
$K_{ком}$ — жесткость компенсатора, Н/мм;
$K_q$ — коэффициент изменения жесткости системы трубы — кожух при действии осевой силы;
$K_q^*$ — отношение осевого перемещения компенсатора или расширителя при действии растягивающей силы к осевому перемещению краев корпуса межтрубного пространства без компенсатора и расширителя от действия той же силы;
$K_p$ — коэффициент изменения жесткости системы трубы — кожух при действии давления;
$K_p^*$ — отношение осевого перемещения компенсатора или расширителя при действии давления к осевому перемещению краев корпуса межтрубного пространства без компенсатора и расширителя от действия того же давления;
$K_{рас}$ — жесткость расширителя, Н/мм;
$K_y$ — модуль упругости основания (системы труб), Н/мм$^3$;
$K_\varphi$ — эффективный коэффициент концентрации напряжения;
$K_Ф$ — коэффициент жесткости фланцевого соединения при изгибе, Н · мм;
$K_{Ф1}$ — коэффициент жесткости фланца кожуха при изгибе, Н · мм;

$K_{ф2}$ — коэффициент жесткости фланца камеры при изгибе, Н · мм;
$K_1$ — коэффициент жесткости втулки фланца кожуха при изгибе, Н · мм;
$K_2$ — коэффициент жесткости втулки фланца камеры при изгибе, Н · мм;
$K_т$ — коэффициент условий работы при расчете труб на устойчивость;
$L_{рас}$ — длина расширителя, мм;
$L_р$ — расчетный размер решетки аппарата воздушного охлаждения в продольном направлении, мм;
$L_{пер}$ — длина перегородки в трубном пространстве, мм;
$L_0$ — внутренний размер камеры аппарата воздушного охлаждения в продольном направлении, мм;
$L_2$ — наружный размер прокладки в продольном направлении для камеры аппарата воздушного охлаждения по рисункам 15—18, мм;
$l$ — половина длины трубы теплообменного аппарата или аппарата воздушного охлаждения, мм;
$l_{пр}$ — приведенная длина трубы, используемая при расчете прогиба труб и изгибающего момента, действующего на трубу, мм;
$l_в$ — глубина развальцовки труб, мм;
$l_n$ — расстояние от решетки до перегородки, мм;
$l_{ni}$ — расстояние между отверстиями в $i$-й перегородке, мм;
$l_R$ — расчетная длина труб при продольном изгибе, мм;
$l_1$ — плечо изгибающего момента, действующего на решетку аппарата воздушного охлаждения, мм;
$l_2$ — плечо изгибающего момента, действующего на фланец крышки аппарата воздушного охлаждения, мм;
$l_{1R}$ — максимальный пролет трубы между решеткой и перегородкой, мм;
$l_{2R}$ — максимальный пролет трубы между перегородками, мм;
$M_{max}$ — максимальный изгибающий момент в перфорированной части трубной решетки, Н · мм/мм;
$M$ — расчетный изгибающий момент, действующий на крышку плавающей головки, Н · мм;
$M_a$ — изгибающий момент, распределенный по периметру перфорированной части трубной решетки, Н · мм/мм;
$M_к$ — изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха, Н · мм/мм;
$M_n$ — изгибающий момент, распределенный по периметру трубной решетки, Н · мм/мм;
$M_т$ — изгибающий момент, действующий на трубу, Н · мм;
$[M]$ — допускаемый изгибающий момент для фланца крышки плавающей головки, Н · мм;
$[M]_{кр}$ — допускаемый изгибающий момент для днища крышки плавающей головки, Н мм;
$m$ — прокладочный коэффициент;
$m_A$ — коэффициент для определения максимального изгибающего момента в перфорированной части трубной решетки;
$m_{ср}$ — коэффициент влияния давления на продольную деформацию труб;
$m_n$ — относительная характеристика беструбного края трубной решетки;
$m_1$ — коэффициент влияния давления на изгиб 1-го фланца, мм²;
$m_2$ — коэффициент влияния давления на изгиб 2-го фланца, мм²;
$J_т$ — момент инерции поперечного сечения трубы, мм⁴;
$N$ — количество циклов нагружения за расчетный срок службы (если количество циклов не оговорено, рекомендуется принимать $N = 2000$);
$N_т$ — осевая сила, действующая на трубу, Н;
$[N]_{тр}$ — допускаемая нагрузка на соединение трубы с решеткой способом развальцовки, Н;
$n_{ком}$ — число линз (волн) компенсатора;
$n_B$ — коэффициент для определения максимального изгибающего момента в перфорированной части трубной решетки;
$p$ — расчетное давление в камере аппарата воздушного охлаждения, МПа;
$p_{пр}$ — пробное давление при испытании в камере аппарата воздушного охлаждения, МПа;
$p_м$ — расчетное давление в межтрубном пространстве, МПа;
$p_т$ — расчетное давление в трубном пространстве, МПа;
$p_р$ — расчетное давление, действующее на решетку кожухотрубчатого теплообменного аппарата, МПа. Принимается равным максимально возможному перепаду давлений, действующих на решетку;
$p_0$ — приведенное давление на решетку, МПа;
$p_1$ — приведенное давление на фланцы, МПа;
$[p_1]$ — допускаемое избыточное давление из условий прочности краевой зоны сферического неотбортованного днища, МПа;

$P_б$ — усилие в шпильках плавающей головки, Н;

$P_б^м$ — усилие в шпильках плавающей головки в условиях монтажа, Н;

$P_б^р$ — усилие в шпильках плавающей головки в рабочих условиях, Н;

$Q_д$ — перерезывающая сила, распределенная по периметру перфорированной зоны решетки, Н/мм;

$Q_д$ — равнодействующая давления, действующего на крышку плавающей головки, Н;

$Q_к$ — усилие, распределенное по периметру кожуха, Н/мм;

$Q_п$ — перерезывающая сила, распределенная по краю трубной решетки, Н/мм;

$[q]$ — допускаемая нагрузка на единицу площади сечения трубного пучка из условия прочности труб, МПа;

$[q]_s$ — допускаемая нагрузка на единицу площади сечения трубного пучка из условия прочности крепления трубы в решетке, МПа;

$R$ — радиус гиба в углу крышки камеры аппарата воздушного охлаждения (см. рисунки 16—18);

$R_1$ — радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха, мм;

$R_2$ — радиус центра тяжести тарелки фланца камеры, мм;

$r_{ком}$ — радиус гиба при вершине волны компенсатора, мм;

$s_к$ — толщина стенки кожуха, мм;

$s_л$ — толщина трубной решетки в сечении канавки, мм;

$s_э$ — эквивалентная толщина втулки фланца, мм;

$s_р$ — толщина трубной решетки, мм;

$s_{1р}$ — толщина 1-й решетки, если две трубные решетки отличаются друг от друга, мм;

$s_{2р}$ — толщина 2-й решетки, если две трубные решетки отличаются друг от друга, мм;

$s_{рг}$ — толщина трубной решетки в месте уплотнения под кольцевую прокладку, мм;

$s_р^р$ — расчетная толщина трубной решетки, мм;

$s_т$ — толщина стенки трубы, мм;

$s_1$ — толщина стенки кожуха в месте соединения с трубной решеткой или с фланцем, мм;

$s_2$ — толщина стенки камеры в месте соединения с трубной решеткой или с фланцем, мм;

$s_{1р}$ — толщина решетки в зоне кольцевой канавки, мм;

$s_{пер}$ — толщина перегородки по трубному пространству, мм;

$s_{1пл}$ — толщина донышка плавающей головки, мм;

$s_{1А}$ — толщина трубной решетки камеры аппарата воздушного охлаждения в пределах зоны перфорации, мм;

$s_{2А}$ — толщина трубной решетки камеры аппарата воздушного охлаждения в месте уплотнения, мм;

$s_{3А}$ — толщина трубной решетки камеры аппарата воздушного охлаждения вне зоны уплотнения, мм;

$s_{4А}$ — толщина донышка крышки для камер по рисункам 15—18, толщина задней стенки для камер по рисункам 19—23, мм;

$s_{5А}$ — толщина стенки крышки в месте присоединения к фланцу — для камер по рисункам 15—17, толщина верхней и нижней стенок — для камер по рисункам 20—23, мм. Для камер по рисункам 18—19: $s_{5А} = s_{4А}$;

$s_{6А}$ — толщина фланца крышки камеры аппарата воздушного охлаждения, мм;

$s_{7А}$ — толщина боковой стенки камеры аппарата воздушного охлаждения, мм;

$s_{пi}$ — толщина $i$-й перегородки камеры аппарата воздушного охлаждения, мм;

$T$ — общая толщина полукольца, мм;

$T_ш$ — ширина шипа, мм;

$T_1$, $T_2$, $T_3$ — коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края и поддерживающие влияние труб;

$t$ — безразмерный параметр;

$t_1$ — шаг расположения отверстий в решетке аппарата воздушного охлаждения в продольном направлении, мм;

$t_2$ — шаг расположения отверстий в решетке аппарата воздушного охлаждения в поперечном направлении, мм;

$t_п$ — расстояние между осями рядов отверстий, расположенных с двух сторон от паза, мм;

$t_р$ — шаг расположения отверстий в решетке, мм;

$t_к$ — средняя температура стенки кожуха, °С;

$t_т$ — средняя температура стенок труб, °С;

$t_0$ — температура сборки аппарата, °С ($t_0 \approx 20$ °С);
$W$ — максимальный прогиб трубной решетки, мм;
$[W]$ — допустимый прогиб трубной решетки, мм;
$Y$ — прогиб трубы, мм;
$X_{ком}$, $Y_{ком}$ — безразмерные параметры формы волны компенсатора;
$y_к^p$ — угловая податливость крышки от действия внутреннего давления, 1/Н · мм²;
$y_к^M$ — угловая податливость крышки от действия болтового изгибающего момента, 1/Н · мм;
$y_р^p$ — угловая податливость решетки от действия внутреннего давления, 1/Н · мм²;
$y_р^M$ — угловая податливость решетки от действия болтового изгибающего момента, 1/Н · мм;
$y_б$ — линейная податливость шпилек (болтов), мм/Н;
$y_п$ — линейная податливость прокладки, мм/Н;
$y_ф$ — угловая податливость фланца (полукольца) плавающей головки, 1/Н · мм;
$z$ — число рядов труб в поперечном направлении;
$\alpha$ — коэффициент жесткости фланцевого соединения плавающей головки при нагружении внутренним давлением;
$\alpha_к$ — коэффициент линейного расширения материала кожуха при температуре $t_к$, 1/°С;
$\alpha_т$ — коэффициент линейного расширения материала труб при температуре $t_т$, 1/°С;
$\beta$ — коэффициент системы решетка — трубы, 1/мм;
$\beta_0$ — угол наклона стенки расширителя (см. рис. 6) ... °;
$\beta_1$ — коэффициент системы кожух — решетка, 1/мм;
$\beta_2$ — коэффициент системы обечайка — фланец камеры, 1/мм;
$\beta_Y$ — расчетный коэффициент, зависящий от соотношения размеров фланца крышки плавающей головки;
$\beta_{ком}$ — отношение внутреннего диаметра компенсатора к наружному диаметру;
$\beta_р$ — отношение диаметра кожуха к диаметру расширителя;
$\beta_п$ — коэффициент формы днища крышки плавающей головки;
$\gamma$ — жесткость фланцевого соединения плавающей головки, Н/мм;
$\delta$ — высота сварного шва в месте приварки трубы к решетке, мм;
$\delta_{ком}$ — толщина стенки компенсатора, мм;
$\delta_р$ — толщина стенки расширителя, мм;
$\Delta\sigma_1$ — размах первых главных напряжений, МПа;
$\Delta\sigma_2$ — размах вторых главных напряжений, МПа;
$\Delta\sigma_3$ — размах третьих главных напряжений, МПа;
$\Delta p$ — перепад давлений между ходами по трубному пространству, МПа;
$\eta$ — относительная характеристика площади решетки аппарата воздушного охлаждения;
$\eta_м$, $\eta_т$ — коэффициенты влияния давления на трубную решетку со стороны межтрубного и трубного пространства;
$\eta_р$ — коэффициент податливости фланцевого соединения крышки и решетки аппарата воздушного охлаждения;
$\Lambda_{кр}$ — безразмерная характеристика нагружения крышки аппарата воздушного охлаждения болтовым изгибающим моментом;
$\Lambda_р$ — безразмерная характеристика нагружения решетки аппарата воздушного охлаждения болтовым изгибающим моментом;
$\lambda$ — параметр, используемый при расчете на продольный изгиб;
$\lambda_р$ — относительная ширина беструбного края решетки аппарата воздушного охлаждения;
$\lambda_у$ — параметр, используемый при расчете прогиба трубы;
$\rho$ — приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха;
$\rho_1$ — приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения;
$\sigma_{р1}$ — изгибные напряжения в трубной решетке в месте соединения с кожухом, МПа;
$\sigma_{р2}$ — изгибные напряжения в перфорированной части трубной решетки, МПа;
$\sigma_{Мх}$ — мембранные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в меридиональном направлении, МПа;
$\sigma_{их}$ — изгибные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в меридиональном направлении, МПа;

$\sigma_{M\varphi}$ — мембранные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в окружном направлении, МПа;
$\sigma_{u\varphi}$ — изгибные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке в окружном направлении, МПа;
$\sigma_1$ — суммарные напряжения в трубах в осевом направлении, МПа;
$\sigma_{1T}$ — мембранные напряжения в трубах в осевом направлении, МПа;
$\sigma_{2T}$ — мембранные напряжения в трубах в окружном направлении, МПа;
$[\sigma]$ — допускаемое напряжение для материала камеры аппарата воздушного охлаждения, МПа;
$[\sigma_A]$ — допускаемая амплитуда упругих напряжений, МПа;
$[\sigma]_к$ — допускаемое напряжение для материала кожуха теплообменного аппарата или крышки аппарата воздушного охлаждения, МПа;
$[\sigma]_р$ — допускаемое напряжение для материала решетки теплообменного аппарата или аппарата воздушного охлаждения, МПа;
$[\sigma]_п$ — допускаемое напряжение для материала перегородки, МПа;
$[\sigma]_т$ — допускаемое напряжение для материала труб, МПа;
$[\sigma]_f$ — допускаемое напряжение для фланца крышки плавающей головки, МПа;
$[\sigma]_t$ — допускаемое напряжение для днища крышки плавающей головки, МПа;
$[\sigma]_B^{20}$ — допускаемое напряжение для болтов (шпилек) при затяжке, МПа;
$[\sigma]_B^t$ — допускаемое напряжение для болтов (шпилек) в рабочих условиях, МПа;
$\tau_{p1}$ — касательные напряжения в трубной решетке в месте соединения с кожухом, МПа;
$\tau_{p2}$ — касательные напряжения в перфорированной части трубной решетки, МПа;
$\tau$ — напряжения среза в шве приварки трубы к решетке, МПа;
$\upsilon$ — относительная характеристика площади сечения трубы аппарата воздушного охлаждения;
$\Phi_1$, $\Phi_2$, $\Phi_3$ — коэффициенты, учитывающие поддерживающее влияние труб;
$\varphi$ — коэффициент прочности сварного шва;
$\varphi_1$– $\varphi_6$ — коэффициенты формы крышек камер аппаратов воздушного охлаждения (см. рисунки 15—18);
$\varphi_c$ — коэффициент прочности шва приварки трубы к решетке;
$\varphi_p$ — коэффициент ослабления решеток кожухотрубчатых теплообменных аппаратов с неподвижными трубными решетками и компенсатором на кожухе;
$\varphi_E$ — эффективный коэффициент ослабления решеток кожухотрубчатых теплообменных аппаратов с плавающей головкой и *U*-образными трубами и решетки и задней стенки камер аппаратов воздушного охлаждения;
$\varphi_7$ — коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе;
$\chi_{кр}$, $\chi_c$ — коэффициент сопротивления фланцевой части крышки аппарата воздушного охлаждения;
$\Psi_{кр}$ — безразмерная характеристика нагружения крышки аппарата воздушного охлаждения давлением, действующим на ее фланцевую часть;
$\Psi_p$ — безразмерная характеристика нагружения решетки аппарата воздушного охлаждения давлением, действующим на бесструбную зону;
$\psi$ — угол между касательной к сферическому сегменту в краевой зоне днища крышки плавающей головки и вертикальной осью, град.;
$\psi_0$ — коэффициент жесткости перфорированной плиты;
$\Omega$ — коэффициент несущей способности трубного пучка аппарата воздушного охлаждения;
$\omega$ — безразмерный параметр системы решетка — трубы.

## 4 Общие положения

В настоящем стандарте рассмотрены следующие конструкции кожухотрубчатых теплообменных аппаратов: с неподвижными трубными решетками, компенсатором на кожухе, аппараты с плавающей головкой, U-образными трубами, а также аппараты воздушного охлаждения с камерами разъемной и неразъемной конструкции.

Стандарт позволяет определять допускаемые нагрузки при поверочном расчете и исполнительные размеры элементов аппаратов при проектировании.

## 5 Расчет элементов кожухотрубчатых теплообменных аппаратов

### 5.1 Расчетные схемы

Основные типы кожухотрубчатых теплообменных аппаратов приведены на рисунках 1—6.

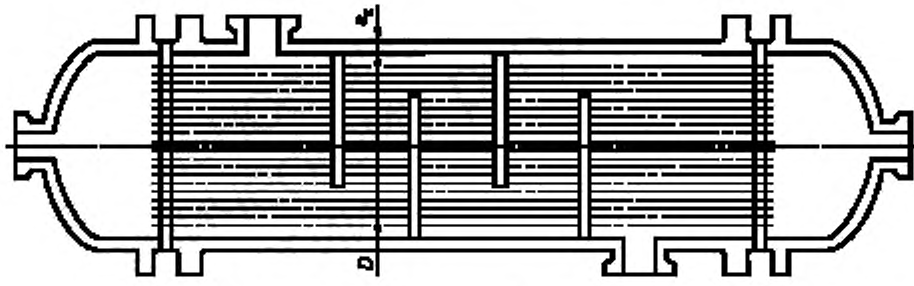


Рисунок 1 — Аппарат с неподвижными трубными решетками

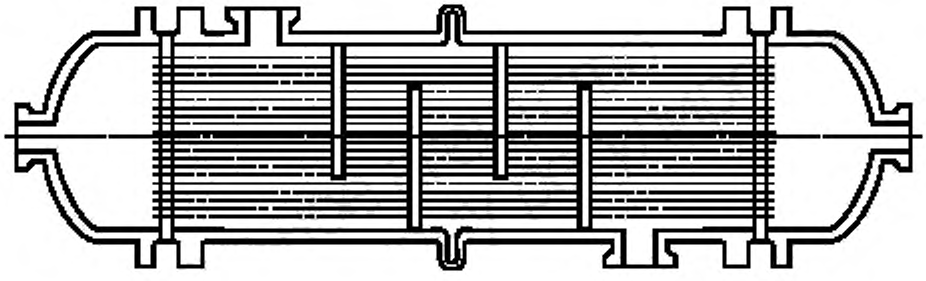


Рисунок 2 — Аппарат с компенсатором на кожухе

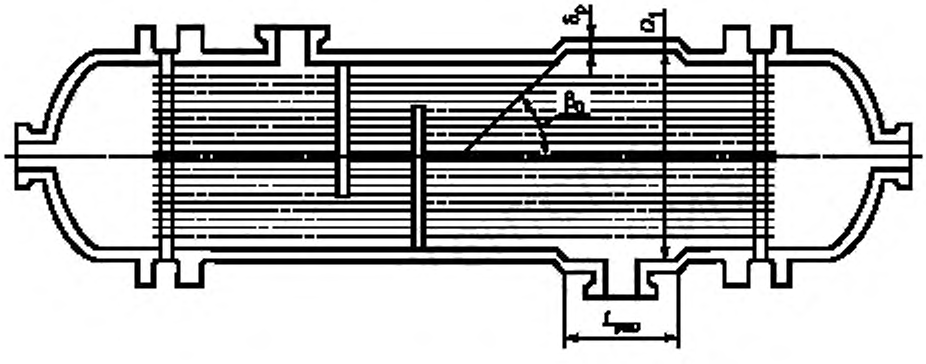


Рисунок 3 — Аппарат с расширителем на кожухе

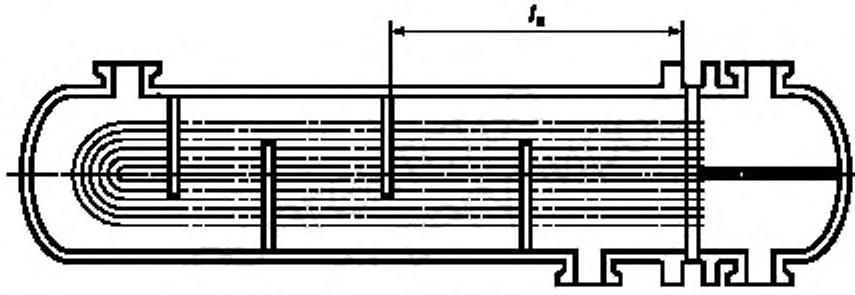


Рисунок 4 — Аппарат с U-образными трубами

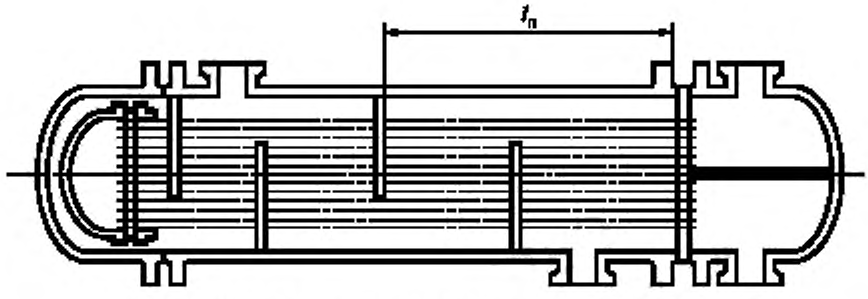


Рисунок 5 — Аппарат с плавающей головкой

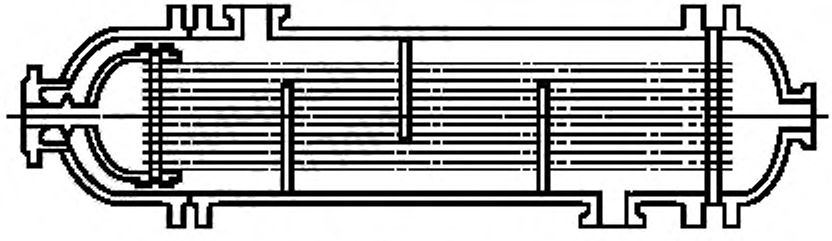


Рисунок 6 — Аппарат с компенсатором на плавающей головке

**5.2 Теплообменные аппараты с неподвижными трубными решетками, компенсатором или расширителем на кожухе**

Толщины трубных решеток теплообменных аппаратов с неподвижными трубными решетками, компенсатором или расширителем на кожухе назначаются конструктивно с последующей проверкой по формулам настоящего раздела стандарта.

**5.2.1 Вспомогательные величины**

5.2.1.1 Относительную характеристику беструбного края трубной решетки вычисляют по формуле

$$m_n = \frac{a}{a_1}, \qquad (1)$$

5.2.1.2 Коэффициенты влияния давления на трубную решетку вычисляют по формулам:

- со стороны межтрубного пространства:

$$\eta_м = 1 - \frac{i d_1^2}{4 a_1^2}; \qquad (2)$$

- со стороны трубного пространства:

$$\eta_т = 1 - \frac{i(d_т - 2s_т)^2}{4a_1^2}. \quad (3)$$

5.2.1.3 Основные характеристики жесткости элементов теплообменного аппарата.

Модуль упругости основания (системы труб) вычисляют по формуле

$$K_y = \frac{E_т(\eta_т - \eta_м)}{l}. \quad (4)$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха вычисляют по формуле

$$\rho = \frac{K_y a_1 l}{E_к s_к}. \quad (5)$$

Коэффициенты изменения жесткости системы трубы — кожух вычисляют по формулам:

$$K_q = 1 + K_q^*; \quad (6)$$

$$K_p = 1 + K_p^*. \quad (7)$$

Для аппаратов с неподвижными трубными решетками $K_p^* = K_q^* = 0$.

Для аппаратов с компенсатором на кожухе, расширителем на кожухе и компенсатором на расширителе $K_q^*$ и $K_p^*$ определяют по приложению А.

Коэффициент системы решетка — трубы вычисляют по формуле

$$\beta = \frac{1{,}82}{s_р}\sqrt[4]{\frac{K_y s_р}{\psi_0 E_р}}. \quad (8)$$

Для теплообменных аппаратов с двумя отличающимися друг от друга по толщине или модулю упругости решетками коэффициент $\beta$ вычисляют по формуле

$$\beta = 1{,}53\sqrt[4]{\frac{K_y}{\psi_0}\left(\frac{1}{E_{р1}s_{р1}^3} + \frac{1}{E_{р2}s_{р2}^3}\right)}. \quad (9)$$

Безразмерный параметр системы решетка — трубы вычисляют по формуле

$$\omega = \beta a_1. \quad (10)$$

Коэффициенты ослабления трубной решетки $\varphi_р$, $\varphi_E$, жесткости перфорированной плиты $\psi_0$, а также коэффициенты системы кожух — решетка $\beta_1$, обечайка — фланец камеры $\beta_2$ и коэффициенты жесткости фланцевого соединения при изгибе $K_ф$ приведены в приложениях Б—Е.

**5.2.2 Определение усилий в элементах теплообменного аппарата**

5.2.2.1 Приведенное давление $p_0$ вычисляют по формуле

$$p_0 = [\alpha_к(t_к - t_0) - \alpha_т(t_т - t_0)]K_y l + [\eta_т - 1 + m_{ср} + m_л(m_л + 0{,}5\rho K_q)]p_т -$$

$$- [\eta_м - 1 + m_{ср} + m_л(m_о + 0{,}3\rho K_p)]p_м, \quad (11)$$

где $m_{ср}$ — коэффициент влияния давления на продольную деформацию труб:

$$m_{ср} = 0{,}15\frac{i(d_т - s_т)^2}{a_1^2}. \quad (12)$$

5.2.2.2 Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения вычисляют по формуле

$$\rho_1 = \frac{K_y a a_1}{\beta^2 K_\Phi R_1}. \quad (13)$$

5.2.2.3 Коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края и поддерживающие влияние труб $\Phi_1$, $\Phi_2$, $\Phi_3$, определяют по таблице 1.

Таблица 1 — Коэффициенты $\Phi_1$, $\Phi_2$, $\Phi_3$

| $\omega$ | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Phi_1$ | 2 | 2,0 | 2,06 | 2,28 | 2,79 | 3,58 | 4,5 | 5,39 |
| $\Phi_2$ | 0 | 0,02 | 0,19 | 0,62 | 1,32 | 2,16 | 2,94 | 3,59 |
| $\Phi_3$ | 0 | 0,19 | 0,76 | 1,65 | 2,75 | 3,76 | 4,65 | 5,36 |

*Окончание таблицы 1*

| $\omega$ | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | > 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Phi_1$ | 6,19 | 7,65 | 9,08 | 10,51 | 11,94 | 13,36 | 14,78 | $\sqrt{2\omega}$ |
| $\Phi_2$ | 4,13 | 5,13 | 6,15 | 7,17 | 8,19 | 9,2 | 10,21 | $\omega$ |
| $\Phi_3$ | 6,03 | 7,38 | 8,81 | 10,24 | 11,66 | 13,08 | 14,5 | $\sqrt{2\omega}$ |

5.2.2.4 Значения $T_1$, $T_2$, $T_3$ определяют по приложению Ж в зависимости от $\omega$ и $m_n$ или вычисляют по формулам:

$$T_1 = \Phi_1\left[m_n + 0{,}5(1 + m_n t)(t-1)\right]; \quad (14)$$

$$T_2 = \Phi_2 t; \quad (15)$$

$$T_3 = \Phi_3 m_n, \quad (16)$$

где

$$t = 1 + 1{,}4\omega\,(m_n - 1). \quad (17)$$

5.2.2.5 Изгибающий момент и перерезывающую силу, распределенные по краю трубной решетки, вычисляют по формулам:

- для изгибающего момента:

$$M_n = \left(\frac{a_1}{\beta}\right)\frac{p_1\left(T_1 + \rho K_q\right) - p_0 T_2}{\left(T_1 + \rho K_q\right)\left(T_3 + \rho_1\right) - T_2^2}; \quad (18)$$

- для перерезывающей силы:

$$Q_n = a_1\frac{p_0\left(T_3 + \rho_1\right) - p_1 T_2}{\left(T_1 + \rho K_q\right)\left(T_3 + \rho_1\right) - T_2^2}, \quad (19)$$

где

$$p_1 = \frac{K_y}{\beta K_\Phi}\left(m_3 p_u - m_2 p_t\right); \quad (20)$$

$$m_1 = \frac{1 + \beta_1 h_1}{2\beta_1^2}; \quad (21)$$

$$m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2\beta_2^2}. \quad (22)$$

5.2.2.6 Изгибающий момент и перерезывающие силы, распределенные по периметру перфорированной зоны решетки, вычисляют по формулам:

- для изгибающего момента:

$$M_a = M_п + (a - a_1)\, Q_п; \tag{23}$$

- для перерезывающей силы:

$$Q_a = m_п\, Q_п. \tag{24}$$

5.2.2.7 Осевую силу и изгибающий момент, действующие на трубу, вычисляют по формулам:

- для осевой силы:

$$N_т = \frac{\pi a_1}{i}\left[\left(\eta_м\, p_м - \eta_т\, p_т\right)a_1 + \Phi_1 Q_a + \Phi_2 \beta M_a\right]; \tag{25}$$

- для изгибающего момента:

$$M_т = \frac{E_т\, J_т\, \beta}{K_y\, a_1 l_{пр}}\left(\Phi_2\, Q_a + \Phi_3 \beta M_a\right). \tag{26}$$

$l_{пр}$ — вычисляют по формулам, приведенным в 5.2.7.4.

5.2.2.8 Усилия в кожухе вычисляют по формулам:

- усилие, распределенное по периметру кожуха:

$$Q_к = \frac{a}{2} p_т - Q_п; \tag{27}$$

- изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха:

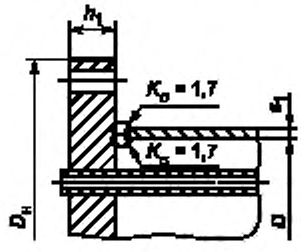
$$M_к = \frac{K_1}{\rho K_\Phi \beta}\left(T_2\, Q_п + T_3 \beta M_п\right) - \frac{p_м}{2\beta_1^2}; \tag{28}$$

- суммарная осевая сила, действующая на кожух:

$$F = \pi D Q_к. \tag{29}$$

**5.2.3 Расчетные напряжения в элементах конструкции**

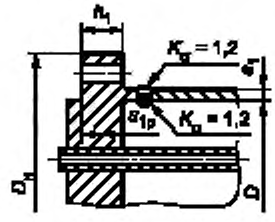
5.2.3.1 Расчетные схемы присоединения решетки к кожуху приведены на рисунках 7—10.




$$b_1 = \frac{D_н - D}{2};\ R_1 = \frac{D_н + D}{4};$$

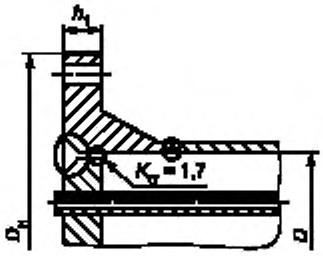
$$s_{1р} = s_р.$$

Рисунок 7 — решетка, приваренная втавр к обечайке кожуха




$$b_1 = \frac{D_н - D}{2};\ R_1 = \frac{D_н + D}{4}.$$

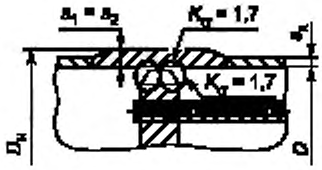
Рисунок 8 — решетка, приваренная встык к обечайке кожуха




$$b_1 = \frac{D_н - D}{2};\ R_1 = \frac{D_н + D}{4};$$

$$s_1 = s_э.$$

Рисунок 9 — решетка, вваренная во фланец




$$b_1 = \frac{D_н - D}{2};\ R_1 = \frac{D_н + D}{4};\ h_1 = s_р;$$

$$b_2 = 0;\ R_2 = R_1;\ h_1 = s_р;\ s_{1р} = s_р.$$

Рисунок 10 — решетка, вваренная в кожух

5.2.3.2 Расчетные напряжения в трубных решетках.

Напряжения в трубной решетке в месте соединения с кожухом вычисляют по формулам:

- изгибные:

$$\sigma_{р1} = \frac{6|M_п|}{(s_{1р} - c)^2}; \qquad (30)$$

- касательные:

$$\tau_{р1} = \frac{|Q_п|}{(s_{1р} - c)}. \qquad (31)$$

Напряжения в перфорированной части трубной решетки вычисляют по формулам

- изгибные:

$$\sigma_{р2} = \frac{6M_{max}}{\varphi_р (s_р - c)^2}; \qquad (32)$$

- касательные:

$$\tau_{р2} = \frac{|Q_а|}{\varphi_р (s_р - c)}, \qquad (33)$$

где $M_{max}$ — максимальный расчетный изгибающий момент в перфорированной части трубной решетки.

При $-1,0 \le \frac{\beta M_а}{Q_а} \le 1,0$ $M_{max}$ вычисляют по формуле

$$M_{max} = A\frac{|Q_а|}{\beta}, \qquad (34)$$

где $A$ — коэффициент, определяемый по приложению Г в зависимости от $\omega$ и $m_A$:

$$m_A = \frac{\beta M_а}{Q_а}, \qquad (35)$$

при $\frac{\beta M_а}{Q_а} < -1,0$ и $\frac{\beta M_а}{Q_а} > 1,0$ $M_{max}$ вычисляют по формуле

$$M_{max} = B|M_a|, \tag{36}$$

где $B$ — коэффициент, определяемый по приложению Г, в зависимости от $\omega$ и $n_B$:

$$n_B = \frac{Q_a}{\beta M_a}. \tag{37}$$

5.2.3.3 Напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке вычисляют по формулам:

- в меридиональном направлении:

мембранные:

$$\sigma_{Mx} = \frac{|Q_к|}{(s_1 - c_к)}, \tag{38}$$

изгибные:

$$\sigma_{ux} = \frac{6|M_к|}{(s_1 - c_к)^2}; \tag{39}$$

- в окружном направлении:

мембранные:

$$\sigma_{M\varphi} = \frac{|p_м| a}{(s_1 - c_к)}, \tag{40}$$

изгибные:

$$\sigma_{u\varphi} = 0{,}3\sigma_{ux}. \tag{41}$$

5.2.3.4 Напряжения в трубах вычисляют по формулам:

- в осевом направлении:

мембранные:

$$\sigma_{1т} = \frac{|N_т|}{\pi(d_т - s_т)s_т}; \tag{42}$$

суммарные:

$$\sigma_1 = \sigma_{1т} + \frac{d_т|M_т|}{2J_т}; \tag{43}$$

- в окружном направлении:

$$\sigma_{2т} = \frac{(d_т - s_т)\max\{|p_т|; |p_м|; |p_т - p_м|\}}{2s_т}. \tag{44}$$

**5.2.4 Проверка прочности трубных решеток**

5.2.4.1 Проверку статической прочности проводят по формуле

$$\max\{\tau_{p1}; \tau_{p2}\} \le 0{,}8[\sigma]_p. \tag{45}$$

5.2.4.2 Проверку трубной решетки на малоцикловую прочность проводят по ГОСТ Р 52857.6.

В случае, если в расчете должна учитываться ползучесть материала, допускается проводить проверку на малоцикловую прочность по приложению Д.

При проверке трубной решетки на малоцикловую прочность следует принимать:

- в месте соединения с кожухом

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_{p1}, \tag{46}$$

$$\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3 = 0, \tag{47}$$

$K_\sigma$ — см. рисунки 7—10;

- в перфорированной части

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_{p2}, \quad (48)$$

$$\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3 = 0, \quad (49)$$

$$K_\alpha = 1. \quad (50)$$

5.2.4.3 Для многоходовых по трубному пространству теплообменных аппаратов прочность трубных решеток в зоне паза под перегородку проверяют по формулам, приведенным в 5.6. При этом следует принимать:

$$s_p^0 = \left(s_p - c\right)\frac{\sigma_{p2}}{2[\sigma_A]}. \quad (51)$$

**5.2.5 Проверка жесткости трубных решеток**

Проверку проводят в случаях, когда к жесткости трубных решеток предъявляются какие-либо дополнительные требования, например для аппаратов со стекающей пленкой, с перегородками по трубному пространству, если недопустим переток между ходами.

Условие жесткости:

$$W = \frac{1,2}{K_y a_1}\left|T_1 Q_n + T_2 \beta M_n\right| \le [W]. \quad (52)$$

Рекомендуемые допустимые величины прогибов трубных решеток $[W]$, мм, в зависимости от диаметра аппарата приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Допустимые величины прогибов трубных решеток

| $D$ | $D \le 0,6$ м | 0,6 м < $D \le 1$ м | 1 м < $D \le 2$ м | $D > 2$ м |
|---|---|---|---|---|
| $[W]$ | 0,7 мм | 0,9 мм | 1,1 мм | 1,2 мм |

**5.2.6 Расчет прочности и устойчивости кожуха**

Проверку прочности кожуха в месте присоединения к решетке следует проводить только для конструкций, приведенных на рисунках 7, 8 и 10.

5.2.6.1 Условие статической прочности кожуха в месте присоединения к решетке:

$$\sigma_{Mx} \le 1,3\,[\sigma]_x. \quad (53)$$

5.2.6.2. Проверку кожуха на малоцикловую прочность в месте присоединения к решетке проводят по ГОСТ Р 52857.6. В случае, если в расчете должна учитываться ползучесть материала, допускается проводить проверку на малоцикловую прочность по приложению Д.

При проверке кожуха на малоцикловую прочность следует принимать:

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_{Mx} + \sigma_{ux}; \quad (54)$$

$$\Delta\sigma_2 = \sigma_{M\varphi} + \sigma_{u\varphi}; \quad (55)$$

$$\Delta\sigma_3 = 0; \quad (56)$$

$K_\alpha$ — см. рисунки 7—10.

5.2.6.3 Если условие прочности кожуха в месте соединения с решеткой по 5.2.6.1 и 5.2.6.2 не выполняется, можно установить переходный пояс увеличенной толщины длиной не менее $2\sqrt{Ds_1}$.

5.2.6.4 В случае, если осевая сила в кожухе $F < 0$, следует провести проверку кожуха на местную устойчивость от действия сжимающей силы $F$ по ГОСТ Р 52857.2.

**5.2.7 Расчет труб на прочность, устойчивость и жесткость и расчет крепления труб в решетке**

5.2.7.1 Условие статической прочности труб:

$$\max\left\{\sigma_{1T};\ \sigma_{2T}\right\} \le [\sigma]_T. \tag{57}$$

5.2.7.2 Проверку труб на малоцикловую прочность проводят по ГОСТ Р 52857.6. В случае, если при расчете должна учитываться ползучесть материала, допускается проводить проверку на малоцикловую прочность по приложению Д.

При проверке труб на малоцикловую прочность следует принимать

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_1; \tag{58}$$

$$\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3 = 0; \tag{59}$$

$$K_\sigma = 1. \tag{60}$$

5.2.7.3 Проверку труб на устойчивость проводят в случае, если $N_T < 0$. Условие устойчивости:

$$\sigma_{1T} \le \varphi_T\,[\sigma]_T, \tag{61}$$

где $\varphi_T$ — коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе, определяемый по графику на рисунке 11, в зависимости от $\lambda$.

$$\lambda = K_T \sqrt{\frac{[\sigma]_T}{E_T}}\,\frac{l_R}{(d_T - s_T)}, \tag{62}$$

где $K_T = 1{,}3$ — для рабочих условий;

$K_T = 1{,}126$ — для условий гидроиспытания;

$l_R = l$ — для аппаратов без перегородок;

$l_R = \max\left\{l_{2R};0{,}7l_{1R}\right\}$ — для аппаратов с перегородками.




Рисунок 11 — коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе

5.2.7.4 Проверка жесткости труб

Проверку проводят в случаях, когда к жесткости труб предъявляют какие-либо дополнительные требования, например для аппаратов со стекающей пленкой. Проверку жесткости труб проводят только при $N_T < 0$.

Прогиб трубы вычисляют по формуле

$$Y = A_y \left|\frac{M_T}{N_T}\right|, \tag{63}$$

где $A_y$ — коэффициент, определяемый по графику, приведенному на рисунке 12, в зависимости от $\lambda_y$

$$\lambda_y = \frac{|N_т| l_{пр}^2}{E_т Y_т}, \tag{64}$$

где $l_{пр} = l$ — для аппаратов без перегородок в кожухе.

$l_{пр} = \frac{l_{1R}}{3}$ — для аппаратов с перегородками.

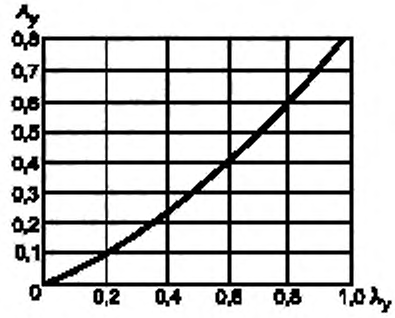



Рисунок 12 — Коэффициент для определения максимального прогиба трубы

Во всех случаях прогиб трубы не должен превышать зазор между трубами в пучке и приводить к их соприкосновению.

5.2.7.5 Проверка прочности крепления трубы в решетке

Если трубы крепятся в решетке с помощью развальцовки, должно выполняться условие:

$$|N_т| \le [N]_{тр}. \tag{65}$$

Допускаемая нагрузка на соединение трубы с решеткой $[N]_{тр}$ определяется на основании испытаний или по нормативным документам.

При отсутствии данных о прочности вальцовочного соединения допускается принимать $[N]_{тр}$ по приложению Е.

Если трубы крепятся к решетке способом приварки или приварки с подвальцовкой, должно выполняться условие:

$$\tau = \frac{|N_т| d_т + 4|M_т|}{\pi d_т^2 \delta} \le \varphi_c \min\left\{[\sigma]_т; [\sigma]_р\right\}, \tag{66}$$

где

$$\varphi_c = \min\{0{,}5; (0{,}95 - 0{,}2 \lg N)\}. \tag{67}$$

В случае крепления труб к решетке способом развальцовки с обваркой должно выполняться условие:

$$\max\left\{\frac{\varphi_c \min\left\{[\sigma]_т; [\sigma]_р\right\}}{\tau} + 0{,}6\frac{[N]_{тр}}{|N_т|}; \frac{[N]_{тр}}{|N_т|}\right\} \ge 1. \tag{68}$$

**5.3 Теплообменные аппараты с плавающей головкой**

5.3.1 Толщина трубной решетки в зоне перфорации должна отвечать условию

$$s_р \ge s_р^р + c, \tag{69}$$

где

$$s_р^р = \frac{D_{с.п}}{4{,}2}\sqrt{\frac{p_р}{\varphi_E [\sigma]_р}}, \tag{70}$$

$\varphi_E$ — эффективный коэффициент ослабления решетки определяют по приложению Б.

5.3.2 Расчет элементов плавающей головки (см. рисунок 13).

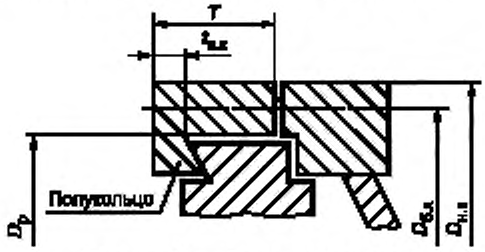



Рисунок 13 — Элементы плавающей головки

5.3.2.1 Усилия, действующие на шпильки, и усилие на прокладке. Проверка прочности шпилек и прокладки

Проверку прочности шпилек и прокладки выполняют по ГОСТ Р 52857.4. Усилия, действующие на шпильки плавающей головки при монтаже $P_б^м$ и в рабочих условиях $P_б^р$, и равнодействующую внутреннего давления $Q_д$ определяют по ГОСТ Р 52857.4. При этом коэффициенты жесткости фланцевого соединения $\alpha$ и $\gamma$ определяют по ГОСТ Р 52857.4, как для соединения фланца с крышкой, угловая податливость фланца (полукольца) $y_ф$ принимается равной нулю.

Угловую податливость сферических неотбортованных крышек определяют по ГОСТ Р 52857.4.

Угловую податливость крышек с эллиптическим днищем, отвечающих условию $h \geq \sqrt{Ds_1}$, определяют по ГОСТ Р 52857.4, как для плоских фланцев с прямой втулкой.

Угловую податливость крышек с эллиптическим днищем, отвечающих условию $h < \sqrt{Ds_1}$, определяют по ГОСТ Р 52857.4, как для сферической неотбортованной крышки с радиусом кривизны, равным радиусу кривизны, в вершине эллиптического днища в соответствии с ГОСТ Р 52857.2.

В случае использования привалочной поверхности с шипом шириной $T_ш$ и плоской металлической прокладки шириной $b_п$ эффективную ширину прокладки $b_0$ вычисляют по формуле

$$b_0 = \frac{T_ш + b_п}{2}. \quad (71)$$

Средний диаметр плоской прокладки $D_{с.п}$ в случае использования привалочной поверхности с шипом принимается равным полусумме наружного и внутреннего диаметров шипа.

Проверку прочности шпилек и прокладки плавающей головки выполняют по ГОСТ Р 52857.4.

Усилие на прокладке плавающей головки в условиях монтажа равно:

$$F_п = P_б^м. \quad (72)$$

Усилие на прокладке плавающей головки в рабочих условиях:

$$F_п = P_б^р - Q_д. \quad (73)$$

5.3.2.2 Расчет на прочность при действии внутреннего давления крышек плавающих головок со сферическим неотбортованным днищем выполняют по ГОСТ Р 52857.2 (пункт 6.5).

В случае, если условие $M \leq [M]$ при расчете на прочность крышек плавающих головок со сферическим неотбортованным днищем по ГОСТ Р 52857.2 не выполняется, допускаемое избыточное давление из условий прочности краевой зоны $[p_1]$ вычисляют по формуле

$$[p_1] = \frac{2\left(s_{1пл} - c\right)\varphi[\sigma]_1}{\left[D\beta_п + \left(s_{1пл} - c\right)\right]}\sqrt{\frac{[M] + [M]_{кр} - M}{[M]_{кр}}}, \quad (74)$$

где

$$[M]_{кр} = \frac{\pi D\left(s_{1пл} - c\right)^2}{4}[\sigma]_1; \quad (75)$$

$$\beta_n = 0{,}5 + \frac{\operatorname{tg}\psi}{\sqrt{\dfrac{D\left(s_{1пл} - c\right)}{\cos\psi}}}. \qquad (76)$$

$M$, $[M]$ и $\psi$ определяют по ГОСТ Р 52857.2 (пункт 6.5).

Расчет сферического неотбортованного донышка крышки на действие наружного давления выполняют по ГОСТ Р 52857.2 (пункт 6.5).

5.3.2.3 Расчет допускаемого избыточного давления из условий прочности краевой зоны крышек с эллиптическим днищем, отвечающих условию $h < \sqrt{Ds_1}$, выполняют так же, как и для крышек плавающих головок со сферическим неотбортованным днищем с радиусом кривизны, равным радиусу кривизны, в вершине соответствующего эллиптического днища по ГОСТ Р 52857.2 (пункт 6.5). При этом $\psi$ принимают равным 0.

Расчет фланцевой части и примыкающей к ней отбортовки крышек с эллиптическим днищем, отвечающих условию $h < \sqrt{Ds_1}$, выполняют по ГОСТ Р 52857.4, как плоского фланца с прямой втулкой.

Расчет эллиптического днища на внутреннее и наружное давления выполняют по ГОСТ Р 52857.2 (пункт 6.3).

5.3.2.4 Толщину полукольца (см. рисунок 13) определяют из условий изгиба по формуле

$$T \geq \sqrt{\frac{P_б\left(D_{б.к} - D_р\right)\beta_Y}{2D_р[\sigma]_t}} + c, \qquad (77)$$

где $\beta_Y$ определяют по ГОСТ Р 52857.4.

5.3.2.5 Толщину наименьшего сечения полукольца определяют из условий среза по формуле

$$t_{п.к} = \max\left\{\frac{P_б}{0{,}8\pi D_р[\sigma]_t};\ 26\,мм\right\} + c. \qquad (78)$$

5.3.2.6 Расчет по 5.3.2.2—5.3.2.5 следует выполнять как для рабочих условий, так и для условий монтажа до подачи внутреннего давления. При расчете в рабочих условиях следует принимать $P_б = P_б^р$, а при расчете в условиях монтажа $P_б = P_б^м$.

**5.4 Теплообменные аппараты с U-образными трубами**

5.4.1 Толщина трубной решетки в зоне перфорации должна отвечать условию:

$$s_р \geq s_р^р + c, \qquad (79)$$

где

$$s_р^р = \frac{D_{с.п}}{3{,}4}\sqrt{\frac{p_р}{\varphi_E[\sigma]_р}}. \qquad (80)$$

$\varphi_E$ — эффективный коэффициент ослабления решетки, определяют по приложению Б.

5.4.2 В случае, если к жесткости трубных решеток аппаратов с U-образными трубами предъявляют специальные требования (недопустим остаточный прогиб решетки), расчетную толщину вычисляют по формуле

$$s_р^р = 0{,}82a_1\sqrt{\frac{p_р}{\varphi_E[\sigma]_р}}\max\left\{1;\ \sqrt{\frac{2a_1 + 1{,}5\frac{D_{с.п}}{a_1}\left(D_{с.п} - 2a_1\right)}{D_{с.п} - 2a_1\left(1 - \varphi_E\right)}\varphi_E + \frac{p_р}{\varphi_E[\sigma]_р}}\right\}. \qquad (81)$$

**5.5 Дополнительные требования к толщинам трубных решеток**

5.5.1 При наличии беструбной зоны (см. рисунок 14) принятая толщина трубной решетки должна дополнительно удовлетворять условию

$$s_p \geq 0{,}5D_E \sqrt{\frac{p_p}{[\sigma]_p}} + c. \qquad (82)$$

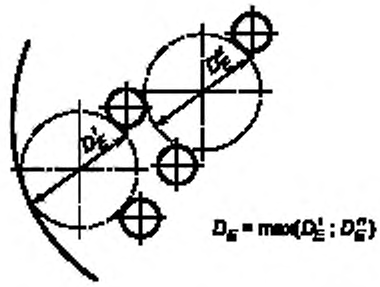



Рисунок 14 — Диаметр окружности, вписанной в максимальную беструбную площадь

5.5.2 Толщина решеток аппаратов с плавающей головкой и U-образными трубами в месте уплотнения под кольцевую прокладку должна отвечать условию

$$s_{pr} \geq \max\left\{0{,}71\sqrt{\frac{p_p D_{c.n}}{[\sigma]_p}\left(D_{c.n} - D_B\right)};\ 0{,}5D_{c.n}\frac{p_p}{[\sigma]_p}\right\} + c. \qquad (83)$$

5.5.3 Для многоходовых по трубному пространству аппаратов толщина трубной решетки в сечении канавки должна быть не менее

$$s_n \geq \left(s_p - c\right)\max\left\{\left[1 - \sqrt{\frac{d_0}{B_n}\left(\frac{t_n}{t_p} - 1\right)}\right];\ \sqrt{\varphi_p}\right\} + c. \qquad (84)$$

5.5.4 Для трубных решеток, выполненных заодно с фланцем, принятая толщина должна быть не менее толщины кольца ответного фланца. Допускается уменьшение толщины решетки по сравнению с толщиной ответного фланца при условии подтверждения плотности и прочности фланцевого соединения специальным расчетом.

**5.6 Перегородки между ходами по трубному пространству кожухотрубчатых теплообменных аппаратов**

Толщина перегородки должна отвечать условию

$$s_{пер} \geq 0{,}71B_{пер}\sqrt{\frac{\Delta p f_n}{[\sigma]_n}} + c_n, \qquad (85)$$

где

$$f_n = \frac{1}{1 + \frac{B_{пер}}{L_{пер}} + \left(\frac{B_{пер}}{L_{пер}}\right)^2}. \qquad (86)$$

## 6 Расчет элементов аппаратов воздушного охлаждения

### 6.1 Условия применения расчетных формул

6.1.1 Расчетные формулы применяют, если расчетная температура не превышает значений, при которых возникает ползучесть материалов (ГОСТ Р 52857.2, пункт 5.2.2).

6.1.2 Расчетные формулы применяют, если разность температур между смежными потоками в многоходовых секциях не превышает 100 °С.

6.1.3 Расчетные формулы применяют при выполнении следующих условий:

$$\frac{s_{1A}-c}{B_0} \le 0{,}4; \tag{87}$$

$$\frac{s_{4A}-c}{B_0} \le 0{,}4. \tag{88}$$

6.1.4 Расчетные формулы применяют, если обеспечено свободное перемещение пучка в результате температурных удлинений.

6.1.5 Допускается использовать расчетные формулы для аналогичных схем камер аппаратов воздушного охлаждения, не приведенных на рисунках 15—23.

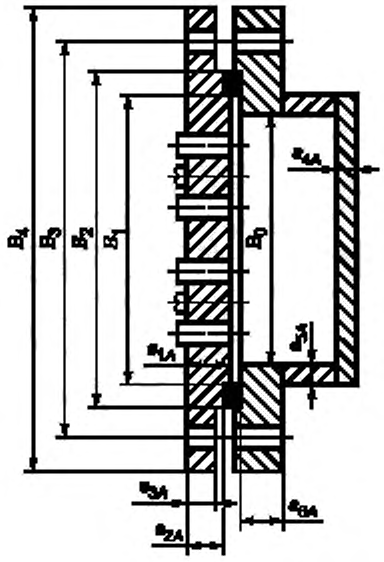



Рисунок 15 — Камера разъемной конструкции со сварной крышкой

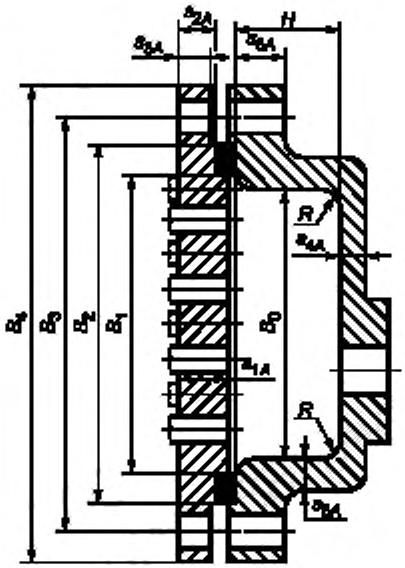



Рисунок 16 — Камера разъемной конструкции с литой крышкой

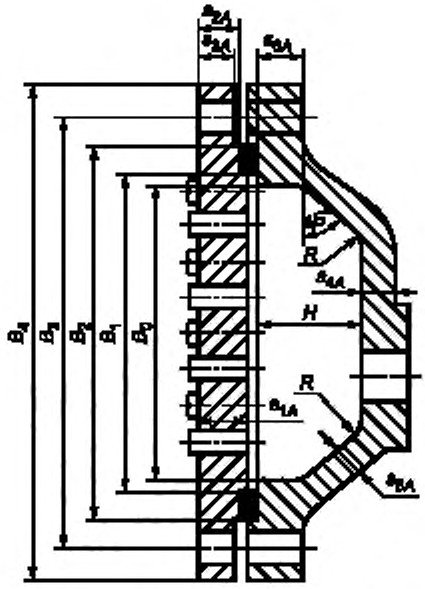



Рисунок 17 — Камера разъемной конструкции с литой или штампованной крышкой

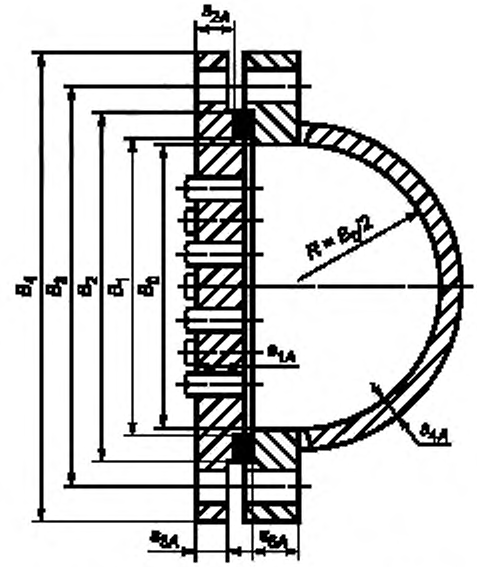



Рисунок 18 — Камера разъемной конструкции со сварной полуцилиндрической крышкой

**6.2 Расчет камер разъемной конструкции**

6.2.1. Схемы камер разъемной конструкции приведены на рисунках 15—18.

**6.2.2 Расчет элементов камер разъемной конструкции**

6.2.2.1 Формулы для определения вспомогательных величин для расчета камер разъемной конструкции приведены в приложении Ж.

6.2.2.2 Усилие в болтах (шпильках) в условиях эксплуатации:

$$F_B = p\,[L_p B_p + 2b_0 m\,(L_p + B_p)]. \qquad (89)$$

6.2.2.3 Усилие в болтах (шпильках) в условиях испытания или монтажа

$$F_0 = \max\left\{\frac{p_{пр}}{p}F_B;\ p_{пр}\left[\eta_p L_p B_p + 2b_0 m\left(L_p + B_p\right)\right]\right\}. \qquad (90)$$

6.2.2.4 Величины $L_p$ и $B_p$ определяют по приложению Ж. Характеристики прокладки $b_0$ и $m$ — по ГОСТ Р 52857.4.

Коэффициент $\eta_p$ для фланцевых соединений с эксцентрично расположенной прокладкой в первом приближении принимают равным 2. Уточненное значение $\eta_p$ определяют по приложению И. Если предусмотрены специальные конструктивные меры, позволяющие разгрузить элементы разъемных камер от действия болтового изгибающего момента, то $\eta_p$ принимают равным 1.

6.2.2.5 Условие прочности шпилек (болтов)

$$\frac{F_0}{A_B} \le [\sigma]_B^{20}; \qquad (91)$$

$$\frac{F_B}{A_B} \le [\sigma]_B^{t}, \qquad (92)$$

где $[\sigma]_B^{20}$; $[\sigma]_B^{t}$ — допускаемые напряжения для материала шпилек (болтов) по ГОСТ Р 52857.4.

**6.2.3 Расчет трубной решетки**

6.2.3.1 Толщина трубной решетки в пределах зоны перфорации должна отвечать условию

$$s_{1A} \geq 0{,}71 B_T \sqrt{\frac{p}{\varphi_E [\sigma]_p}} \sqrt{\left(\Lambda_p + \Psi_p + \Omega f_0\right) + 1{,}5 \frac{p}{\varphi_E [\sigma]_p}} + c. \quad (93)$$

Безразмерную характеристику нагружения решетки болтовым изгибающим моментом $\Lambda_p$ вычисляют по формуле

$$\Lambda_p = \frac{4 F_B l_1}{p\left(L_p + B_p\right) B_T^2}. \quad (94)$$

Безразмерную характеристику нагружения решетки давлением, действующим на беструбную зону $\Psi_p$, вычисляют по формуле

$$\Psi_p = \lambda_p \left(\lambda_p + 2\right). \quad (95)$$

Коэффициент несущей способности трубного пучка $\Omega$ вычисляют по формулам

при $p\eta \leq \varphi_T [q]_T$:

$$\Omega = \frac{p}{[q]_T + p\eta}; \quad (96)$$

при $p\eta > \varphi_T [q]_T$:

$$\Omega = \frac{p^2 + \left(p\eta - \varphi_T [q]_T\right)\left\{[q]_T - p(2-\eta)\right\}}{p[q]_T \left(1 + \varphi_T\right)}. \quad (97)$$

Коэффициент, зависящий от соотношения сторон перфорированной зоны решетки $f_0$, вычисляют по формуле

$$f_0 = \frac{1}{1 + 2\frac{B_T}{L_p} + \left(\frac{B_T}{L_p}\right)^2}. \quad (98)$$

$l_1$, $B_T$, $\lambda_p$, $\eta$ и $[q]_T$ определяют по приложению Ж, эффективный коэффициент ослабления $\varphi_E$ — по приложению Б, коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе $\varphi_T$ — по 5.2.7.3.

При $\Omega > 1$ следует увеличивать толщину труб для выполнения условия $\Omega \leq 1$.

6.2.3.2 Толщины трубной решетки в месте уплотнения $s_{2A}$ и вне зоны уплотнения $s_{3A}$ должны отвечать условиям:

$$s_{2A} \geq 0{,}71 \sqrt{\frac{F_1}{[\sigma]_p}} \sqrt{4 l_1 + 1{,}5 \frac{F_1}{[\sigma]_p}} + c; \quad (99)$$

$$s_{3A} \geq 0{,}71 \sqrt{\frac{F_1}{[\sigma]_p}} \sqrt{4 l_2 + 1{,}5 \frac{F_1}{[\sigma]_p}}. \quad (100)$$

Усилие от болтовой нагрузки на единицу длины решетки или крышки $F_1$ вычисляют по формуле

$$F_1 = \frac{F_0}{L_p + B_p} \frac{p}{p_{пр}}. \quad (101)$$

6.2.3.3 Условие прочности крепления труб в решетке

$$[q]_s \geq p\left[z_F - \eta + z_M\left(\Lambda_p + \Psi_p\right)\right]. \quad (102)$$

Коэффициенты $z_F$ и $z_M$ определяют по графику, приведенному на рисунке 19 в зависимости от величины

$$\omega = 1{,}6\frac{B_T}{s_{1A}}\sqrt[4]{\frac{\upsilon s_{1A}}{2l}}. \qquad (103)$$

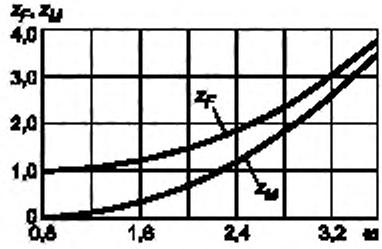



Рисунок 19

Коэффициенты η и ν вычисляют по Ж.2 приложения Ж.

**6.2.4 Расчет крышки**

6.2.4.1 Толщина донышка крышки (см. рисунки 15 —17) должна отвечать условию

$$s_{4A} \geq 0{,}71B_0\sqrt{\frac{p}{[\sigma]_{кр}}}\sqrt{\max\left\{\frac{\Lambda_{кр}+\Psi_{кр}+f_1}{1+\chi_{кр}};\ f_2\right\}+1{,}5\frac{p}{[\sigma]_{кр}}}+c. \qquad (104)$$

Безразмерную характеристику нагружения крышки аппарата воздушного охлаждения болтовым изгибающим моментом $\lambda_{кр}$ вычисляют по формуле

$$\Lambda_{кр} = \frac{4F_B l_1}{p\left(L_р + B_р\right)B_0^2}. \qquad (105)$$

Безразмерную характеристику нагружения крышки давлением, действующим на ее фланцевую часть $\psi_{кр}$ вычисляют по формуле

$$\Psi_{кр} = \left[\left(\frac{B_р}{B_0}\right)^2 - 1\right]\frac{L_0}{L_0+B_0} - 4\left(\frac{H}{B_0}\right)^2. \qquad (106)$$

Коэффициенты, зависящие от соотношения сторон крышки $f_1$ и $f_2$, вычисляют по формулам:

$$f_1 = \frac{1}{1+\left(\frac{B_0}{L_0}\right)+\left(\frac{B_0}{L_0}\right)^2}; \qquad (107)$$

$$f_2 = 0{,}5f_1. \qquad (108)$$

Коэффициент сопротивления фланцевой части крышки $\chi_{кр}$ вычисляют по формуле

$$\chi_{кр} = \frac{0{,}8}{L_0}\left\{\left[1{,}5\left(B_3 - B_0\right) - s_{6A}\right]\left(\frac{s_{6A}}{s_{4A}}\right)^2 + \left[3\left(H - s_{6A}\right) + 2s_{5A}\right]\left(\frac{s_{5A}}{s_{4A}}\right)^2\right\}. \qquad (109)$$

6.2.4.2 Толщина донышка крышки (см. рисунок 18) должна отвечать условию

$$s_{4A} \geq 0{,}71B_0\sqrt{\frac{p}{[\sigma]_к}}\sqrt{\frac{\Lambda_{кр}}{\varphi-\chi_c}+0{,}5\frac{p}{\varphi^2[\sigma]_к}}+c. \qquad (110)$$

Коэффициент сопротивления фланцевой части крышки $\chi_c$ вычисляют по формуле

$$\chi_c = \frac{0,8}{L_{рас}}\left[1,5\left(B_3 - B_0\right) - s_{6A}\right]\left(\frac{s_{6A}}{s_{5A}}\right)^2. \qquad (111)$$

6.2.4.3 Толщина стенки крышки в месте присоединения к фланцу должна отвечать условию:

$$s_{5A} \geq 0,71\sqrt{\frac{F_1}{[\sigma]_k}}\sqrt{\frac{4l_1}{\varphi + \chi_c}} + c, \qquad (112)$$

где $F_1$ — расчетное усилие, вычисляемое по формуле (101);

$\chi_c$ — коэффициент для крышек (см. рисунки 15—17), вычисляемый по формуле (111);

$\chi_{кр}$ — коэффициент вычисляют по формуле (109).

6.2.4.4 Толщину фланца крышки $s_{6A}$ вычисляют по формуле (99) при $[\sigma]_p = [\sigma]_k$.

6.2.4.5 Толщина боковой стенки $s_{7A}$ крышек (см. рисунки 15—17) должна отвечать условию:

$$s_{7A} \geq s_{5A}, \qquad (113)$$

а крышек (см. рисунок 18) — условию:

$$s_{7A} \geq \max\left\{s_{5A};\ 0,25B_0\sqrt{\frac{p}{[\sigma]_k}} + c\right\}. \qquad (114)$$

**6.3 Расчет камер неразъемной конструкции**

6.3.1 Схемы камер неразъемной конструкции приведены на рисунках 20—24.

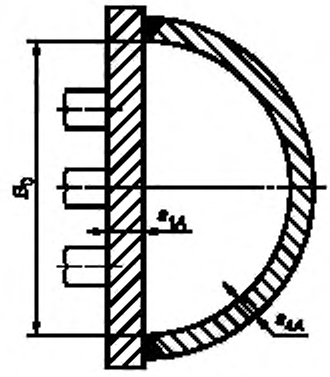



Рисунок 20 — Камера неразъемной конструкции с полуцилиндрической задней стенкой

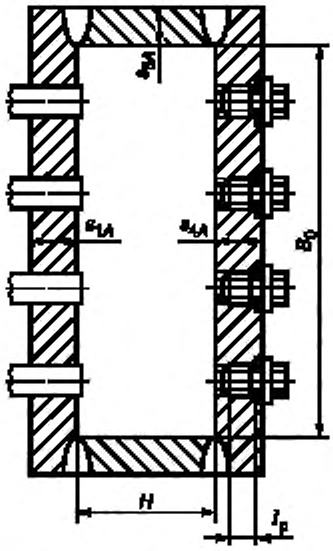



Рисунок 21 — Сварная камера без перегородок

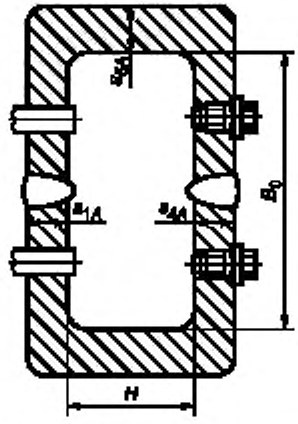



Рисунок 22 — Штампосварная камера без перегородок

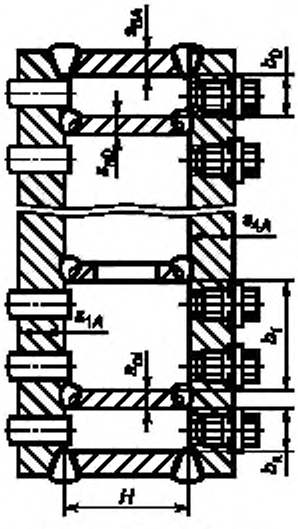



Рисунок 23 — Сварная камера с перегородками

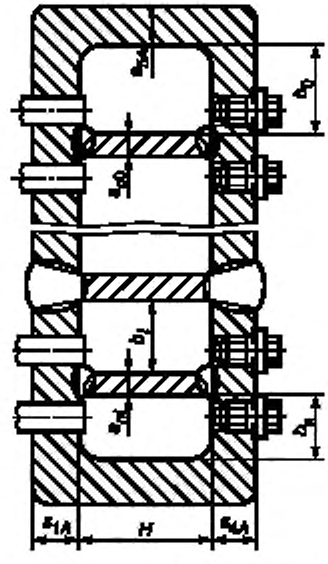



Рисунок 24 — Штампосварная камера с перегородками

6.3.1.1 Толщина задней стенки камеры должна отвечать условию:

$$s_{4A} \geq 0{,}5\,B_p \sqrt{\frac{p}{\varphi_E[\sigma]}} \sqrt{f_3 + \frac{p}{\varphi_E[\sigma]}\left[1{,}5 + \left(\frac{H}{B_p}\right)^2\right]} + c + c_p. \qquad (115)$$

Коэффициент $f_3$, зависящий от соотношения сторон задней стенки камеры, вычисляют по формуле

$$f_3 = \frac{2}{2 + \left(\frac{B_p}{L_0}\right) + \left(\frac{B_p}{L_0}\right)^2}. \quad (116)$$

Для камер с перегородками (см. рисунки 23, 24) $f_3 = 1$.

Расчетный поперечный размер камеры $B_p$ определяют по приложению Ж, эффективный коэффициент ослабления $\varphi_E$ — по приложению Б.

Толщину решетки $s_{1A}$ следует принимать

$$s_{1A} = s_{4A}. \quad (117)$$

6.3.1.2 Толщины верхней и нижней стенок для конструкций, приведенных на рисунках 21 и 23, должны отвечать условию:

$$s_{5A} \geq 0{,}5 B_p \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} \max \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{\varphi} \cdot \left\{ f_3 + \frac{p}{[\sigma]} \left[ \frac{1}{\varphi} + 1{,}5 \left( \frac{2H^2}{\varphi B_p^2} - \frac{1}{\varphi_E} \right) \right] \right\}} \\ \sqrt{\left| 2\frac{H^2}{B_p^2} - f_3 \right| + \frac{p}{[\sigma]} \left( 1 + \frac{1{,}5}{\varphi_E} \right)} \end{array} \right\} + c, \quad (118)$$

а конструкций, приведенных на рисунках 22 и 24, — условию:

$$s_{5A} = s_{4A}. \quad (119)$$

6.3.1.3 Толщины усиливающих перегородок в камерах (см. рисунки 23, 24) должны отвечать условию:

$$s_{ni} \geq \frac{p\left(b_{i-1} + b_i\right)}{2[\sigma] \min\left\{\varphi; 1 - \frac{d_{ni}}{l_{ni}}\right\}} + c_n. \quad (120)$$

6.3.1.4 Толщина боковой стенки должна отвечать условию:

$$s_{7A} \geq 0{,}71 H \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} \sqrt{f_4 + 1{,}5\frac{p}{\varphi^2[\sigma]}} + c. \quad (121)$$

Коэффициент $f_4$, зависящий от соотношения сторон боковой стенки, вычисляют по формуле

$$f_4 = \frac{1}{1 + \left(\frac{H}{B_0}\right) + \left(\frac{H}{B_0}\right)^2}. \quad (122)$$

6.3.2 Расчет камер неразъемной конструкции с полуцилиндрической задней стенкой (см. рисунок 19).

6.3.2.1 Толщину трубной решетки $s_{1A}$ вычисляют по формуле (93) при $\Lambda_p = 0$.

6.3.2.2 Толщину полуцилиндрической задней стенки $s_{4A}$ определяют по ГОСТ Р 52857.2, как цилиндрической обечайки, внутренний диаметр которой равен $B_0$.

6.3.2.3 Толщину боковой стенки $s_{7A}$ определяют по формуле (114).

6.3.3 Условие прочности крепления труб в решетке:

$$\min\left\{[q]_T;\ [q]_s\right\} \geq p(1-\eta). \quad (123)$$

Коэффициент $\eta$ вычисляют по Ж.2 приложения Ж.

**Приложение А**
**(обязательное)**

## Определение коэффициентов изменения жесткости $K_q^*$ и $K_p^*$ для аппаратов с компенсатором на кожухе, расширителем на кожухе и компенсатором на расширителе

А.1 Коэффициент $K_q^*$ определяют как отношение осевого перемещения компенсатора (расширителя) при действии растягивающей силы к осевому перемещению краев корпуса межтрубного пространства без компенсатора (расширителя) от действия той же силы.

Коэффициент $K_p^*$ определяют как отношение осевого перемещения компенсатора (расширителя) при действии внутреннего давления к осевому перемещению краев корпуса межтрубного пространства без компенсатора (расширителя) от действия того же давления.

Коэффициенты $K_q^*$ и $K_p^*$ для аппаратов с компенсатором на расширителе допускается определять, как суммы соответствующих для аппаратов с компенсатором и расширителем.

При определении коэффициентов $K_q^*$ и $K_p^*$ не учитывают влияние трубного пучка и равнодействующую внутреннего давления, действующую на края корпуса в осевом направлении.

Допускается определять $K_q^*$ и $K_p^*$ с помощью численных методов теории пластин и оболочек.

А.2 Для аппаратов с компенсатором на кожухе коэффициенты $K_q^*$ и $K_p^*$ допускается вычислять по формулам:

$$K_q^* = \frac{\pi a E_к s_к}{l K_{ком}}; \tag{А.1}$$

$$K_p^* = -\frac{\pi\left(D_{ком}^2 - d_{ком}^2\right) E_к s_к}{4{,}8 l a K_{ком}}. \tag{А.2}$$

Жесткость компенсатора $K_{ком}$ следует определять по нормативным документам.
Для ненормализованных компенсаторов допускается вычислять осевую жесткость по формуле

$$K_{ком} = \frac{E_{ком}\,\delta_{ком}^3}{n_{ком}\,d_{ком}^2} A_{ком}, \tag{А.3}$$

где

$$A_{ком} = \frac{6{,}8\,\beta_{ком}\left(1+\beta_{ком}\right)}{C_f\left(1-\beta_{ком}\right)^3}; \tag{А.4}$$

$$\beta_{ком} = \frac{d_{ком}}{D_{ком}}. \tag{А.5}$$

Параметр жесткости компенсатора $C_f$ определяют по графику, приведенному на рисунке 25, в зависимости от

$$X_{ком} = \frac{4 r_{ком}\,\beta_{ком}}{d_{ком}\left(1-\beta_{ком}\right)} \tag{А.6}$$

и

$$Y_{ком} = \frac{2{,}57 r_{ком}}{\sqrt{d_{ком}\,\delta_{ком}\left(1+\dfrac{1}{\beta_{ком}}\right)}}. \tag{А.7}$$

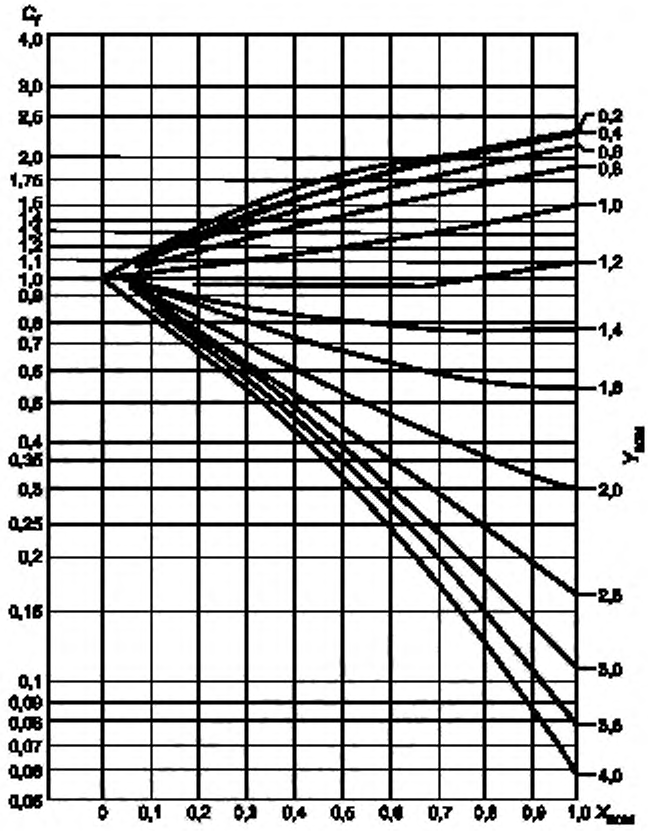



Рисунок 25 — Параметр жесткости компенсатора $C_f$

А.3 Для аппаратов с расширителем на кожухе при $\beta_0 = 90°$ коэффициент $K_a^*$ допускается вычислять по формуле

$$K_a^* = \frac{as_к}{l}\left(\frac{\pi E_к}{K_{рас}} + \frac{L_{рас}}{\delta_р D_1}\right), \tag{А.8}$$

а коэффициент $K_\rho^*$ — по формуле

$$K_\rho^* = -\frac{as_к}{l\beta_р^2}\left\{\frac{\left(1-\beta_р^2\right)}{4{,}8}\left[\frac{\pi E_к}{K_{рас}} + \frac{L_{рас}}{\delta_р D_1}\right] - 0{,}5\frac{\pi L_{рас}}{\delta_р D_1}\right\}, \tag{А.9}$$

где

$$\beta_р = \frac{D}{D_1}; \tag{А.10}$$

$$K_{рас} = \frac{E_к \delta_р^3}{D^2} A_р. \tag{А.11}$$

$A_р$ — определяют по таблице А.1 в зависимости от $\beta_р$.

Таблица А.1 — Коэффициенты $A_p$

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\beta_p$ | 0,51 | 0,52 | 0,53 | 0,54 | 0,55 | 0,56 | 0,57 | 0,58 |
| $A_p$ | 23,4 | 26,0 | 29,0 | 32,3 | 35,9 | 40,1 | 44,8 | 50,0 |
| $\beta_p$ | 0,59 | 0,60 | 0,61 | 0,62 | 0,63 | 0,64 | 0,65 | 0,66 |
| $A_p$ | 56,0 | 62,7 | 70,3 | 78,9 | 88,8 | 100 | 113 | 128 |
| $\beta_p$ | 0,67 | 0,68 | 0,69 | 0,70 | 0,71 | 0,72 | 0,73 | 0,74 |
| $A_p$ | 145 | 164 | 187 | 214 | 245 | 281 | 324 | 375 |
| $\beta_p$ | 0,75 | 0,76 | 0,77 | 0,78 | 0,79 | 0,80 | 0,81 | 0,82 |
| $A_p$ | 436 | 509 | 597 | 704 | 834 | 996 | 1197 | 1451 |
| $\beta_p$ | 0,83 | 0,84 | 0,85 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,89 | 0,9 |
| $A_p$ | 1770 | 2190 | 2740 | 3460 | 4450 | 5820 | 7770 | 10600 |

А.4 Для аппаратов с расширителем на кожухе при $15° \le \beta_0 \le 60°$ коэффициент $K_q^*$ допускается вычислять по формуле

$$K_q^* = \frac{a\left(A_{p1} + A_{p2}\sqrt{\frac{D_1}{s_к}}\right) - 0{,}5\left(1-\beta_p\right)L_p}{l}, \qquad (А.12)$$

а коэффициент $K_p^*$ — по формуле

$$K_p^* = -\frac{\left(B_{p1} + B_{p2}\sqrt{\frac{D_1}{s_к}}\right)a}{l}. \qquad (А.13)$$

Коэффициенты $A_{p1}$, $A_{p2}$, $B_{p1}$, $B_{p2}$ определяются по таблице А.2 в зависимости от $\beta_0$ (см. рисунок 3) и $\beta_p$.

Таблица А.2 — Вспомогательные коэффициенты

| $\beta_p$ | $\beta_0$ | $A_{p1}$ | $A_{p2}$ | $B_{p1}$ | $B_{p2}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,35 | 15° | 8,695 | 0,204 | –1,452 | 0,488 |
| | 30° | 5,600 | 0,899 | –7,650 | 2,144 |
| | 45° | 5,939 | 2,436 | –20,866 | 5,813 |
| | 60° | 9,698 | 6,145 | –60,596 | 14,664 |
| 0,36 | 15° | 8,462 | 0,205 | –1,525 | 0,457 |
| | 30° | 5,449 | 0,903 | –7,278 | 2,010 |
| | 45° | 5,779 | 2,449 | –19,675 | 5,450 |
| | 60° | 9,438 | 6,177 | –56,996 | 13,748 |
| 0,37 | 15° | 8,235 | 0,207 | –1,586 | 0,429 |
| | 30° | 5,303 | 0,908 | –6,932 | 1,887 |
| | 45° | 5,624 | 2,461 | –18,575 | 5,116 |
| | 60° | 9,185 | 6,209 | –53,677 | 12,906 |
| 0,38 | 15° | 8,014 | 0,208 | –1,636 | 0,403 |
| | 30° | 5,160 | 0,913 | –6,608 | 1,774 |
| | 45° | 5,473 | 2,474 | –17,557 | 4,808 |
| | 60° | 8,938 | 6,241 | –50,609 | 12,129 |
| 0,39 | 15° | 7,799 | 0,209 | –1,677 | 0,380 |
| | 30° | 5,022 | 0,917 | –6,306 | 1,669 |
| | 45° | 5,327 | 2,486 | –16,612 | 4,524 |
| | 60° | 8,698 | 6,272 | –47,768 | 11,412 |

*Продолжение таблицы А.2*

| $\beta_p$ | $\beta_0$ | $A_{p1}$ | $A_{p2}$ | $B_{p1}$ | $B_{p2}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,40 | 15° | 7,589 | 0,210 | –1,709 | 0,357 |
| | 30° | 4,887 | 0,922 | –6,022 | 1,572 |
| | 45° | 5,183 | 2,498 | –15,733 | 4,260 |
| | 60° | 8,464 | 6,303 | –45,130 | 10,747 |
| 0,41 | 15° | 7,384 | 0,211 | –1,733 | 0,337 |
| | 30° | 4,755 | 0,926 | –5,755 | 1,481 |
| | 45° | 5,044 | 2,510 | –14,914 | 4,016 |
| | 60° | 8,236 | 6,333 | –42,678 | 10,131 |
| 0,42 | 15° | 7,185 | 0,212 | –1,751 | 0,318 |
| | 30° | 4,627 | 0,930 | –5,504 | 1,398 |
| | 45° | 4,907 | 2,522 | –14,149 | 3,789 |
| | 60° | 8,014 | 6,363 | –40,393 | 9,558 |
| 0,43 | 15° | 6,990 | 0,213 | –1,762 | 0,300 |
| | 30° | 4,501 | 0,935 | –5,267 | 1,320 |
| | 45° | 4,774 | 2,534 | –13,434 | 3,577 |
| | 60° | 7,796 | 6,393 | –38,260 | 9,024 |
| 0,44 | 15° | 6,800 | 0,214 | –1,768 | 0,284 |
| | 30° | 4,379 | 0,939 | –5,043 | 1,247 |
| | 45° | 4,644 | 2,546 | –12,764 | 3,380 |
| | 60° | 7,584 | 6,422 | –36,266 | 8,527 |
| 0,45 | 15° | 6,613 | 0,215 | –1,770 | 0,268 |
| | 30° | 4,259 | 0,943 | –4,831 | 1,179 |
| | 45° | 4,517 | 2,557 | –12,135 | 3,196 |
| | 60° | 7,376 | 6,451 | –34,399 | 8,062 |
| 0,46 | 15° | 6,431 | 0,216 | –1,767 | 0,254 |
| | 30° | 4,141 | 0,947 | –4,631 | 1,115 |
| | 45° | 4,393 | 2,568 | –11,544 | 3,023 |
| | 60° | 7,173 | 6,479 | –32,647 | 7,627 |
| 0,47 | 15° | 6,253 | 0,216 | –1,760 | 0,240 |
| | 30° | 4,027 | 0,952 | –4,440 | 1,056 |
| | 45° | 4,271 | 2,580 | –10,987 | 2,862 |
| | 60° | 6,975 | 6,508 | –31,001 | 7,220 |
| 0,48 | 15° | 6,079 | 0,217 | –1,750 | 0,227 |
| | 30° | 3,914 | 0,956 | –4,258 | 1,000 |
| | 45° | 4,152 | 2,591 | –10,463 | 2,711 |
| | 60° | 6,780 | 6,536 | –29,453 | 6,838 |
| 0,49 | 15° | 5,908 | 0,218 | –1,737 | 0,216 |
| | 30° | 3,805 | 0,960 | –4,085 | 0,947 |
| | 45° | 4,035 | 2,602 | –9,967 | 2,568 |
| | 60° | 6,590 | 6,563 | –27,995 | 6,479 |
| 0,50 | 15° | 5,741 | 0,219 | –1,721 | 0,204 |
| | 30° | 3,697 | 0,964 | –3,920 | 0,898 |
| | 45° | 3,921 | 2,613 | –9,499 | 2,434 |
| | 60° | 6,403 | 6,591 | –20,619 | 6,141 |
| 0,51 | 15° | 5,577 | 0,220 | –1,702 | 0,194 |
| | 30° | 3,591 | 0,968 | –3,763 | 0,852 |
| | 45° | 3,809 | 2,623 | –9,055 | 2,306 |
| | 60° | 6,220 | 6,618 | –25,320 | 5,823 |

*Продолжение таблицы А.2*

| $\beta_р$ | $\beta_0$ | $A_{р1}$ | $A_{р2}$ | $B_{р1}$ | $B_{р2}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,52 | 15° | 5,416 | 0,221 | –1,682 | 0,184 |
| | 30° | 3,488 | 0,972 | –3,612 | 0,808 |
| | 45° | 3,699 | 2,634 | –8,635 | 2,190 |
| | 60° | 6,041 | 6,645 | –24,091 | 5,524 |
| 0,53 | 15° | 5,258 | 0,222 | –1,659 | 0,174 |
| | 30° | 3,386 | 0,976 | –3,468 | 0,766 |
| | 45° | 3,591 | 2,645 | –8,236 | 2,077 |
| | 60° | 5,865 | 6,672 | –22,927 | 5,241 |
| 0,54 | 15° | 5,103 | 0,223 | –1,634 | 0,165 |
| | 30° | 3,286 | 0,979 | –3,330 | 0,727 |
| | 45° | 3,486 | 2,655 | –7,856 | 1,971 |
| | 60° | 5,692 | 6,698 | –21,824 | 4,973 |
| 0,55 | 15° | 4,951 | 0,224 | –1,608 | 0,157 |
| | 30° | 3,188 | 0,983 | –3,197 | 0,690 |
| | 45° | 3,382 | 2,665 | –7,496 | 1,871 |
| | 60° | 5,523 | 6,724 | –20,778 | 4,720 |
| 0,56 | 15° | 4,802 | 0,225 | –1,581 | 0,149 |
| | 30° | 3,092 | 0,987 | –3,070 | 0,655 |
| | 45° | 3,290 | 2,676 | –7,152 | 1,776 |
| | 60° | 5,356 | 6,750 | –19,784 | 4,481 |
| 0,57 | 15° | 4,656 | 0,225 | –1,552 | 0,141 |
| | 30° | 2,998 | 0,991 | –2,947 | 0,622 |
| | 45° | 3,180 | 2,686 | –6,825 | 1,686 |
| | 60° | 5,193 | 6,776 | –18,839 | 4,254 |
| 0,58 | 15° | 4,512 | 0,226 | –1,522 | 0,134 |
| | 30° | 2,905 | 0,995 | –2,829 | 0,591 |
| | 45° | 3,081 | 2,696 | –6,512 | 1,601 |
| | 60° | 5,032 | 6,801 | –17,939 | 4,038 |
| 0,59 | 15° | 4,370 | 0,227 | –1,491 | 0,128 |
| | 30° | 2,814 | 0,998 | –2,716 | 0,561 |
| | 45° | 2,985 | 2,706 | –6,214 | 1,520 |
| | 60° | 4,874 | 6,826 | –17,082 | 3,834 |
| 0,60 | 15° | 4,231 | 0,228 | –1,459 | 0,121 |
| | 30° | 2,724 | 1,002 | –2,606 | 0,532 |
| | 45° | 2,890 | 2,716 | –5,929 | 1,443 |
| | 60° | 4,719 | 6,851 | –16,264 | 3,639 |
| 0,61 | 15° | 4,094 | 0,229 | –1,426 | 0,115 |
| | 30° | 2,636 | 1,006 | –2,500 | 0,505 |
| | 45° | 2,796 | 2,726 | –5,656 | 1,369 |
| | 60° | 4,566 | 6,876 | –15,484 | 3,454 |
| 0,62 | 15° | 3,959 | 0,230 | –1,393 | 0,109 |
| | 30° | 2,550 | 1,009 | –2,398 | 0,479 |
| | 45° | 2,704 | 2,736 | –5,394 | 1,300 |
| | 60° | 4,416 | 6,901 | –14,739 | 3,278 |
| 0,63 | 15° | 3,827 | 0,230 | –1,359 | 0,103 |
| | 30° | 2,464 | 1,013 | –2,299 | 0,455 |
| | 45° | 2,614 | 2,745 | –5,144 | 1,233 |
| | 60° | 4,268 | 6,925 | –14,026 | 3,111 |

*Продолжение таблицы А.2*

| $\beta_\mu$ | $\beta_0$ | $A_{p1}$ | $A_{p2}$ | $B_{p1}$ | $B_{p2}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,64 | 15° | 3,696 | 0,231 | –1,324 | 0,098 |
| | 30° | 2,380 | 1,016 | –2,204 | 0,431 |
| | 45° | 2,525 | 2,755 | –4,903 | 1,170 |
| | 60° | 4,123 | 6,950 | –13,344 | 2,951 |
| 0,65 | 15° | 3,568 | 0,232 | –1,289 | 0,093 |
| | 30° | 2,298 | 1,020 | –2,111 | 0,409 |
| | 45° | 2,437 | 2,764 | –4,672 | 1,109 |
| | 60° | 3,979 | 6,974 | –12,691 | 2,798 |
| 0,66 | 15° | 3,441 | 0,233 | –1,253 | 0,088 |
| | 30° | 2,216 | 1,023 | –2,021 | 0,388 |
| | 45° | 2,351 | 2,774 | –4,451 | 1,051 |
| | 60° | 3,838 | 6,997 | –12,065 | 2,652 |
| 0,67 | 15° | 3,317 | 0,234 | –1,217 | 0,084 |
| | 30° | 2,136 | 1,027 | –1,935 | 0,367 |
| | 45° | 2,265 | 2,783 | –4,237 | 0,996 |
| | 60° | 3,699 | 7,021 | –11,465 | 2,513 |
| 0,68 | 15° | 3,194 | 0,234 | –1,181 | 0,079 |
| | 30° | 2,057 | 1,030 | –1,850 | 0,348 |
| | 45° | 2,182 | 2,792 | –4,032 | 0,943 |
| | 60° | 3,563 | 7,045 | –10,889 | 2,380 |
| 0,69 | 15° | 3,073 | 0,235 | –1,144 | 0,075 |
| | 30° | 1,979 | 1,034 | –1,768 | 0,329 |
| | 45° | 2,099 | 2,802 | –3,834 | 0,893 |
| | 60° | 3,428 | 7,068 | –10,336 | 2,253 |
| 0,70 | 15° | 2,954 | 0,236 | –1,107 | 0,071 |
| | 30° | 1,902 | 1,037 | –1,689 | 0,312 |
| | 45° | 2,018 | 2,811 | –3,644 | 0,845 |
| | 60° | 3,295 | 7,091 | –9,804 | 2,131 |
| 0,71 | 15° | 2,837 | 0,237 | –1,070 | 0,067 |
| | 30° | 1,827 | 1,040 | –1,611 | 0,294 |
| | 45° | 1,937 | 2,820 | –3,460 | 0,798 |
| | 60° | 3,164 | 7,114 | –9,293 | 2,014 |
| 0,72 | 15° | 2,721 | 0,237 | –1,033 | 0,063 |
| | 30° | 1,752 | 1,044 | –1,536 | 0,278 |
| | 45° | 1,858 | 2,829 | –3,283 | 0,754 |
| | 60° | 3,035 | 7,137 | –8,801 | 1,902 |
| 0,73 | 15° | 2,606 | 0,238 | –0,995 | 0,060 |
| | 30° | 1,678 | 1,047 | –1,463 | 0,262 |
| | 45° | 1,780 | 2,838 | –3,112 | 0,711 |
| | 60° | 2,907 | 7,160 | –8,327 | 1,794 |
| 0,74 | 15° | 2,494 | 0,239 | –0,958 | 0,056 |
| | 30° | 1,606 | 1,050 | –1,391 | 0,247 |
| | 45° | 1,703 | 2,847 | –2,946 | 0,670 |
| | 60° | 2,782 | 7,182 | –7,870 | 1,691 |
| 0,75 | 15° | 2,383 | 0,240 | –0,920 | 0,053 |
| | 30° | 1,534 | 1,054 | –1,322 | 0,233 |
| | 45° | 1,627 | 2,856 | –2,786 | 0,631 |
| | 60° | 2,658 | 7,204 | –7,430 | 1,592 |

*Окончание таблицы А.2*

| $\beta_p$ | $\beta_0$ | $A_{p1}$ | $A_{p2}$ | $B_{p1}$ | $B_{p2}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,76 | 15° | 2,273 | 0,240 | –0,882 | 0,050 |
| | 30° | 1,464 | 1,057 | –1,254 | 0,219 |
| | 45° | 1,552 | 2,865 | –2,632 | 0,593 |
| | 60° | 2,535 | 7,227 | –7,005 | 1,497 |
| 0,77 | 15° | 2,165 | 0,241 | –0,845 | 0,047 |
| | 30° | 1,394 | 1,060 | –1,188 | 0,206 |
| | 45° | 1,479 | 2,873 | –2,482 | 0,557 |
| | 60° | 2,414 | 7,249 | –6,595 | 1,406 |
| 0,78 | 15° | 2,058 | 0,242 | –0,807 | 0,044 |
| | 30° | 1,325 | 1,063 | –1,123 | 0,193 |
| | 45° | 1,406 | 2,882 | –2,337 | 0,522 |
| | 60° | 2,295 | 7,271 | –6,199 | 1,318 |
| 0,79 | 15° | 1,952 | 0,243 | –0,769 | 0,041 |
| | 30° | 1,257 | 1,066 | –1,060 | 0,180 |
| | 45° | 1,333 | 2,891 | –2,197 | 0,489 |
| | 60° | 2,178 | 7,292 | –5,817 | 1,233 |
| 0,80 | 15° | 1,848 | 0,243 | –0,732 | 0,038 |
| | 30° | 1,190 | 1,070 | –0,998 | 0,168 |
| | 45° | 1,262 | 2,899 | –2,060 | 0,456 |
| | 60° | 2,061 | 7,314 | –5,447 | 1,151 |
| 0,81 | 15° | 1,745 | 0,244 | –0,694 | 0,036 |
| | 30° | 1,124 | 1,073 | –0,938 | 0,157 |
| | 45° | 1,192 | 2,908 | –1,928 | 0,425 |
| | 60° | 1,947 | 7,336 | –5,090 | 1,073 |
| 0,82 | 15° | 1,644 | 0,245 | –0,656 | 0,033 |
| | 30° | 1,058 | 1,076 | –0,879 | 0,146 |
| | 45° | 1,123 | 2,916 | –1,800 | 0,395 |
| | 60° | 1,833 | 7,357 | –4,743 | 0,997 |
| 0,83 | 15° | 1,543 | 0,245 | –0,619 | 0,031 |
| | 30° | 0,994 | 1,079 | –0,822 | 0,135 |
| | 45° | 1,054 | 2,925 | –1,676 | 0,366 |
| | 60° | 1,721 | 7,378 | –4,408 | 0,924 |
| 0,84 | 15° | 1,444 | 0,246 | –0,581 | 0,028 |
| | 30° | 0,930 | 1,082 | –0,766 | 0,125 |
| | 45° | 0,986 | 2,933 | –1,555 | 0,339 |
| | 60° | 1,611 | 7,399 | –4,084 | 0,854 |
| 0,85 | 15° | 1,346 | 0,247 | –0,544 | 0,026 |
| | 30° | 0,867 | 1,085 | –0,710 | 0,115 |
| | 45° | 0,919 | 2,941 | –1,437 | 0,312 |
| | 60° | 1,501 | 7,420 | –3,769 | 0,786 |

**Приложение Б**
**(обязательное)**

## Коэффициенты влияния перфорации на параметры трубной решетки

Б.1 Коэффициент ослабления трубной решетки при расчете кожухотрубчатых теплообменных аппаратов с неподвижными трубными решетками и компенсатором на кожухе вычисляют по формуле

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_0}{t_p}. \qquad (Б.1)$$

Б.2 Эффективный коэффициент ослабления $\varphi_E$ при расчете кожухотрубчатых теплообменных аппаратов с плавающей головкой, U-образными трубами и аппаратов воздушного охлаждения вычисляют по формуле

$$\varphi_E = 1 - \frac{d_E}{t_p}. \qquad (Б.2)$$

где $d_E = d_0 - 2s_т$ — для решеток с трубами, закрепленными на всю толщину решетки;

$d_E = d_0 - s_т$ — для решеток с трубами, закрепленными в части толщины решетки;

$d_E = d_0$ — для стальных решеток с трубами из цветных металлов;

$d_E = d_{пр}$ — для перфорированной задней стенки аппаратов воздушного охлаждения.

Б.3 Коэффициент жесткости перфорированной плиты $\psi_0$ в зависимости от $\eta_т$ приведен в таблице Б.1.

Таблица Б.1 — Коэффициент жесткости перфорированной плиты $\psi_0$

| $\eta_т$ | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\psi_0$ | 0,12 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,37 | 0,44 | 0,51 | 0,59 | 0,68 |

**Приложение В**
**(обязательное)**

## Определение коэффициентов системы кожух — решетка, обечайка — фланец камеры и коэффициента жесткости фланцевого соединения при изгибе

Коэффициенты системы кожух — решетка, обечайка — фланец камеры и коэффициент жесткости фланцевого соединения при изгибе вычисляют по формулам:

$$\beta_1 = \frac{1{,}3}{\sqrt{as_1}}, \tag{В.1}$$

$$\beta_2 = \frac{1{,}3}{\sqrt{as_2}}, \tag{В.2}$$

$$K_1 = \frac{\beta_1 a E_к s_1^3}{5{,}5 R_1}, \tag{В.3}$$

$$K_2 = \frac{\beta_2 a E_D s_2^3}{5{,}5 R_2}, \tag{В.4}$$

$$K_{Ф1} = \frac{E_1 h_1^3 B_1}{12 R_1^2} + K_1\left(1 + \frac{\beta_1 h_1}{2}\right), \tag{В.5}$$

$$K_{Ф2} = \frac{E_2 h_2^3 B_2}{12 R_2^2} + K_2\left(1 + \frac{\beta_2 h_2}{2}\right), \tag{В.6}$$

$$K_Ф = K_{Ф1} + K_{Ф2}. \tag{В.7}$$

**Приложение Г**
**(обязательное)**

## Коэффициенты $T_1$, $T_2$, $T_3$, $A$ и $B$, используемые в формулах для определения сил и моментов в элементах кожухотрубчатых теплообменных аппаратов

Коэффициенты $T_1$, $T_2$, $T_3$ в зависимости от $\omega$ и $m_n$ приведены в таблице Г.1, коэффициент А в зависимости от $\omega$ и $m_A$ — в таблице Г.2, коэффициент В в зависимости от $\omega$ и $n_B$ — в таблице Г.3

Таблица Г.1 — Коэффициенты $T_1$, $T_2$, $T_3$

| $m_n$ | $\omega$ | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 10,0 |
| $T_1$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,0 | 2,00 | 2,00 | 2,06 | 2,28 | 2,79 | 3,58 | 4,50 | 5,39 | 6,19 | 7,65 | 9,08 | 10,5 | 11,9 | 13,4 | 14,8 |
| 1,1 | 2,20 | 2,35 | 2,59 | 3,07 | 4,02 | 5,51 | 7,39 | 9,44 | 11,6 | 16,2 | 21,6 | 28,1 | 35,6 | 44,3 | 54,3 |
| 1,2 | 2,40 | 2,73 | 3,21 | 4,04 | 5,61 | 8,14 | 11,5 | 15,5 | 19,8 | 30,2 | 43,4 | 60,0 | 80,4 | 105 | 134 |
| 1,3 | 2,60 | 3,14 | 3,92 | 5,22 | 7,64 | 11,6 | 17,1 | 23,9 | 31,6 | 50,8 | 76,3 | 109 | 151 | 202 | 263 |
| 1,4 | 2,80 | 3,59 | 4,74 | 6,65 | 10,2 | 16,0 | 24,4 | 35,0 | 47,5 | 79,2 | 122 | 179 | 251 | 341 | 450 |
| 1,5 | 3,00 | 4,07 | 5,67 | 8,35 | 13,3 | 21,6 | 33,7 | 49,3 | 68,0 | 116 | 183 | 273 | 387 | 529 | 703 |
| $T_2$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,0 | 0,00 | 0,02 | 0,19 | 0,62 | 1,32 | 2,16 | 2,94 | 3,59 | 4,13 | 5,13 | 6,13 | 7,17 | 8,19 | 9,20 | 10,2 |
| 1,1 | 0,00 | 0,02 | 0,22 | 0,75 | 1,69 | 2,92 | 4,18 | 5,36 | 6,46 | 8,75 | 11,3 | 14,2 | 17,4 | 20,9 | 24,6 |
| 1,2 | 0,00 | 0,02 | 0,24 | 0,88 | 2,06 | 3,68 | 5,43 | 7,13 | 8,79 | 12,4 | 16,6 | 21,3 | 26,7 | 32,5 | 39,0 |
| 1,3 | 0,00 | 0,02 | 0,27 | 1,01 | 2,44 | 4,44 | 6,67 | 8,90 | 11,1 | 16,0 | 21,8 | 28,4 | 35,9 | 44,2 | 53,4 |
| 1,4 | 0,00 | 0,03 | 0,30 | 1,14 | 2,81 | 5,21 | 7,91 | 10,7 | 13,4 | 19,6 | 27,0 | 35,5 | 45,1 | 55,9 | 67,8 |
| 1,5 | 0,00 | 0,03 | 0,32 | 1,28 | 3,18 | 5,97 | 9,16 | 12,4 | 15,8 | 23,2 | 32,2 | 42,5 | 54,4 | 67,6 | 82,2 |
| $T_3$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,0 | 0,00 | 0,19 | 0,76 | 1,65 | 2,75 | 3,76 | 4,65 | 5,36 | 6,03 | 7,38 | 8,81 | 10,2 | 11,7 | 13,1 | 14,5 |
| 1,1 | 0,00 | 0,21 | 0,84 | 1,81 | 3,02 | 4,14 | 5,11 | 5,90 | 6,63 | 8,12 | 9,69 | 11,3 | 12,8 | 14,4 | 15,9 |
| 1,2 | 0,00 | 0,23 | 0,91 | 1,98 | 3,30 | 4,51 | 5,58 | 6,43 | 7,24 | 8,86 | 10,6 | 12,3 | 14,0 | 15,7 | 17,4 |
| 1,3 | 0,00 | 0,25 | 0,99 | 2,14 | 3,57 | 4,89 | 6,04 | 6,97 | 7,84 | 9,59 | 11,4 | 13,3 | 15,2 | 17,0 | 18,8 |
| 1,4 | 0,00 | 0,27 | 1,06 | 2,31 | 3,85 | 5,26 | 6,51 | 7,50 | 8,44 | 10,3 | 12,3 | 14,3 | 16,3 | 18,3 | 20,3 |
| 1,5 | 0,00 | 0,28 | 1,14 | 2,47 | 4,12 | 5,64 | 6,97 | 8,04 | 9,04 | 11,1 | 13,2 | 15,4 | 17,5 | 19,6 | 21,7 |

Таблица Г.2 — Коэффициент *A*

| $m_A$ | ∞ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | ≥ 10 |
| –1,0 | 0,726 | 0,754 | 0,783 | 0,813 | 0,858 | 0,878 | 0,885 | 0,898 |
| –0,9 | 0,656 | 0,683 | 0,712 | 0,740 | 0,781 | 0,797 | 0,802 | 0,811 |
| –0,8 | 0,586 | 0,613 | 0,641 | 0,668 | 0,705 | 0,716 | 0,720 | 0,724 |
| –0,7 | 0,516 | 0,543 | 0,570 | 0,596 | 0,628 | 0,636 | 0,637 | 0,637 |
| –0,6 | 0,446 | 0,473 | 0,500 | 0,524 | 0,551 | 0,555 | 0,554 | 0,550 |
| –0,5 | 0,376 | 0,403 | 0,429 | 0,451 | 0,474 | 0,474 | 0,471 | 0,463 |
| –0,4 | 0,306 | 0,333 | 0,358 | 0,379 | 0,397 | 0,393 | 0,388 | 0,376 |
| –0,3 | 0,236 | 0,262 | 0,287 | 0,307 | 0,320 | 0,313 | 0,305 | 0,289 |
| –0,2 | 0,166 | 0,192 | 0,274 | 0,355 | 0,305 | 0,273 | 0,289 | 0,308 |
| –0,1 | 0,096 | 0,216 | 0,338 | 0,408 | 0,337 | 0,319 | 0,338 | 0,359 |
| 0 | 0,144 | 0,284 | 0,402 | 0,461 | 0,376 | 0,370 | 0,392 | 0,414 |
| 0,1 | 0,214 | 0,353 | 0,466 | 0,514 | 0,420 | 0,426 | 0,450 | 0,474 |
| 0,2 | 0,284 | 0,422 | 0,530 | 0,567 | 0,470 | 0,485 | 0,511 | 0,537 |
| 0,3 | 0,354 | 0,491 | 0,593 | 0,620 | 0,523 | 0,546 | 0,575 | 0,603 |
| 0,4 | 0,424 | 0,559 | 0,657 | 0,672 | 0,580 | 0,610 | 0,641 | 0,671 |
| 0,5 | 0,494 | 0,628 | 0,721 | 0,725 | 0,639 | 0,677 | 0,709 | 0,742 |
| 0,6 | 0,564 | 0,697 | 0,785 | 0,778 | 0,701 | 0,745 | 0,779 | 0,814 |
| 0,7 | 0,634 | 0,766 | 0,849 | 0,831 | 0,765 | 0,814 | 0,851 | 0,888 |
| 0,8 | 0,704 | 0,834 | 0,913 | 0,884 | 0,830 | 0,885 | 0,923 | 0,963 |
| 0,9 | 0,773 | 0,903 | 0,977 | 0,937 | 0,896 | 0,956 | 0,997 | 1,040 |
| 1,0 | 0,843 | 0,972 | 1,041 | 0,991 | 0,964 | 1,030 | 1,071 | 1,117 |

Таблица Г.3 — Коэффициент *B*

| $m_B$ | ∞ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | ≥ 10 |
| 1,0 | 0,843 | 0,972 | 1,041 | 0,991 | 0,964 | 1,029 | 1,071 | 1,117 |
| 0,9 | 0,829 | 0,943 | 1,000 | 0,949 | 0,940 | 1,000 | 1,040 | 1,083 |
| 0,8 | 0,815 | 0,914 | 0,960 | 0,908 | 0,910 | 0,971 | 1,009 | 1,051 |
| 0,7 | 0,800 | 0,886 | 0,920 | 0,871 | 0,884 | 0,944 | 0,979 | 1,020 |
| 0,6 | 0,786 | 0,858 | 0,880 | 0,836 | 0,860 | 0,918 | 0,951 | 0,990 |
| 0,5 | 0,771 | 0,829 | 0,840 | 0,804 | 0,839 | 0,894 | 0,925 | 0,963 |
| 0,4 | 0,757 | 0,801 | 0,799 | 0,777 | 0,819 | 0,871 | 0,900 | 0,938 |
| 0,3 | 0,742 | 0,773 | 0,761 | 0,754 | 0,802 | 0,852 | 0,878 | 0,915 |
| 0,2 | 0,728 | 0,744 | 0,732 | 0,737 | 0,789 | 0,835 | 0,860 | 0,896 |
| 0,1 | 0,714 | 0,716 | 0,714 | 0,727 | 0,780 | 0,823 | 0,846 | 0,882 |
| 0 | 0,700 | 0,702 | 0,709 | 0,725 | 0,776 | 0,816 | 0,837 | 0,874 |
| –0,1 | 0,703 | 0,707 | 0,716 | 0,732 | 0,778 | 0,815 | 0,835 | 0,873 |
| –0,2 | 0,705 | 0,712 | 0,723 | 0,741 | 0,787 | 0,821 | 0,841 | 0,876 |
| –0,3 | 0,708 | 0,717 | 0,730 | 0,750 | 0,796 | 0,828 | 0,846 | 0,879 |
| –0,4 | 0,711 | 0,722 | 0,738 | 0,759 | 0,805 | 0,835 | 0,852 | 0,882 |
| –0,5 | 0,713 | 0,728 | 0,745 | 0,768 | 0,814 | 0,842 | 0,857 | 0,884 |
| –0,6 | 0,716 | 0,733 | 0,753 | 0,777 | 0,823 | 0,850 | 0,863 | 0,887 |
| –0,7 | 0,718 | 0,738 | 0,760 | 0,786 | 0,832 | 0,857 | 0,869 | 0,890 |
| –0,8 | 0,721 | 0,743 | 0,768 | 0,795 | 0,841 | 0,864 | 0,874 | 0,893 |
| –0,9 | 0,723 | 0,748 | 0,775 | 0,804 | 0,849 | 0,871 | 0,880 | 0,895 |
| –1,0 | 0,726 | 0,754 | 0,783 | 0,813 | 0,858 | 0,878 | 0,885 | 0,898 |

**Приложение Д**
**(обязательное)**

## Определение допускаемой амплитуды условных упругих напряжений при работе материала в условиях ползучести

При температуре рассчитываемых элементов теплообменных аппаратов из низколегированных и коррозионно-стойких хромистых сталей от 420 °С до 500 °С допускается определять $[\sigma_A]$ по графику, приведенному на рисунке Д.1.

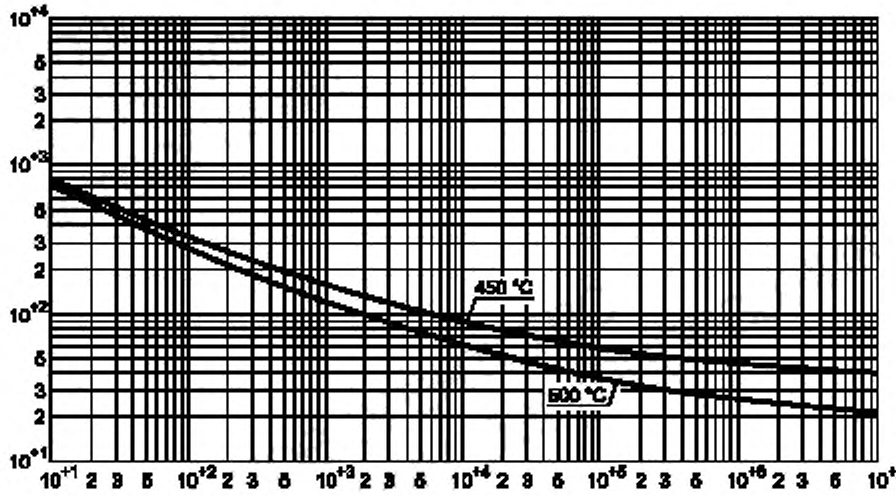



Рисунок Д.1 — Расчетные кривые усталости для низколегированных и коррозионно-стойких хромистых сталей при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

При температурах рассчитываемых элементов из аустенитных сталей от 525 °С до 600 °С допускается определять $[\sigma_A]$ по графику, приведенному на рисунке Д.2.

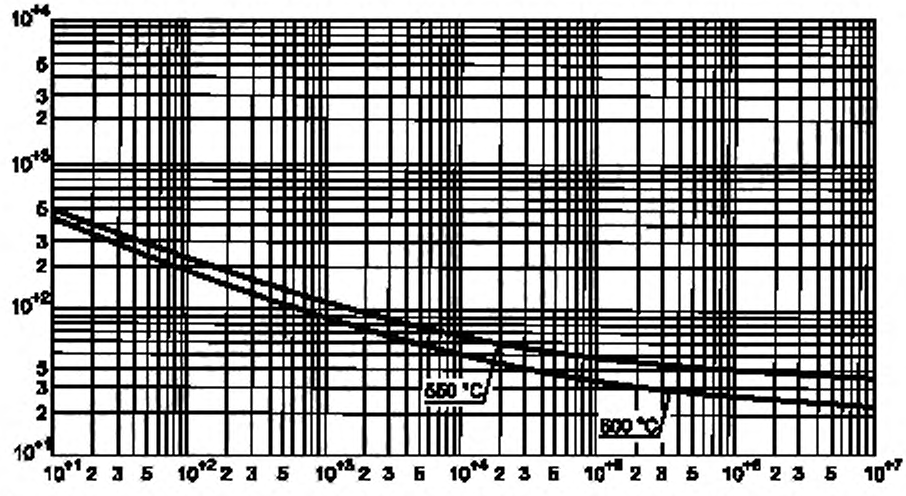



Рисунок Д.2 — Расчетные кривые усталости коррозионно-стойких сталей аустенитного класса при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

Если температура рассматриваемых элементов из углеродистых сталей превышает 380 °С, из низколегированных коррозионно-стойких хромистых сталей — 500 °С и из аустенитных сталей — 600 °С, следует при выполнении расчета элементов теплообменных аппаратов на малоцикловую усталость принимать:

$$[\sigma_д] = 0{,}65\,[\sigma], \qquad (Д.1)$$

где [σ] — допускаемое напряжение по ГОСТ Р 52857.2 для рассчитываемого элемента при расчетной температуре.

**Приложение Е**
**(справочное)**

## Допускаемая нагрузка на вальцовочное соединение трубы с решеткой

При отсутствии более точных данных допускается вычислять допускаемую нагрузку на вальцовочное соединение трубы с решеткой по формулам:

- для гладкозавальцованных труб:

$$[N]_{тр} = 0{,}5\pi\, s_т\,(d_т - s_т)\min\left\{\frac{l_в}{d_т}; 1{,}6\right\}\min\left\{[\sigma]_т; [\sigma]_р\right\}. \qquad (Е.1)$$

- для труб, завальцованных в пазы при наличии одного паза:

$$[N]_{тр} = 0{,}6\pi\, s_т\,(d_т - s_т)\min\left\{[\sigma]_т; [\sigma]_р\right\}, \qquad (Е.2)$$

но не менее, чем для такого же соединения гладкозавальцованных труб;

- для труб, завальцованных в пазы с двумя или более пазами:

$$[N]_{тр} = 0{,}8\pi\, s_т\,(d_т - s_т)\min\left\{[\sigma]_т; [\sigma]_р\right\}. \qquad (Е.3)$$

**Приложение Ж**
**(обязательное)**

## Определение вспомогательных величин для расчета аппаратов воздушного охлаждения

### Ж.1 Геометрические характеристики решетки

Ж.1.1 Расчетный поперечный размер решетки вычисляют по формулам:
- для камер разъемной конструкции (см. рисунки 15—18):

$$B_p = B_2 - b_0; \quad (Ж.1)$$

- для камер неразъемной конструкции без перегородок (см. рисунки 20—22):

$$B_p = B_0; \quad (Ж.2)$$

- для камер неразъемной конструкции с перегородками (см. рисунки 23—24):

$$B_p = \max\{b_i\}. \quad (Ж.3)$$

Ж.1.2 Расчетный размер решетки в продольном направлении вычисляют по формулам:
- для камер разъемной конструкции (см. рисунки 15—18):

$$L_p = L_2 - b_0; \quad (Ж.4)$$

- для камер неразъемной конструкции без перегородок (см. рисунки 20—24):

$$L_p = L_0. \quad (Ж.5)$$

Ж.1.3 Расчетную ширину перфорированной зоны решетки вычисляют по формуле

$$B_T = \min\{zt_2; B_p\}, \quad (Ж.6)$$

где $t_2$ — см. рисунки Ж.1 и Ж.2.

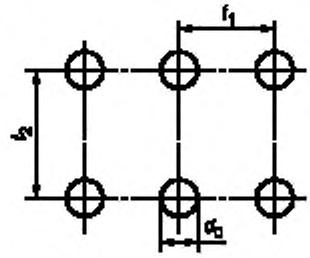



Рисунок Ж.1 — Расположение отверстий по вершинам прямоугольников

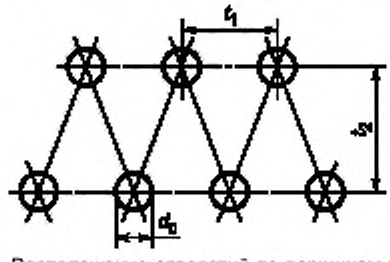



Рисунок Ж.2 — Расположение отверстий по вершинам треугольников

Ж.1.4 Относительную ширину беструбного края вычисляют по формуле

$$\lambda_p = \frac{B_p - B_т}{B_т}. \qquad (Ж.7)$$

Ж.2 Вспомогательные коэффициенты вычисляют по формулам:

$$\upsilon = \frac{\pi (d_т - s_т) s_т}{t_1 t_2}, \qquad (Ж.8)$$

$$\eta = 1 - \frac{\pi}{4} \frac{(d_т - 2s_т)^2}{t_1 t_2}, \qquad (Ж.9)$$

где $t_1$ — см. рисунки Ж.1 и Ж.2.

**Ж.3 Допускаемая нагрузка на единицу площади сечения трубного пучка**

Ж.3.1 Допускаемую нагрузку из условия прочности труб вычисляют по формуле:

$$[q] = \upsilon \left(1 - \frac{d_т - s_т}{2s_т} \frac{P}{[\sigma]_т}\right) [\sigma]_т. \qquad (Ж.10)$$

Ж.3.2 Допускаемую нагрузку из условия прочности крепления трубы в решетке вычисляют по формулам:

- для развальцовки:

$$[q]_s = [q]_{s1} = \frac{[N]_{тр}}{t_1 t_2}; \qquad (Ж.11)$$

- для приварки:

$$[q]_s = [q]_{s2} = \frac{\varphi_c \min\left\{[\sigma]_т; [\sigma]_p\right\} \pi d_т^2 \delta}{t_1 t_2}; \qquad (Ж.12)$$

- для развальцовки с обваркой:

$$[q]_s = \max\left\{[q]_{s2} + 0{,}6[q]_{s1}; [q]_{s1}\right\}, \qquad (Ж.13)$$

где $\varphi_c$ — коэффициент прочности шва приварки трубы к решетке, определяемый по 5.2.7.5.

Ж.4 Плечи изгибающих моментов в камерах (см. рисунки 15—18) вычисляют по формулам:

$$l_1 = 0{,}5\,(B_3 - B_p), \qquad (Ж.14)$$

$$l_2 = 0{,}5\,(B_3 - B_2). \qquad (Ж.15)$$

**Приложение И**
**(обязательное)**

## Коэффициенты податливости элементов аппаратов воздушного охлаждения

И.1 Угловые податливости крышки от действия внутреннего давления и от действия болтового изгибающего момента вычисляют по формулам:

- от действия внутреннего давления:

$$y_{\text{к}}^{p}=10{,}9\frac{B_0^3}{Es_{4A}^3}\left\{\left[\varphi_1+(\varphi_2-\varphi_3)\left(\frac{s_{4A}}{s_{5A}}\right)^3\right]\lambda_1+\frac{1}{8}\left[\varphi_4+(\varphi_5-\varphi_6)\left(\frac{s_{4A}}{s_{5A}}\right)^3\right]\psi_{\text{кр}}\lambda_2\right\}; \quad (\text{И.1})$$

- от действия болтового изгибающего момента:

$$y_{\text{к}}^{M}=10{,}9\frac{B_0}{2E_{\text{к}}s_{4A}^3\left(L_{\text{р}}-B_{\text{р}}\right)}\left[\varphi_4+(\varphi_5-\varphi_6)\left(\frac{s_{4A}}{s_{5A}}\right)^3\right]\lambda_2, \quad (\text{И.2})$$

где коэффициенты $\varphi_1-\varphi_6$ вычисляют по формулам:

$$\varphi_1=1+0{,}85\frac{R^2}{B_0^2}-12{,}55\frac{R^3}{B_0^3}+13{,}70\frac{H}{B_0}\frac{R^2}{B_0^2}, \quad (\text{И.3})$$

$$\varphi_2=8\frac{H^3}{B_0^3}-12\frac{H}{B_0}\frac{R^2}{B_0^2}+4\frac{R^3}{B_0^3}, \quad (\text{И.4})$$

$$\varphi_3=12\frac{H^2}{B_0^2}\frac{s_{6A}}{B_0}-4\frac{s_{6A}^3}{B_0^3}, \quad (\text{И.5})$$

$$\varphi_4=1-1{,}14\frac{R}{B_0}, \quad (\text{И.6})$$

$$\varphi_5=2\frac{H}{B_0}-2\frac{R}{B_0}, \quad (\text{И.7})$$

$$\varphi_6=2\frac{s_{6A}}{B_0}. \quad (\text{И.8})$$

В формулах (И.3), (И.4), (И.6), (И.7) для крышек по рисунку 15 следует подставлять $\frac{R}{B_0}=0$.

$\lambda_1$ — коэффициент, определяемый в зависимости от $L_0/B_0$ и $\eta_{\text{к}}$ по графику, приведенному на рисунке И.1,

$\lambda_2$ — коэффициент, определяемый в зависимости от $L_0/B_0$ и $\eta_{\text{к}}$ по графику, приведенному на рисунке И.2,

где $$\eta_{\text{к}}=4{,}4\frac{s_{4A}}{L_0}\left[\left(\frac{B_4-B_0}{2s_{6A}}-0{,}63\right)\left(\frac{s_{6A}}{s_{4A}}\right)^4+\left(\frac{H+s_{5A}-s_{6A}}{s_{4A}}-0{,}63\right)\left(\frac{s_{5A}}{s_{4A}}\right)^4\right]. \quad (\text{И.9})$$

$\psi_{\text{кр}}$ — коэффициент, вычисляемый по формуле (106).

И.2 Угловые податливости решетки от действия внутреннего давления и болтового изгибающего момента вычисляют по формулам

- от действия внутреннего давления:

$$y_{\text{р}}^{p}=0{,}23\frac{B_{\text{т}}^3}{E_{\text{р}}s_{1A}^3}\left[\lambda_{\text{р}}\left(2\psi_{\text{р}}+\lambda_{\text{р}}\right)\left(\frac{s_{1A}}{s_{3A}}\right)^3+1{,}7\left(\psi_{\text{р}}\,\alpha_1+4\alpha_2\right)\right]; \quad (\text{И.10})$$

- от действия болтового изгибающего момента:

$$y_p^M = 2{,}7\frac{B_т}{2E_p s_{1A}^3\left(L_p + B_p\right)}\left[2\lambda_p\left(\frac{s_{1A}}{s_{3A}}\right)^3 + 1{,}1\alpha_1\right], \qquad (И.11)$$

где $\alpha_1$ — коэффициент, определяемый в зависимости от $\omega$ по графику, приведенному на рисунке И.3,

$\alpha_2$ — коэффициент, определяемый в зависимости от $\omega$ по графику, приведенному на рисунке И.4.

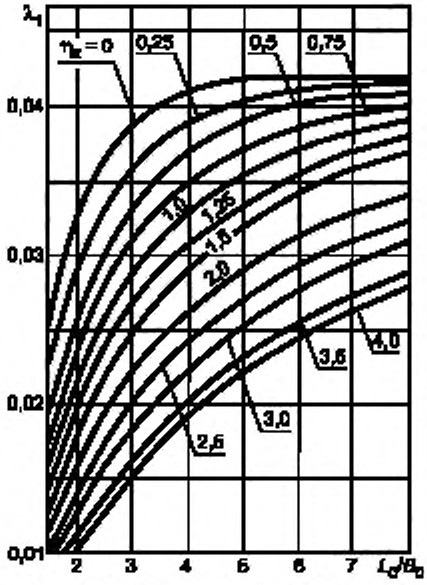



Рисунок И.1 — График коэффициента $\lambda_1$

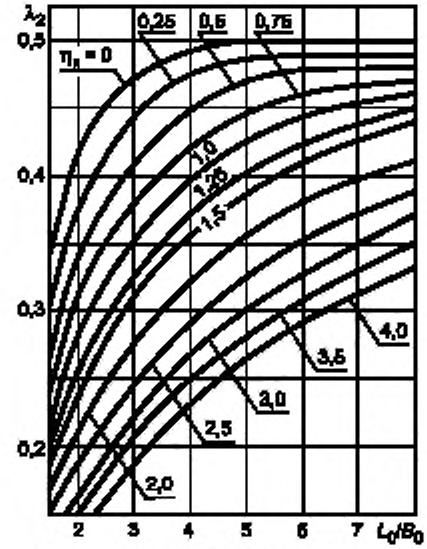



Рисунок И.2 — График коэффициента $\lambda_2$

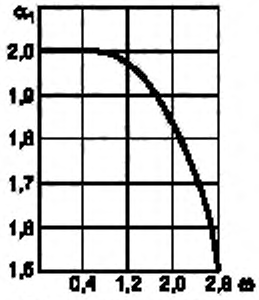



Рисунок И.3 — График коэффициента $\alpha_1$

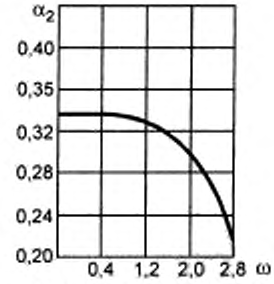



Рисунок И.4 — График коэффициента $\alpha_2$

$\lambda_p$, $\psi_p$, $\omega$ — коэффициенты, вычисляемые по формулам (Ж.5), (95) и (103).

И.3 Линейную податливость шпилек (болтов) $y_б$ определяют по ГОСТ Р 52857.4.

И.4 Линейную податливость прокладки вычисляют по формуле

$$y_п = \frac{h_п}{2E_п\left(L_p + B_p\right)b_п}. \qquad (И.12)$$

И.5 Коэффициент податливости фланцевого соединения крышки и решетки вычисляют по формуле

$$\eta_p = \frac{y_б + \left(y_к^M + y_p^M\right)l_1^2 + \dfrac{y_к^p + y_p^p}{L_p B_p}l_t}{y_б + y_п + \left(y_к^M + y_p^M\right)l_1^2}. \qquad (И.13)$$

**Приложение К**
**(справочное)**

## Расчетные зависимости для определения величин, приведенных в таблицах и на графиках

$$\psi_0 = \eta_\tau^{7/3};$$

$$\Phi_1 = \frac{\omega}{T_\Phi}\left[\mathrm{ber}^2\,\omega + \mathrm{bei}^2\omega + \frac{0{,}7}{\omega}\left(\mathrm{ber}'\,\omega\,\mathrm{bei}\,\omega - \mathrm{bei}'\,\omega\,\mathrm{ber}\,\omega\right)\right];$$

$$\Phi_2 = \frac{\omega}{T_\Phi}\left(\mathrm{ber}\,\omega\,\mathrm{ber}'\,\omega + \mathrm{bei}\,\omega\;\mathrm{bei}'\omega\right);$$

$$\Phi_3 = \frac{\omega}{T_\Phi}\left(\mathrm{ber}'^2\omega + \mathrm{bei}'^2\omega\right);$$

$$A = \frac{0{,}91}{T_\Phi}\left\{f_1(\omega)\mathrm{bei}''x - f_2(\omega)\mathrm{ber}''x + m_A\left(\mathrm{ber}'\,\omega\,\mathrm{ber}''x + \mathrm{bei}'\,\omega\,\mathrm{bei}''x\right)\right\};$$

$$B = \frac{0{,}91}{T_\Phi}\left\{n_B\left[f_1(\omega)\mathrm{bei}''x - f_2(\omega)\mathrm{ber}''x\right] + \mathrm{ber}'\,\omega\,\mathrm{ber}''x + \mathrm{bei}'\,\omega\,\mathrm{bei}''x\right\},$$

где $T_\Phi = -f_2(\omega)\,\mathrm{bei}'\,\omega - f_1(\omega)\mathrm{ber}'\,\omega$;

$$f_1(\omega) = \frac{0{,}7}{\omega}\mathrm{ber}'\,\omega + \mathrm{bei}\,\omega;$$

$$f_2(\omega) = \frac{0{,}7}{\omega}\mathrm{bei}'\,\omega - \mathrm{ber}\,\omega;$$

$x$ — величина, принадлежащая отрезку $x \in [0, \omega]$ при $\omega \le 3$ или отрезку $x \in [0, (\omega - 3)]$ при $\omega > 3$, выбираемая таким образом, чтобы коэффициент $A$ или $B$ соответственно принимал максимальное значение

$\mathrm{ber}''$, $\mathrm{bei}''$, $\mathrm{ber}'$, $\mathrm{bei}'$, ber, bei — функции Бесселя.

$$\varphi_\tau = \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^4}};$$

$$A_y = \frac{1 - \cos\sqrt{\lambda_y}}{\cos\sqrt{\lambda_y}};$$

$$A_\rho = 9{,}2\frac{\beta_\rho^2\left(1-\beta_\rho^2\right)}{\left(1-\beta_\rho^2\right)^2 - 4\beta_\rho^2\ln\beta_\rho} \quad \text{при } \beta_\rho \le 0{,}9;$$

$$A_\rho = \frac{13{,}8}{\left(1-\beta_\rho\right)^3}\left[1 - \frac{5}{2}\left(1-\beta_\rho\right) + \frac{61}{30}\left(1-\beta_\rho\right)^2 - \frac{11}{20}\left(1-\beta_\rho\right)^3\right] \quad \text{при } \beta_\rho > 0{,}9;$$

$$A_{\rho 1} = \frac{2}{\sin\beta_0\cos^2\beta_0}\ln\frac{1}{\beta_\rho};$$

$$A_{\rho 2} = \frac{1{,}82\sin^2\beta_0}{\left(\cos\beta_0\right)^{\frac{3}{2}}}\left(1 + \sqrt{\beta_\rho}\right);$$

$$B_{\rho 1} = \frac{-1{,}06}{\sin\beta_0\cos^2\beta_0}\left[\ln\frac{1}{\beta_\rho} + \left(\frac{1}{\beta_\rho^2} - 1\right)\left(0{,}3\cos^4\beta_0 + 1{,}5\sin^2\beta_0 - 0{,}5\cos^2\beta_0 + \sin^4\beta_0\right)\right];$$

$$B_{p2}=\frac{0{,}965\sin^2\beta_0}{(\cos\beta_0)^{\frac{3}{2}}}\left(\frac{1}{\beta_p^2}-1\right);$$

$$z_F=\omega\,\frac{\operatorname{ch}\omega+\cos\omega}{\operatorname{sh}\omega+\sin\omega};$$

$$z_M=\frac{\omega^2}{4}\,\frac{\operatorname{sh}\omega-\sin\omega}{\operatorname{sh}\omega+\sin\omega};$$

$$\lambda_1=0{,}0206\left(\frac{L_0}{B_0}\right)^3\sum_{m=1,\,2,\,3\ldots}\frac{1}{m^3}\left\langle\left[\alpha_m-(\alpha_m\operatorname{th}\alpha_m+1)\operatorname{th}\alpha_m\right]\times\left\{\frac{\eta_k\left[\alpha_m-(\alpha_m\operatorname{th}\alpha_m-1)\operatorname{th}\alpha_m\right]}{\left\{2+m\eta_k\left[\alpha_m-(\alpha_m\operatorname{th}\alpha_m-1)\operatorname{th}\alpha_m\right]\right\}}-\frac{1}{m}\right\}\right\rangle\sin\frac{\pi m}{2};$$

$$\lambda_2=0{,}406\,\frac{L_0}{B_0}\sum_{m=1,\,3,\,5\ldots}\frac{\left[\alpha_m-(\alpha_m\operatorname{th}\alpha_m-1)\operatorname{th}\alpha_m\right]\sin\dfrac{\pi m}{2}}{m^2\left\{2+m\eta_k\left[\alpha_m-(\alpha_m\operatorname{th}\alpha_m-1)\operatorname{th}\alpha_m\right]\right\}},$$

где $\alpha_m=\dfrac{m\pi B_0}{2L_0}$;

$$\alpha_1=\frac{Y_2-Y_2Y_1-4\cdot Y_4Y_3}{\omega\left(Y_2Y_4-Y_3^2\right)};$$

$$\alpha_2=\frac{Y_1Y_3+Y_3-Y_2^2}{\omega^2\left(Y_2Y_4-Y_3^2\right)},$$

где $Y_1=\operatorname{ch}\omega\cos\omega$;

$$Y_2=\frac{1}{2}(\operatorname{ch}\omega\sin\omega+\operatorname{sh}\omega\cos\omega);$$

$$Y_3=\frac{1}{2}\operatorname{sh}\omega\sin\omega;$$

$$Y_4=\frac{1}{4}(\operatorname{ch}\omega\sin\omega-\operatorname{sh}\omega\cos\omega).$$

УДК 66.023:006.354 ОКС 71.120
75.200
Г02 ОКП 36 1500

Ключевые слова: сосуды и аппараты, теплообменники, аппараты воздушного охлаждения, нормы и методы расчета на прочность

gost.e-ecolog.ru