ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 71146— 2023

Оборудование химическое и нефтегазоперерабатывающее

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2024

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт нефтяного машиностроения «ВНИИНЕФТЕМАШ» (АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»), Закрытым акционерным обществом «ПЕТРОХИМ ИНЖИНИРИНГ» (ЗАО «ПХИ») и Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский институт стандартизации» (ФГБУ «Институт стандартизации»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 023 «Нефтяная и газовая промышленность»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2023 г. № 1544-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «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 (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2024

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 Термины, определения и обозначения 2
4 Общие положения 4
5 Материалы 5
6 Допускаемые напряжения, коэффициенты запаса прочности 6
7 Расчет на прочность обогреваемых труб змеевиков 6
8 Расчет на прочность обогреваемых отводов и конических переходов змеевиков 9
Приложение А (обязательное) Допускаемые напряжения для сталей различных марок 11
Приложение Б (обязательное) Показатель степени в уравнении длительной прочности для сталей различных марок 23
Приложение В (обязательное) Расчет и критерий оценки температурных напряжений при работе в области упругих деформаций 29
Приложение Г (рекомендуемое) Расчет максимальной температуры поверхности радиантных труб . . . 31

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Оборудование химическое и нефтегазоперерабатывающее

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Chemical and oil and gas processing equipment. Strength calculation of heating furnaces pressure elements

Дата введения — 2024—06—30

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает методику расчета на прочность элементов нагревательных печей, работающих под внутренним избыточным давлением, применяемых в химической, нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей промышленности.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 550 Трубы стальные бесшовные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Технические условия

ГОСТ 1050 Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия

ГОСТ 5632 Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки

ГОСТ 8731 Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические требования

ГОСТ 9940 Трубы бесшовные горячедеформированные из коррозионно-стойкой стали. Технические условия

ГОСТ 9941 Трубы бесшовные холоднодеформированные из коррозионно-стойких высоколегированных сталей. Технические условия

ГОСТ 19281 Прокат повышенной прочности. Общие технические условия

ГОСТ 20072 Сталь теплоустойчивая. Технические условия

ГОСТ 34233.1 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования

ГОСТ 34233.2 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек

ГОСТ 34233.3 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер

ГОСТ 34233.4 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений

ГОСТ 34347 Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия

ГОСТ 34951 (EN 1020:2000) Сталь. Определение и классификация по химическому составу и классам качества

ГОСТ Р 57423 Трубы для котельного и теплообменного оборудования. Часть 2. Трубы стальные бесшовные для работы под давлением более 6,4 МПа и при температуре выше 400 °С. Технические условия

Издание официальное

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 ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения и обозначения

3.1 В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **нагревательная печь:** Тип трубчатой печи, предназначенной для нагрева продукта, находящегося в трубчатом змеевике, с помощью радиации и/или конвекции за счет использования тепловой энергии, образующейся при сгорании топлива в печи.

3.1.2 **элементы печи, работающие под давлением:** Элементы, которыми являются трубы, отводы, коллекторы, фланцы и т. д.

3.1.3 **исполнительная толщина стенки:** Для вновь конструируемых элементов печи — толщина, назначенная конструктором и указанная в технической документации; для уже изготовленных элементов печи — толщина, получившаяся при изготовлении.

3.1.4 **нейтральная сторона отвода:** Участок отвода, расположенный под углом 15° в оба направления от продольного среднего сечения отвода.

3.1.5 **допускаемое условно-упругое напряжение:** Допускаемое напряжение, используемое при оценке результатов расчета, выполненного в предположении, что при любой деформации сохраняется линейная зависимость между напряжением и деформацией с коэффициентом пропорциональности, равным модулю продольной упругости материала.

3.1.6 **ядро потока в змеевике:** Центральная часть турбулентного течения нагреваемой рабочей среды.

3.1.7 **тепловой пограничный слой:** Тонкая область течения нагреваемой рабочей среды, прилегающая к поверхности трубы, в которой температура теплоносителя меняется от температуры стенки трубы до температуры ядра потока.

3.1.8 **пристеночный слой жидкости (ламинарный подслой):** Подслой пограничного слоя, в котором нагреваемая рабочая среда движется без пульсаций из-за наличия близко расположенной стенки.

3.2 В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

a — овальность поперечного сечения отвода, %;

B — безразмерный параметр;

b — вспомогательный коэффициент;

b_o — общая длина расточки стыкуемых элементов, мм;

c_1 — прибавка для компенсации коррозии, мм;

c_2 — прибавка для компенсации минусового допуска толщины стенки, мм;

c_p — удельная массовая теплоемкость жидкости при температуре ядра потока в змеевике, Дж/(кг · К);

D_i — внутренний диаметр элемента; в случае конического перехода внутренний диаметр большего основания конического перехода, мм;

D_o — наружный диаметр элемента, мм;

$D_{o_{max}}$ — наибольший наружный диаметр поперечного сечения отвода, мм;

$D_{o_{min}}$ — наименьший наружный диаметр поперечного сечения отвода, мм;

E — модуль продольной упругости материала, МПа;

f — коэффициент снижения прибавки для компенсации коррозии;

F_{cir} — коэффициент, учитывающий изменения теплового потока по окружности трубы;

F_L — коэффициент, учитывающий изменения теплового потока в продольном направлении трубы;

F_T — коэффициент, учитывающий влияние температуры материала трубы на тепловой поток излучением;

G — модуль сдвига материала трубы, МПа;

K_1, K_2, K_3 — торовые коэффициенты;

n — показатель степени в уравнении длительной прочности;

$n_д$ — коэффициент запаса прочности по пределу длительной прочности;

$n_т$ — коэффициент запаса прочности по пределу текучести;

p — расчетное внутреннее избыточное давление, МПа;

Pr — число Прандтля;

q — вспомогательный коэффициент;

q_{conv} — средний конвективный тепловой поток на наружной поверхности трубы, Вт/м^2;

q_{mA} — массовый расход жидкости, кг/(м^2 · с);

$q_{R,ave}$ — средний тепловой поток излучением на наружной поверхности трубы, Вт/м^2;

$q_{R,\max}$ — максимальный тепловой поток излучением на наружной поверхности в любой точке змеевика, Вт/м^2;

q_o — удельный тепловой поток на наружной поверхности трубы, Вт/м^2;

R — радиус кривизны осевой линии отвода, мм;

Re — число Рейнольдса;

$R_{e/t}$ — минимальное значение предела текучести при расчетной температуре, МПа;

$R_{p0,2/t}$ — минимальное значение предела текучести при остаточном удлинении 0,2 % при расчетной температуре, МПа;

$R_{m_{\min}/10^n/t}$ — минимальное значение предела длительной прочности за расчетный срок службы при расчетной температуре, МПа;

R_f — коэффициент загрязнения внутри трубы из-за наличия любого внутреннего загрязнения, кокса или накипи, м^2 · К/Вт;

s — исполнительная толщина стенки трубы, мм;

s_{o_1} — исполнительная толщина внешней стороны отвода, мм;

s_{o_2} — исполнительная толщина внутренней стороны отвода, мм;

s_{o_3} — исполнительная толщина нейтральной стороны отвода, мм;

s_p — расчетная толщина стенки трубы, мм;

s_{b_o} — исполнительная толщина стенки отвода в месте расточки под подкладные кольца, мм;

$s_{\min}$ — минимальная исполнительная толщина стенки трубы, мм;

T_i — длительность этапов эксплуатации в условиях ползучести при i-м сочетании температур и нагрузок (i = 1, 2, …, n), ч;

T_b — абсолютная температура ядра потока газа, К;

T_{bf} — температура ядра потока жидкости в змеевике, °С;

ΔT_f — разница температур при любом внутреннем загрязнении, °С;

ΔT_{ff} — разница температур в тепловом пограничном слое, °С;

T_{fm} — максимальная температура пристеночного слоя жидкости, °С;

$[T]_i$ — расчетное допустимое время эксплуатации при i-м сочетании температур и нагрузок (i = 1, 2, …, n), ч;

$T_{\max}$ — максимальная температура поверхности радиантных труб, °С;

$T_{q,ave}$ — средняя температура дымовых газов в радиантной секции, К;

T_{tm} — температура материала трубы в рассматриваемой точке, К;

$T_{tm,ave}$ — средняя температура материала радиантных труб, К;

T_w — абсолютная температура стенки трубы, К;

ΔT, ΔT_{tw} — перепад температур по толщине стенки трубы, °С;
y — безразмерный параметр;
Y_1, Y_2, Y_3 — коэффициенты формы отвода;
w_l — массовая доля жидкости в двухфазном потоке;
w_v — массовая доля газа в двухфазном потоке;
α — температурный коэффициент линейного расширения материала трубы, 1/°С;
$\alpha_к$ — половина угла при вершине конического перехода, град;
α_{2p} — коэффициент теплоотдачи двухфазного потока, Вт/(м^2 · К);
α_{ff} — коэффициент теплоотдачи в пограничном слое на внутренней стенке трубы, Вт/(м^2 · К);
α_l — коэффициент теплоотдачи жидкой фракции, Вт/(м^2 · К);
α_v — коэффициент теплоотдачи газообразной фракции, Вт/(м^2 · К);
δ_f — толщина слоя кокса и/или окалины, мм;
λ_s — теплопроводность материала трубы, Вт/(м · К);
λ_f — коэффициент теплопроводности кокса или окалины, Вт/(м · К);
$\lambda_{f,Tb}$ — теплопроводность жидкости при температуре ядра потока, Вт/(м · К);
λ_{tm} — коэффициент теплопроводности материала трубы при средней температуре стенки, Вт/(м · К);
$\mu_{f,Tb}$ — коэффициент динамической вязкости жидкости при температуре ядра потока, Па · с;
$\mu_{f,Tw}$ — коэффициент динамической вязкости жидкости при температуре стенки трубы, Па · с;
ν — коэффициент Пуассона материала трубы;
σ_m — общие мембранные напряжения, МПа;
σ_b — общие изгибные напряжения, МПа;
$\sigma_{T\,max}$ — максимальные температурные напряжения в области упругих деформаций, МПа;
$[\sigma]$ — допускаемое напряжение при расчетной температуре, МПа;
$[\sigma]_m$ — допускаемое условно-упругое напряжение при расчетной температуре для оценки напряжений, определяемых по суммам мембранных и изгибных напряжений, МПа;
$[\sigma]_R$ — допускаемое значение суммарных мембранных, изгибных и температурных напряжений, МПа;
$[\sigma_T]$ — допускаемые температурные напряжения, МПа;
Δ — безразмерный параметр.

4 Общие положения

4.1 Расчет на прочность обогреваемых снаружи элементов нагревательных печей выполняют в соответствии с разделами 7 и 8, приложениями А, Б, В для элементов с отношением их толщины стенки к наружному диаметру, равным 0,15 и менее.

4.2 Расчетную температуру стенки обогреваемых снаружи элементов определяют на основании теплотехнических расчетов с учетом неравномерности распределения тепловых потоков или по результатам испытаний (прямых измерений). Расчетную температуру стенки используют для определения прочностных характеристик материала и допускаемых напряжений, а также при расчете на прочность с учетом температурных воздействий.

4.3 Температуру стенки элементов змеевиков определяют с учетом вида теплопередачи и гидравлики потоков, протекающих в трубах, скорости движения дымовых газов, расположения и компоновки труб. Трубы радиантной секции воспринимают основную тепловую нагрузку; трубы конвекционной секции, в которой используется тепло продуктов сгорания, выходящих из радиантной секции — оставшуюся часть тепла, выделяемого при горении. Рекомендации по расчету максимальной температуры поверхности радиантных труб представлены в приложении Г.

4.4 Расчетное давление для всех элементов нагревательных печей принимают в соответствии с ГОСТ 34233.1.

4.5 Расчет на прочность не обогреваемых снаружи элементов нагревательных печей (коллекторов, фланцев и др.) выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ 34233.1—ГОСТ 34233.4. В качестве расчетной температуры стенки принимают максимальную температуру рабочей среды, находящейся внутри элемента и соприкасающейся с его стенкой; допускаемые напряжения и коэффициенты запаса прочности принимают в соответствии с ГОСТ 34233.1.

4.6 Допускается выполнение расчета обогреваемых снаружи элементов нагревательных печей численными методами при условии соблюдения принципов подхода к расчету, учету ползучести, длительной прочности и коэффициентов запаса, аналогичных используемым в разделе 7.

5 Материалы

5.1 Основные материалы, применяемые для изготовления обогреваемых снаружи элементов нагревательных печей, и максимальные расчетные температуры стенки, при которых возможен расчет по настоящему стандарту, приведены в таблице 1.

5.2 Максимальные расчетные температуры стенки определяются верхним пределом достоверности данных по пределу длительной прочности для каждого материала, представленного в приложении А.

5.3 Для изготовления элементов нагревательных печей применяют бесшовные трубы.

Таблица 1 — Основные материалы для обогреваемых снаружи элементов печей

Марка материала	Стандарт		Максимальная расчетная температура стенки элемента, °С
	Химический состав	Технические требования	
10	По ГОСТ 1050	По ГОСТ 550, группа А или Б	475
20	По ГОСТ 1050	По ГОСТ 550, группа А или Б	475
20	По ГОСТ Р 57423	По ГОСТ Р 57423	475
09Г2С	По ГОСТ 19281	По ГОСТ 550, группа А или Б	500
09Г2С	По ГОСТ 19281	По ГОСТ 8731, группа В	500
15ХМ	По ГОСТ Р 57423	По ГОСТ Р 57423	560
12Х1МФ	По ГОСТ Р 57423	По ГОСТ Р 57423	575
10Х2М1	По ГОСТ 550	По ГОСТ 550, группа А или Б	650
12Х8ВФ	По ГОСТ 20072	По ГОСТ 550, группа А или Б	650
15Х5М	По ГОСТ 20072	По ГОСТ 550, группа А или Б	650
15Х5МУ	По ГОСТ 20072	По ГОСТ 550, группа А или Б	650
10Х9МФБ	По ГОСТ Р 57423	По ГОСТ Р 57423	650
13Х9М1	По ГОСТ 550	По ГОСТ 550, группа А или Б	650
08Х18Н10Т	По ГОСТ 5632	По ГОСТ 9940, ГОСТ 9941	650
08Х18Н12Б	По ГОСТ 5632	По ГОСТ 9940, ГОСТ 9941	650
12Х18Н10Т	По ГОСТ 5632	По ГОСТ 9940, ГОСТ 9941	650
12Х18Н12Т	По ГОСТ Р 57423	По ГОСТ Р 57423	650
10Х17Н13М2Т	По ГОСТ 5632	По ГОСТ 9940, ГОСТ 9941	700

5.4 Допускается применять другие марки сталей, если их применение предусмотрено соответствующими нормативными документами на элементы нагревательных печей, работающих под давлением.

6 Допускаемые напряжения, коэффициенты запаса прочности

6.1 Допускаемые напряжения при расчетной температуре [σ], МПа, обогреваемых снаружи элементов нагревательных печей, изготавливаемых из материалов, приведенных в таблице 1, с учетом коэффициентов запаса прочности материалов, приведенных в таблице 2, определяют по формуле

$$[\sigma] = \min\left\{\frac{R_{e/t}}{n_т} \text{ или } \frac{R_{p0,2/t}}{n_т};\ \frac{R_{m\min}/10^n/t}{n_д}\right\}. \quad (1)$$

Таблица 2 — Коэффициенты запаса прочности материалов

Материал	Коэффициенты запаса прочности	
	по пределу текучести $n_т$	по пределу длительной прочности $n_д$
Нелегированные и легированные кремнием и марганцем стали, легированные хромом и молибденом или хромом, молибденом и ванадием стали[1)]	1,5	1,0
Нержавеющие стали аустенитного класса[2)]	1,1	1,0

[1)] Классификация материалов приведена в соответствии с ГОСТ 34951. По ГОСТ 34347 данные материалы классифицируют как углеродистую сталь, низколегированную марганцовистую и марганцево-кремнистую сталь, теплоустойчивую хромомолибденовую и хромомолибденованадиевую сталь.

[2)] Классификация материалов приведена в соответствии с ГОСТ 34951, ГОСТ 5632. По ГОСТ 34347 данные материалы классифицируют как аустенитную сталь.

6.2 Для сталей, широко используемых в химической, нефтехимической и нефтегазоперерабатывающей промышленности (см. таблицу 1), допускаемые напряжения обогреваемых элементов нагревательных печей, работающих под давлением, определяют по графикам, представленным в приложении А. Значения допускаемых напряжений для расчетных сроков службы 20 000; 40 000; 60 000; 100 000; 200 000 ч были получены с применением параметрических кривых Ларсона–Миллера, используемых для определения минимального значения предела длительной прочности в зависимости от срока службы и расчетной температуры.

6.3 Механические характеристики сталей для определения допускаемых напряжений при температуре 20 °С (предел текучести), применяемых при расчете обогреваемых элементов нагревательных печей на условия гидравлических испытаний, принимают либо в соответствии со стандартами, содержащими технические требования к материалам, приведенными в таблице 1, либо по сертификатам на материалы.

7 Расчет на прочность обогреваемых труб змеевиков

7.1 Расчетную толщину стенки обогреваемой трубы змеевика $s_р$, мм, определяют по формуле

$$s_р = \frac{p \cdot D_о}{2 \cdot [\sigma] + p}. \quad (2)$$

7.2 Исполнительную толщину стенки обогреваемой трубы змеевика s, мм, определяют по формуле

$$s \geq s_р + f \cdot c_1 + c_2. \quad (3)$$

7.3 Исполнительную толщину стенки обогреваемой трубы змеевика рекомендуется принимать не менее значений, приведенных в таблице 3.

Таблица 3 — Рекомендуемые минимальные исполнительные толщины стенок труб

$D_о$, мм	73	76	89	102	108	114	121	127	133	152	159	168	219	273	325
s_{min}, мм	4,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,0	6,0	6,0	6,0	7,0	8,0	8,0

7.4 Если расчетная температура стенки элемента змеевика не превышает значений, при которых допускаемое напряжение материала элемента в соответствии с графиками приложения А определяют на базе не зависящих от времени характеристик (предела текучести), то коэффициент снижения прибавки для компенсации коррозии принимают равным 1.

Если допускаемое напряжение материала элемента определяют на базе зависящих от времени характеристик (предела длительной прочности), то коэффициент снижения прибавки для компенсации коррозии определяют в зависимости от безразмерного параметра B и показателя степени в уравнении длительной прочности n по графикам, представленным на рисунке 1.

Значение безразмерного параметра B определяют по формуле

$$B = \frac{c_1}{s_p}. \quad (4)$$

Значение показателя степени в уравнении длительной прочности n для различных марок стали определяют по графикам, представленным в приложении Б.

При отсутствии возможности определения значения коэффициента снижения прибавки для компенсации коррозии для сталей, не указанных в таблице 1, данный коэффициент принимают равным 1.

7.5 Для обогреваемых труб змеевиков, допускаемое напряжение материала которых в соответствии с графиками, приведенными в приложении А, определяют при температурах, ограниченных значениями, при которых не учитывают ползучесть материала, требуется провести поверочный расчет с учетом температурных напряжений в трубе. Формулы для определения и оценки температурных напряжений с использованием принятой исполнительной толщины стенки трубы представлены в приложении В.

7.6 Минимальную прибавку для компенсации коррозии для расчетного ресурса эксплуатации элементов 200 000 ч рекомендуется принимать:

- 3 мм для нелегированных и легированных марганцем и кремнием сталей (например, марок 10, 20, 09Г2С и др.);
- 2 мм для легированных хромом и молибденом или хромом, молибденом, ванадием сталей (например, марок 15ХМ, 12Х1МФ, 10Х2М1, 12Х8ВФ, 15Х5М, 15Х5МУ, 10Х9МФБ, 13Х9М1 и др.);
- 1 мм для нержавеющих сталей аустенитного класса (например, марок 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т и др.).

При расчетном ресурсе менее 200 000 ч прибавку допускается принимать уменьшенной по сравнению с приведенными выше значениями.

7.7 Если в условиях ползучести элементы работают при разных расчетных температурах и давлениях в течение периода времени T_i, то требуется провести расчет на каждое из возможных сочетаний нагрузки и определить соответствующий срок службы — значение расчетного допустимого времени эксплуатации при i-м сочетании температур и нагрузок ($i = 1, 2, \ldots, n$) $[T]_i$, ч, при этом должно соблюдаться условие

$$\sum_{1}^{n} \frac{T_i}{[T]_i} \le 1. \quad (5)$$

При определении значения $[T]_i$ следует принимать допускаемые напряжения, определенные в соответствии с 6.1 на базе зависящих от времени характеристик (предела длительной прочности).

В случае непрерывного изменения температур в процессе эксплуатации рекомендуется принимать этапы эксплуатации при разной температуре стенки по интервалам температуры, не превышающим 10 °С.

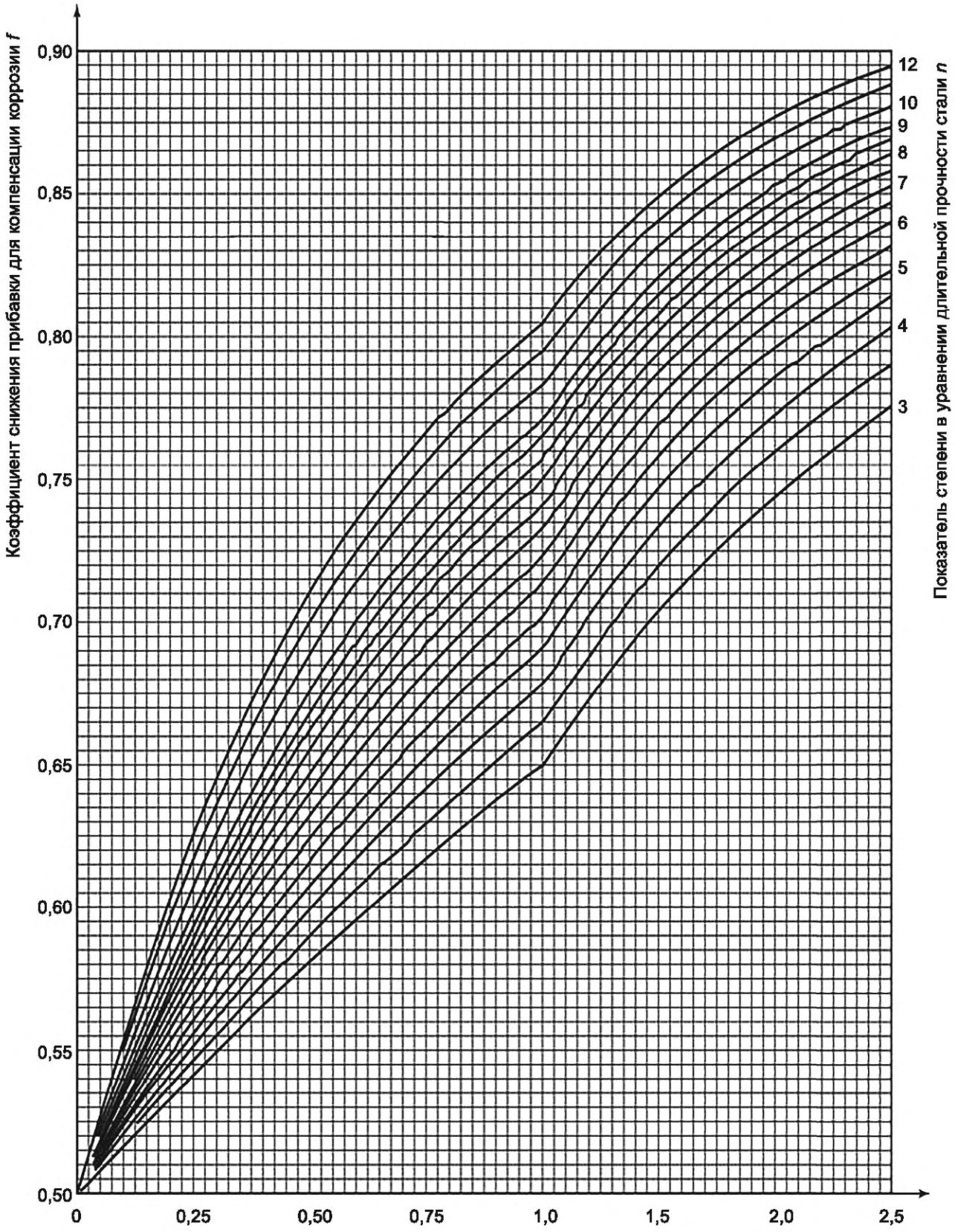


Рисунок 1 — Коэффициент снижения прибавки для компенсации коррозии

8 Расчет на прочность обогреваемых отводов и конических переходов змеевиков

8.1 Расчетную толщину стенки обогреваемого отвода змеевика определяют по формуле (2).

8.2 Исполнительную толщину стенки внешней стороны обогреваемого отвода змеевика s_{o_1}, мм, определяют по формуле

$$s_{o_1} \geq s_p \cdot K_1 \cdot Y_1 + f \cdot c_1 + c_2. \quad (6)$$

8.3 Исполнительную толщину стенки внутренней стороны обогреваемого отвода змеевика s_{o_2}, мм, определяют по формуле

$$s_{o_2} \geq s_p \cdot K_2 \cdot Y_2 + f \cdot c_1 + c_2. \quad (7)$$

8.4 Исполнительную толщину стенки нейтральной стороны обогреваемого отвода змеевика s_{o_3}, мм, определяют по формуле

$$s_{o_3} \geq s_p \cdot K_3 \cdot Y_3 + f \cdot c_1 + c_2. \quad (8)$$

8.5 Исполнительную толщину стенки обогреваемого отвода змеевика следует принимать наибольшей из значений, полученных по формулам (6), (7), (8), но не менее значений, приведенных в таблице 3.

8.6 Значение коэффициента снижения прибавки для компенсации коррозии f определяют в соответствии с 7.4.

8.7 Для обогреваемых отводов змеевиков, когда не учитывают ползучесть материала, коэффициенты формы отвода Y_1, Y_2, Y_3 определяют по формулам с учетом f, равного 1:

$$Y_1 = \max\left\{0{,}12\left(1+\sqrt{1+0{,}4\frac{a}{b}q}\right); 1{,}0\right\};\ Y_2 = Y_1;\ Y_3 = \max\left\{0{,}12\left(1+\sqrt{1+0{,}4\frac{a}{b}}\right); 1{,}0\right\}. \quad (9)$$

8.8 Для обогреваемых отводов змеевиков, когда необходимо учитывать ползучесть материала, коэффициенты формы отвода Y_1, Y_2, Y_3 определяют по формулам:

$$Y_1 = \max\left\{0{,}4\left(1+\sqrt{1+0{,}015\frac{a}{b}q}\right); 1{,}0\right\};\ Y_2 = Y_1;\ Y_3 = \max\left\{0{,}4\left(1+\sqrt{1+0{,}015\frac{a}{b}}\right); 1{,}0\right\}. \quad (10)$$

8.9 Торовые коэффициенты для внешней, внутренней и нейтральной сторон K_1, K_2, K_3 обогреваемого отвода змеевика определяют по формулам:

$$K_1 = \frac{4R + D_o}{4R + 2D_o};\quad K_2 = \frac{4R - D_o}{4R - 2D_o};\quad K_3 = 1. \quad (11)$$

8.10 Овальность поперечного сечения обогреваемого отвода змеевика a, %, определяют по формуле

$$a = 2\frac{D_{o\max} - D_{o\min}}{D_{o\max} + D_{o\min}} \cdot 100. \quad (12)$$

8.11 Вспомогательные коэффициенты b, q определяют по формулам:

$$b = \max\left\{\frac{p}{2[\sigma] + p}; 0{,}03\right\};\qquad q = \min\left\{2b\frac{R}{D_o} + \frac{1}{2}; 1\right\}. \quad (13)$$

8.12 Исполнительная толщина стенки отвода змеевика в месте расточки под подкладные кольца s_{b_o}, мм, должна отвечать условию

$$s_{b_o} \geq \frac{p \cdot D_o}{2[\sigma](1+\Delta) + p}\max\{K_1 \cdot Y_1;\quad K_2 \cdot Y_2;\quad K_3 \cdot Y_3\} + f \cdot c_1 + c_2;\quad \Delta = \frac{1}{1 + \dfrac{b_o^2}{D_i(s - f \cdot c_1 - c_2)}}. \quad (14)$$

8.13 Расчетную толщину стенки конического перехода при половине угла при вершине конического перехода $\alpha_к$, равном 15° и менее, и $0{,}003 \le \frac{(s - c_1 - c_2)}{D_i} \le 0{,}350$ определяют по формуле

$$s_p = \frac{p \cdot D_i}{2 \cdot [\sigma] \cos\alpha_к - p}. \quad (15)$$

8.14 Исполнительная толщина стенки s, мм, конического перехода должна отвечать условию

$$s \ge s_p + c_1 + c_2. \quad (16)$$

Приложение А
(обязательное)

Допускаемые напряжения для сталей различных марок

Графики определения допускаемых напряжений для стали различных марок представлены на рисунках А.1—А.12.

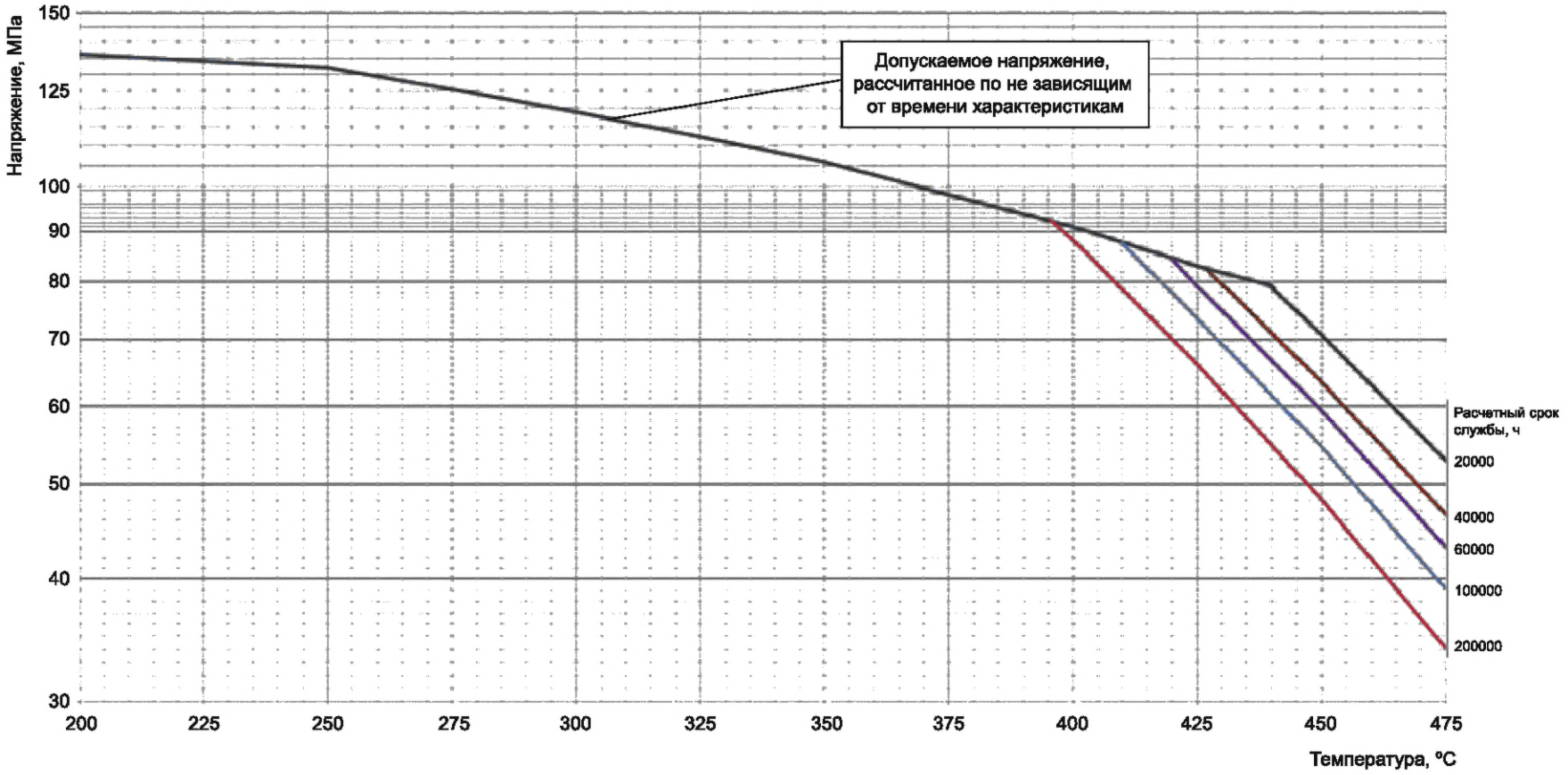


Рисунок А.1 — График определения допускаемых напряжений для сталей марок 10, 20

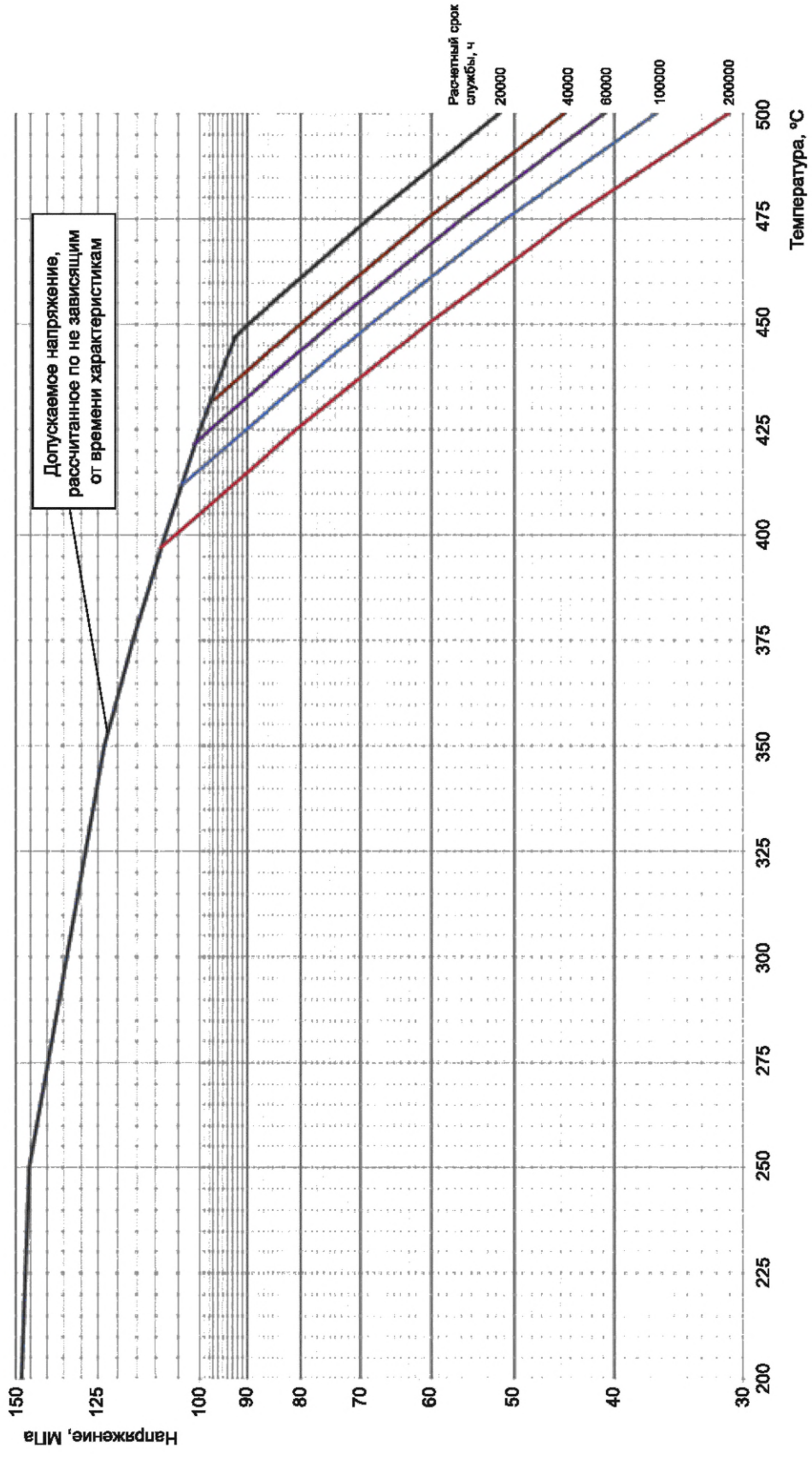


Рисунок А.2 — График определения допускаемых напряжений для стали марки 09Г2С

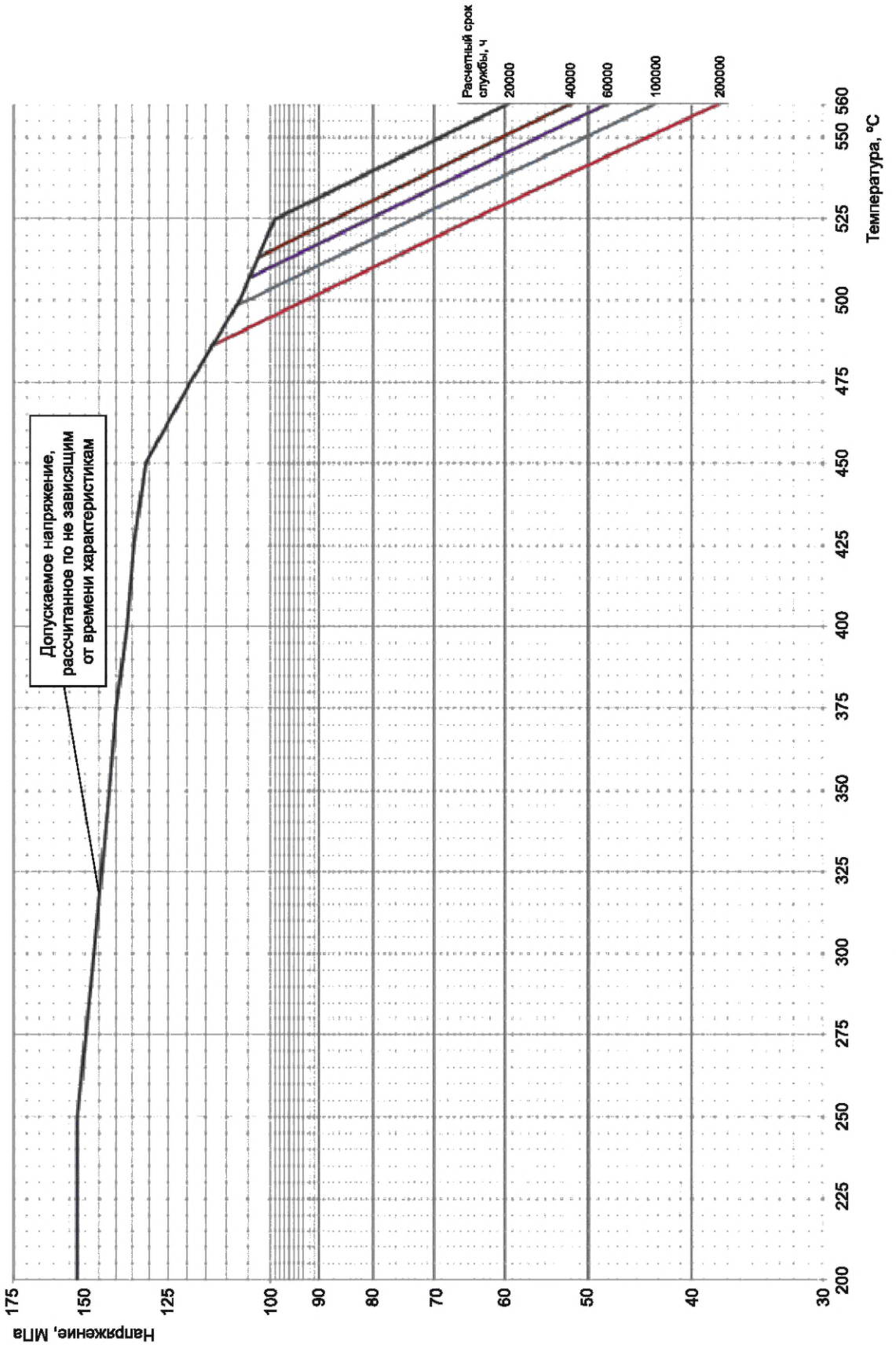


Рисунок А.3 — График определения допускаемых напряжений для стали марки 15ХМ

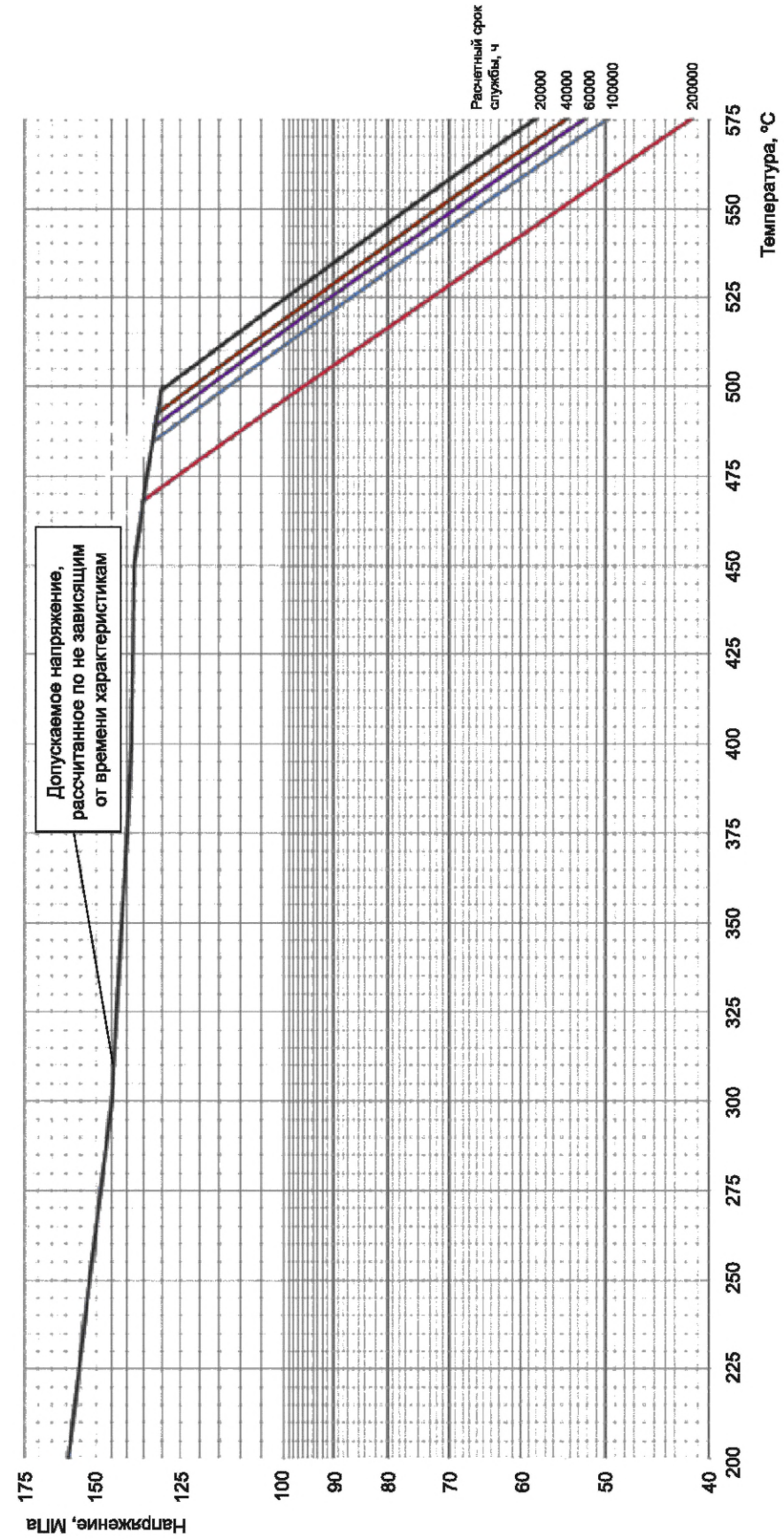


Рисунок А.4 — График определения допускаемых напряжений для стали марки 12Х1МФ

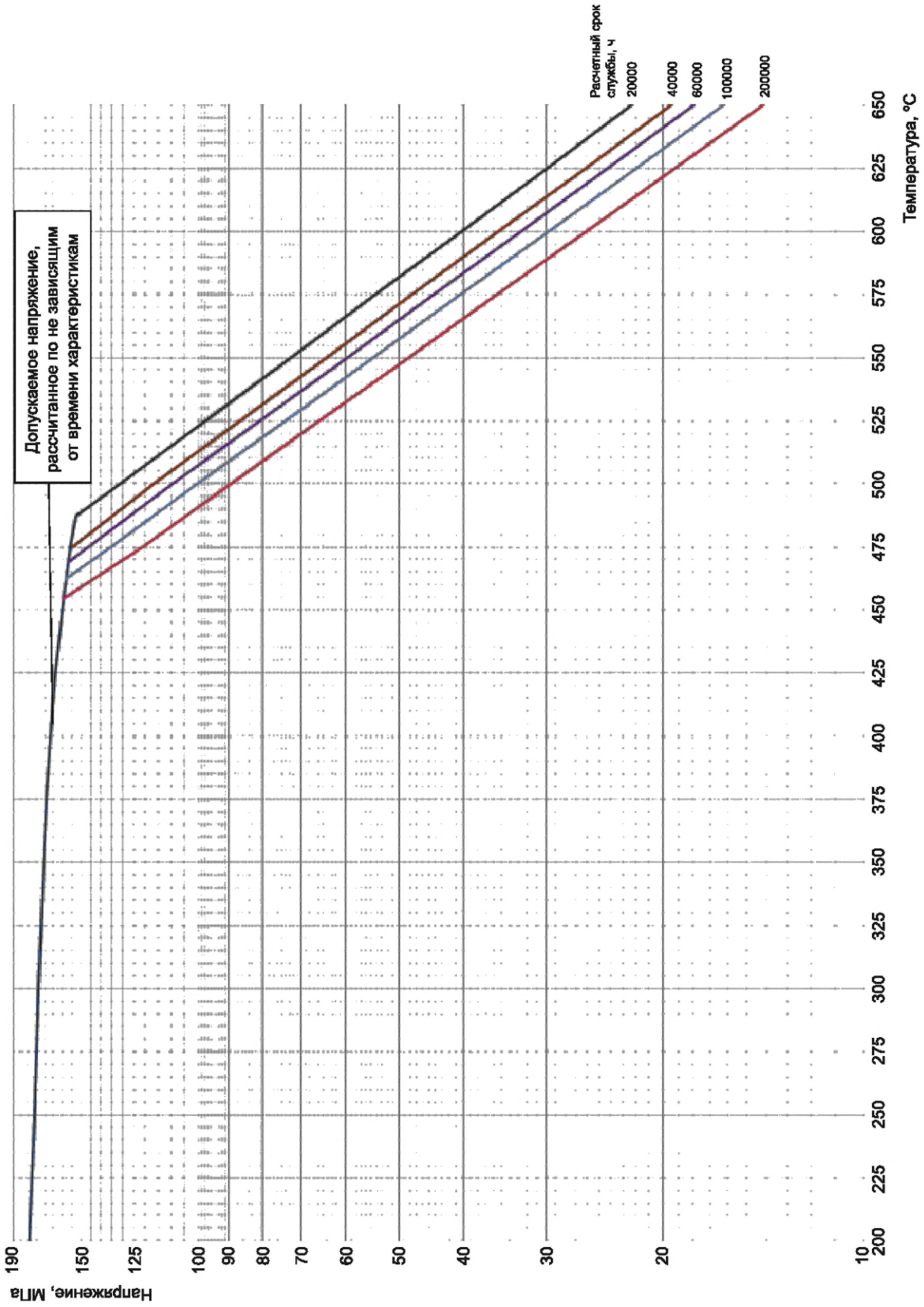


Рисунок А.5 — График определения допускаемых напряжений для стали марки 10Х2М1

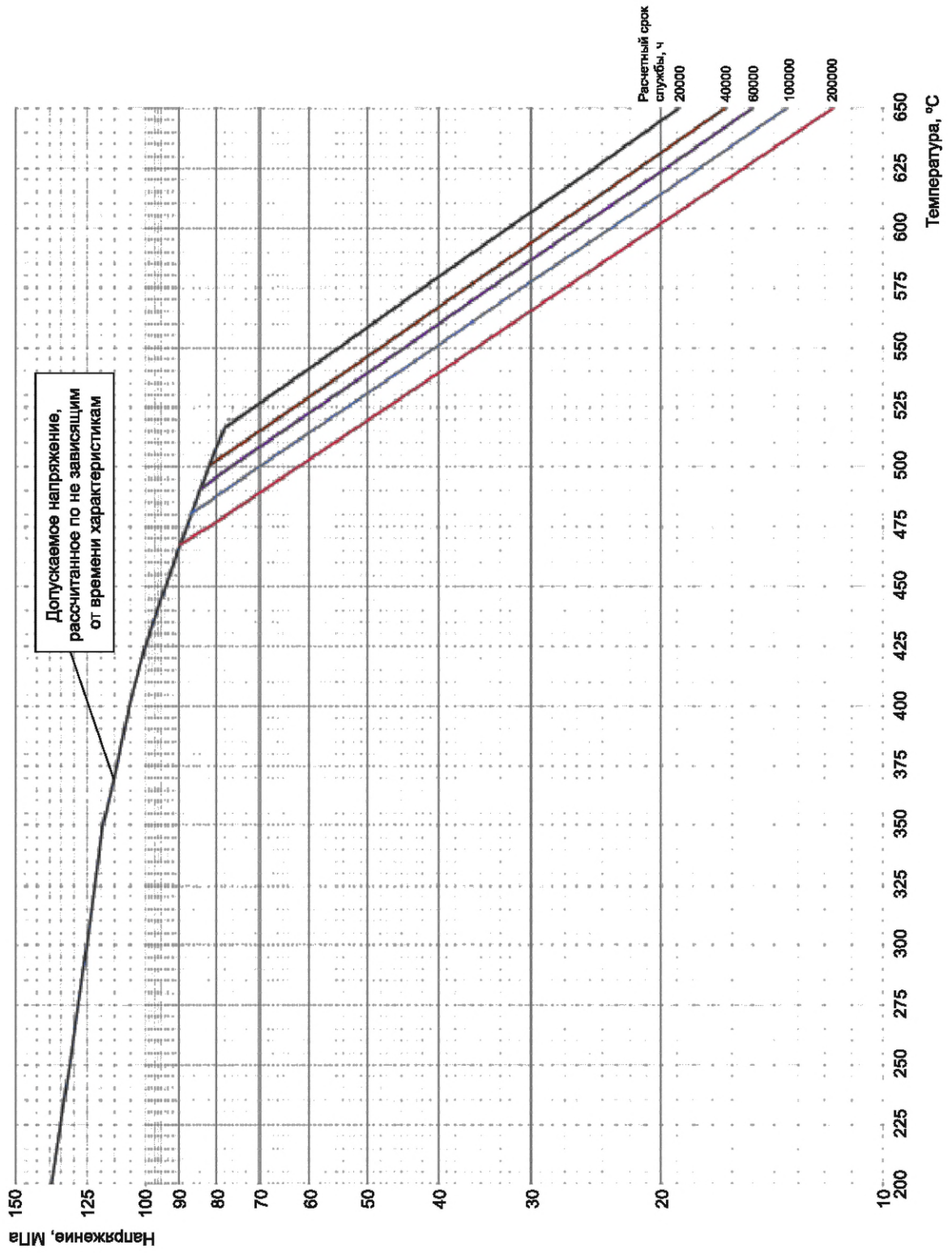


Рисунок А.6 — График определения допускаемых напряжений для стали марки 12Х8ВФ

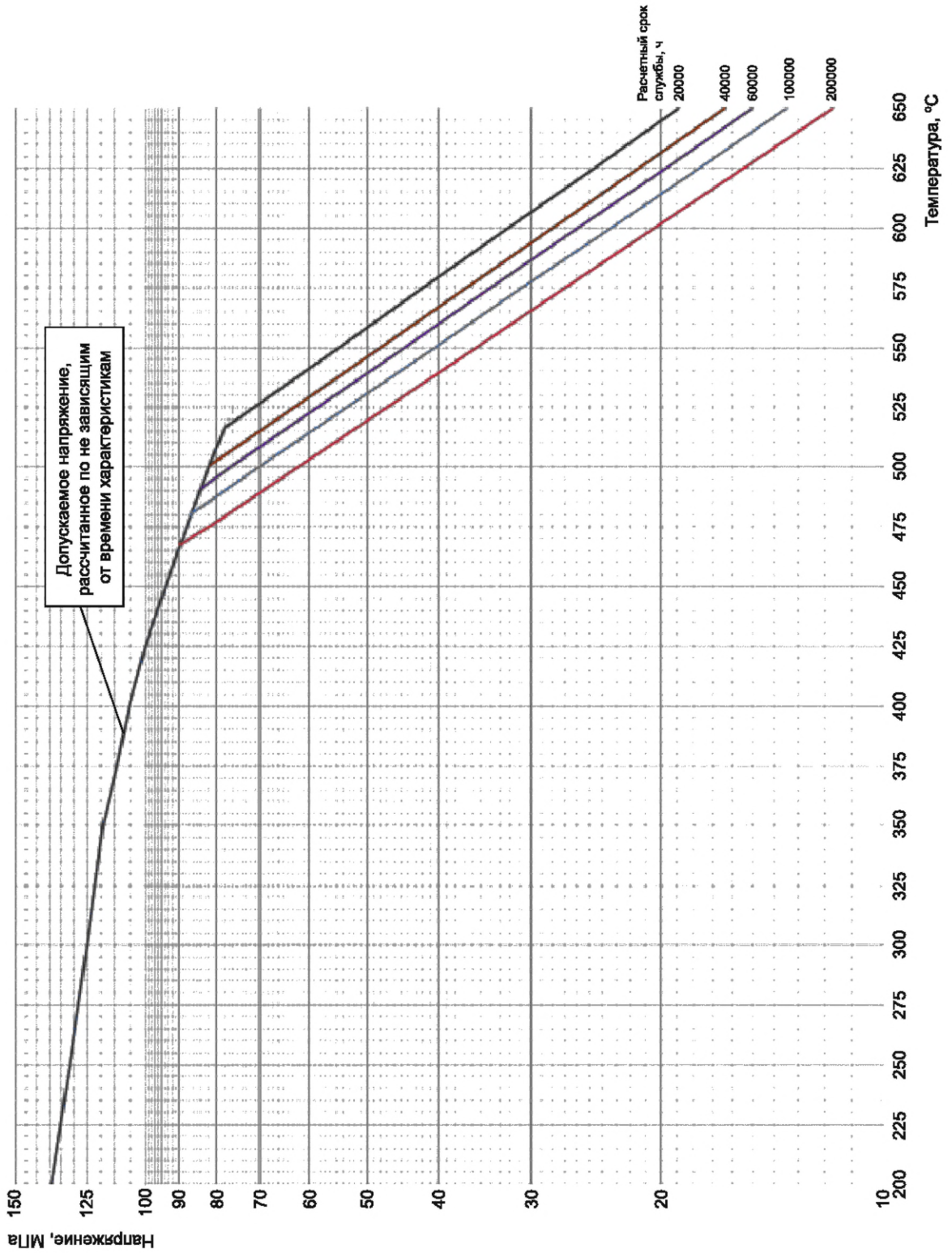


Рисунок А.7 — График определения допускаемых напряжений для стали марки 15Х5М

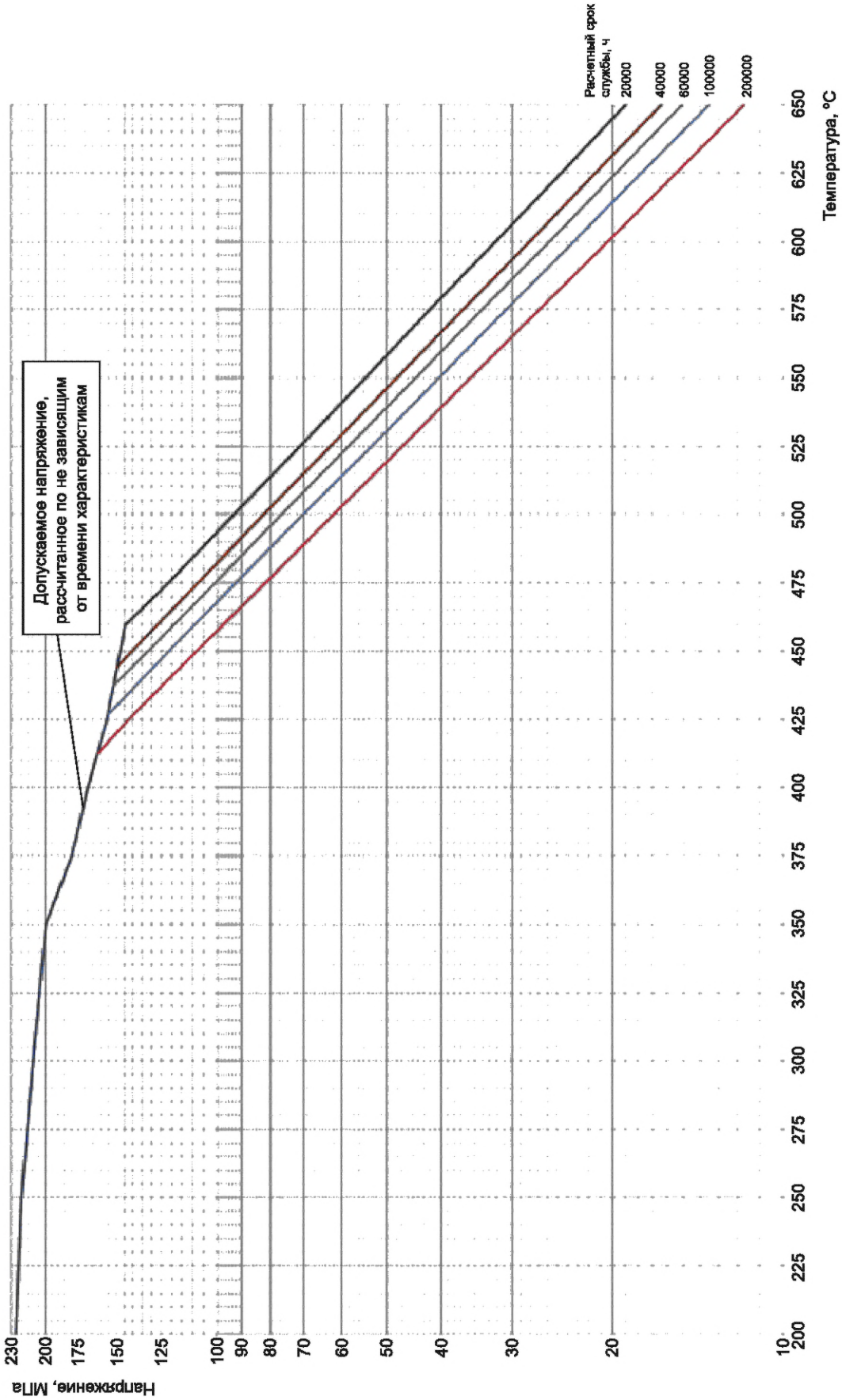


Рисунок А.8 — График определения допускаемых напряжений для стали марки 15Х5МУ

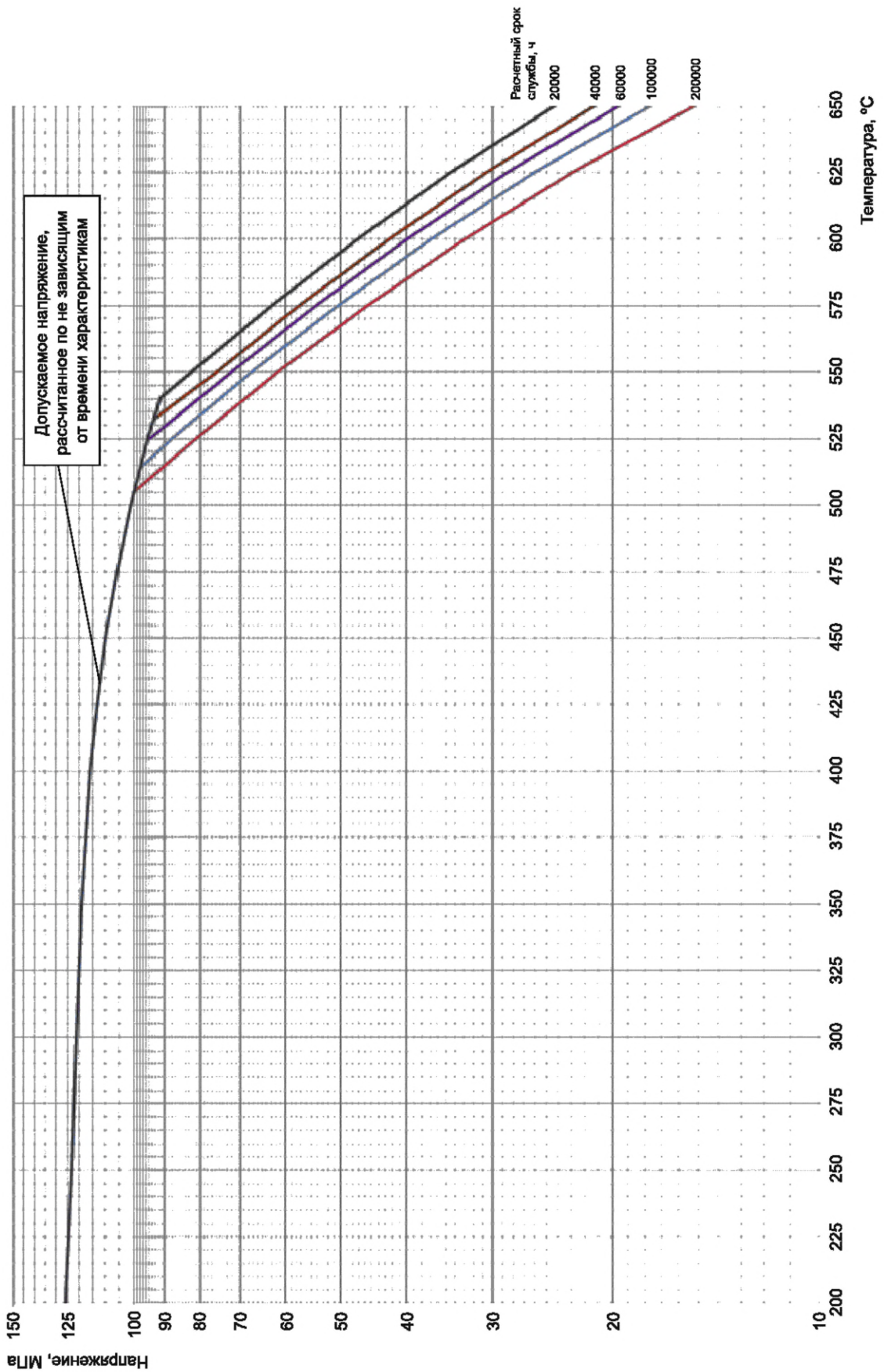


Рисунок А.9 — График определения допускаемых напряжений для стали марки 13Х9М1

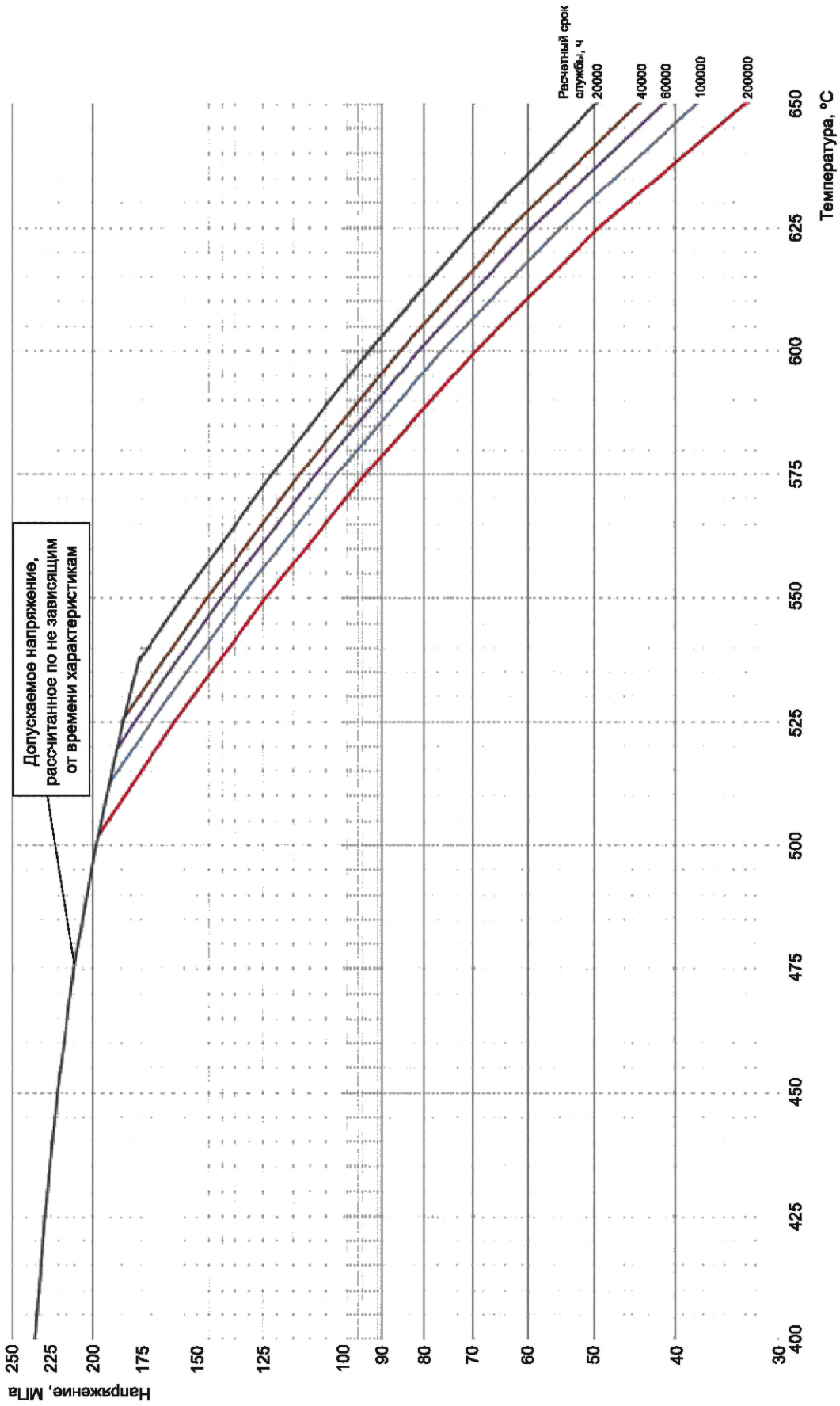


Рисунок А.10 — График определения допускаемых напряжений для стали марки 10Х9МФБ

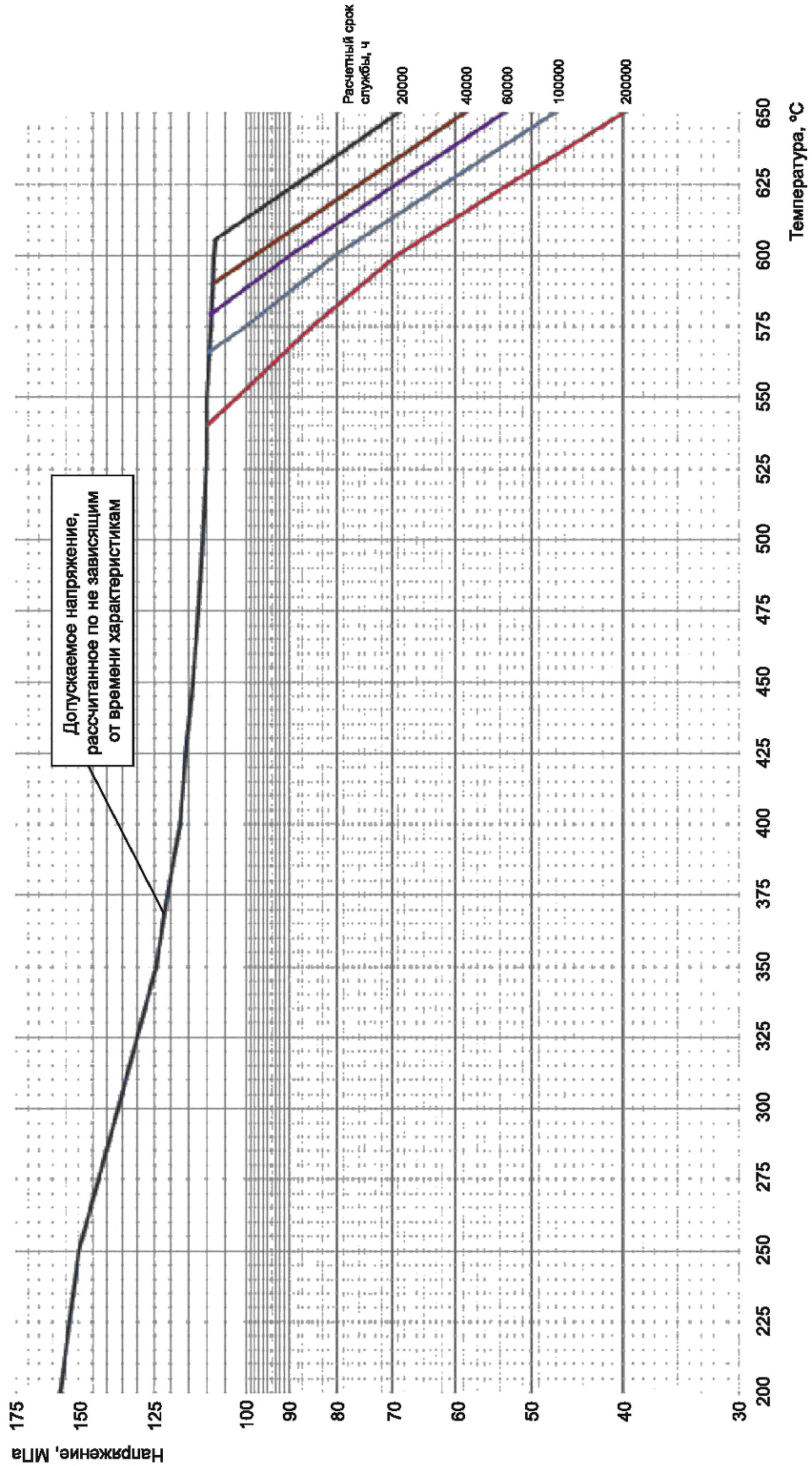


Рисунок А.11 — График определения допускаемых напряжений для сталей марок 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т

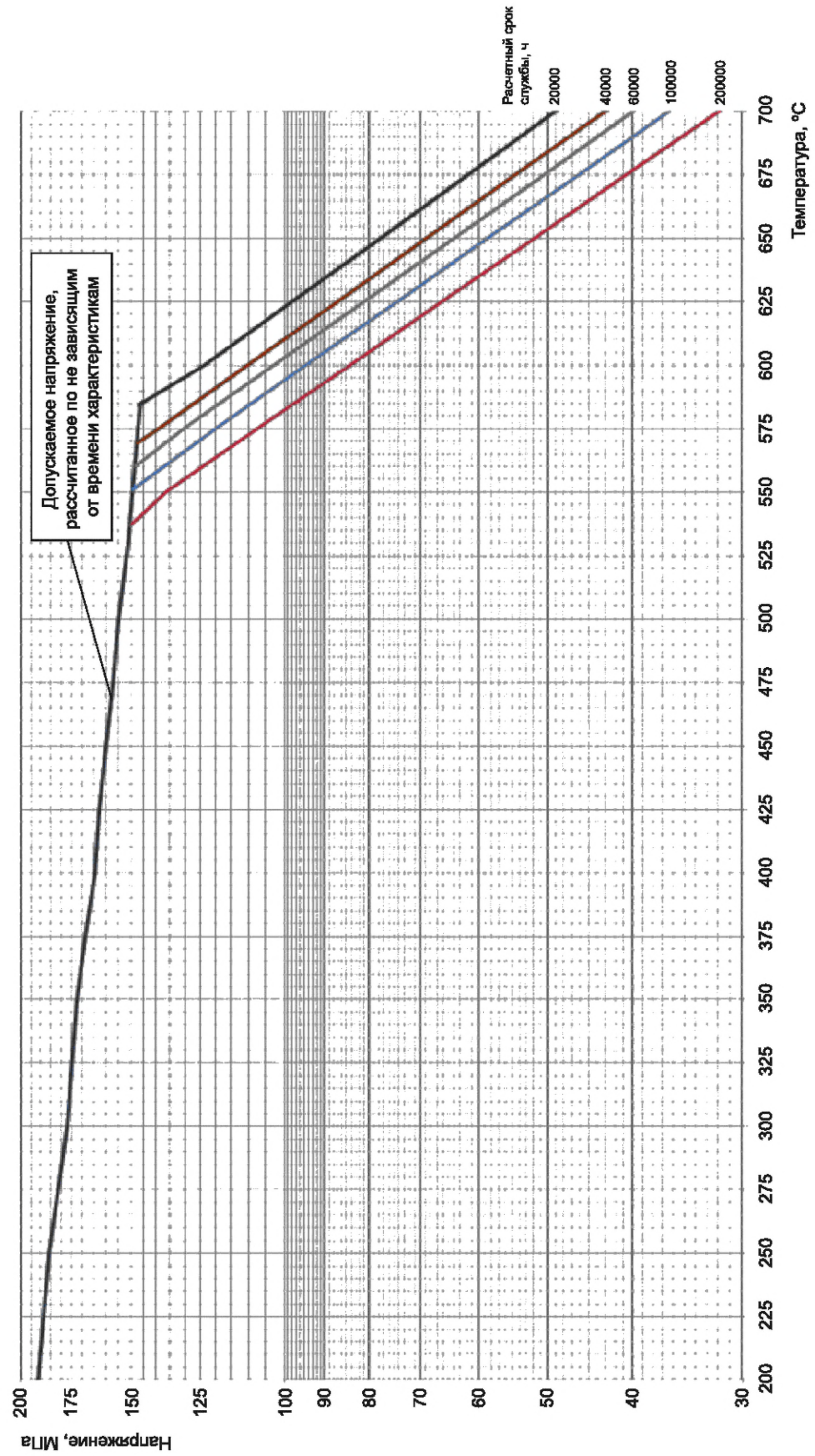


Рисунок А.12 — График определения допускаемых напряжений для стали марки 10Х17Н13М2Т

Приложение Б
(обязательное)

Показатель степени в уравнении длительной прочности для сталей различных марок

Графики определения показателя степени в уравнении длительной прочности *n* для сталей различных марок представлены на рисунках Б.1—Б.12.

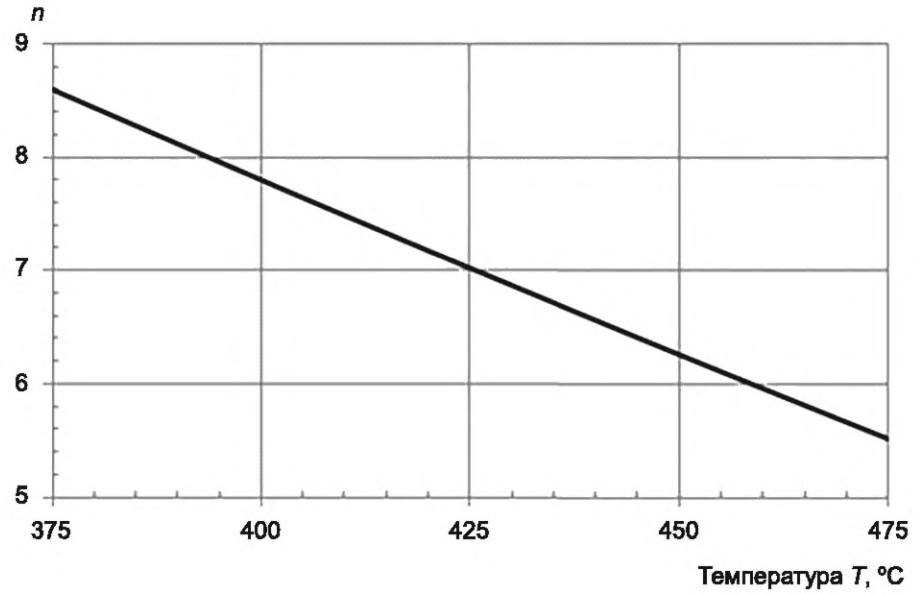


Рисунок Б.1 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для сталей марок 10, 20

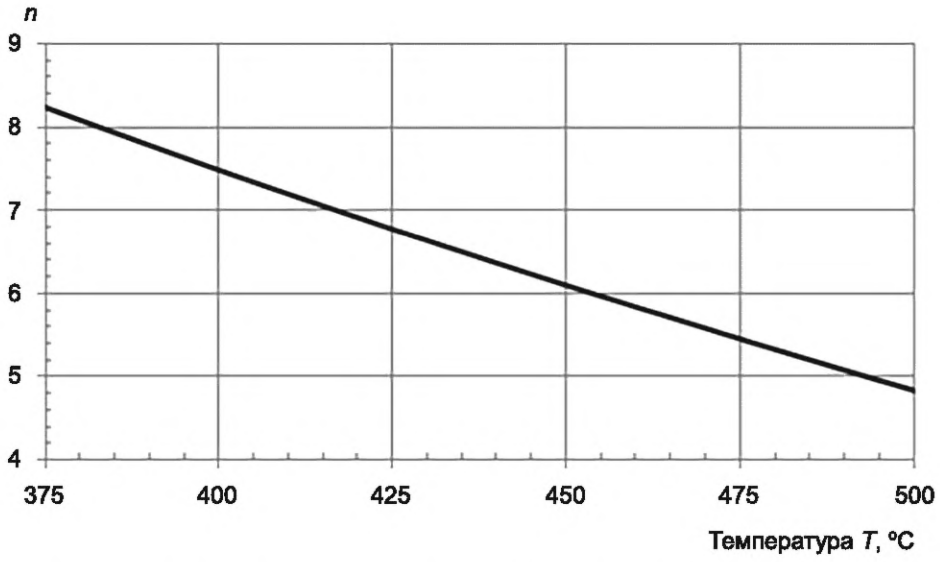


Рисунок Б.2 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для стали марки 09Г2С

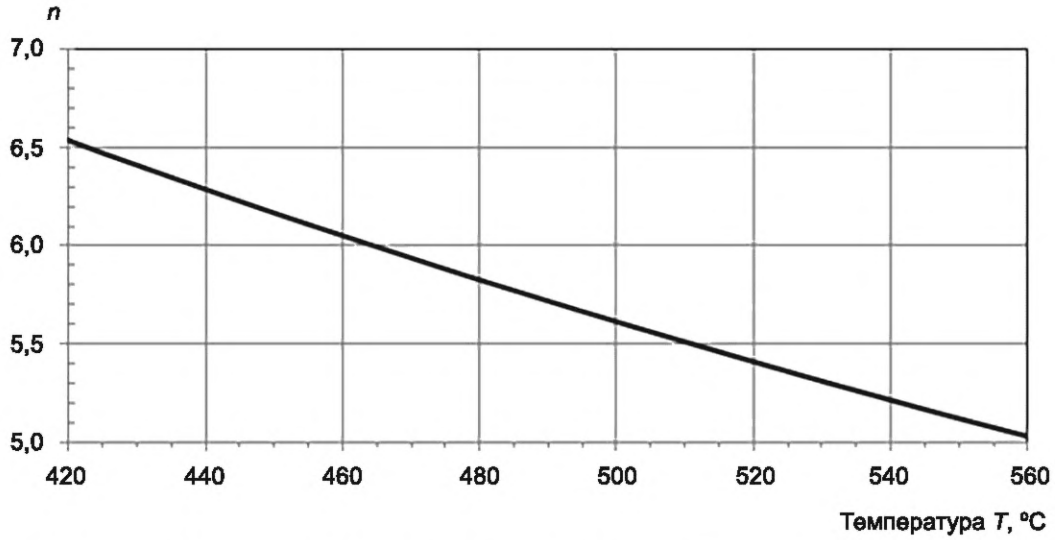


Рисунок Б.3 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для стали марки 15ХМ

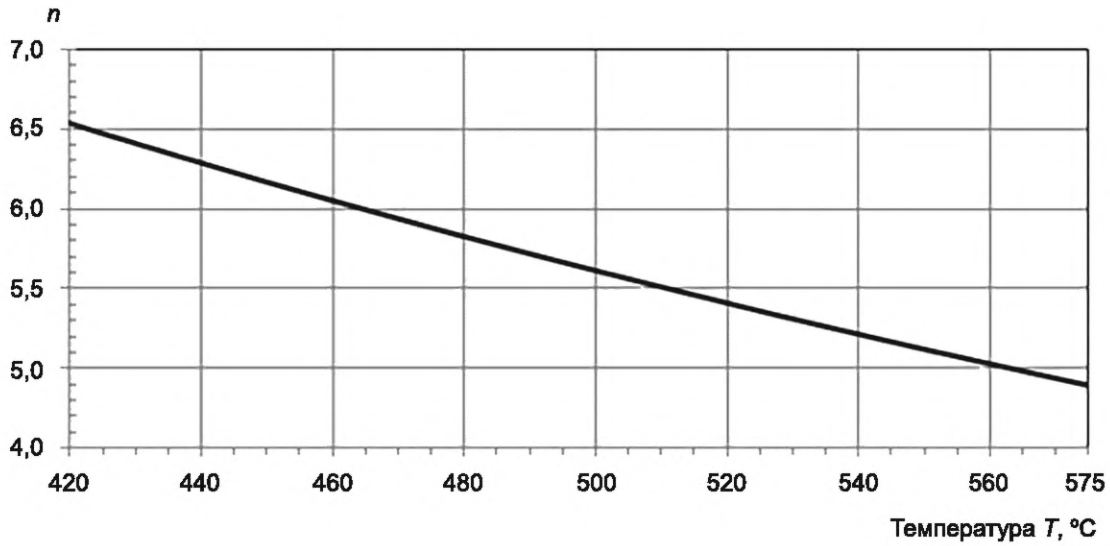


Рисунок Б.4 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для стали марки 12Х1МФ

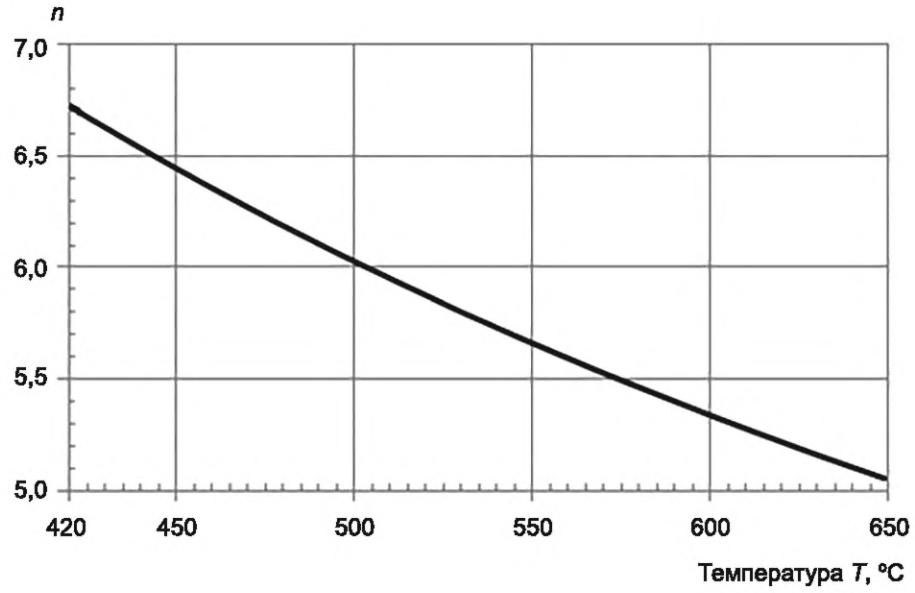


Рисунок Б.5 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для стали марки 10Х2М1

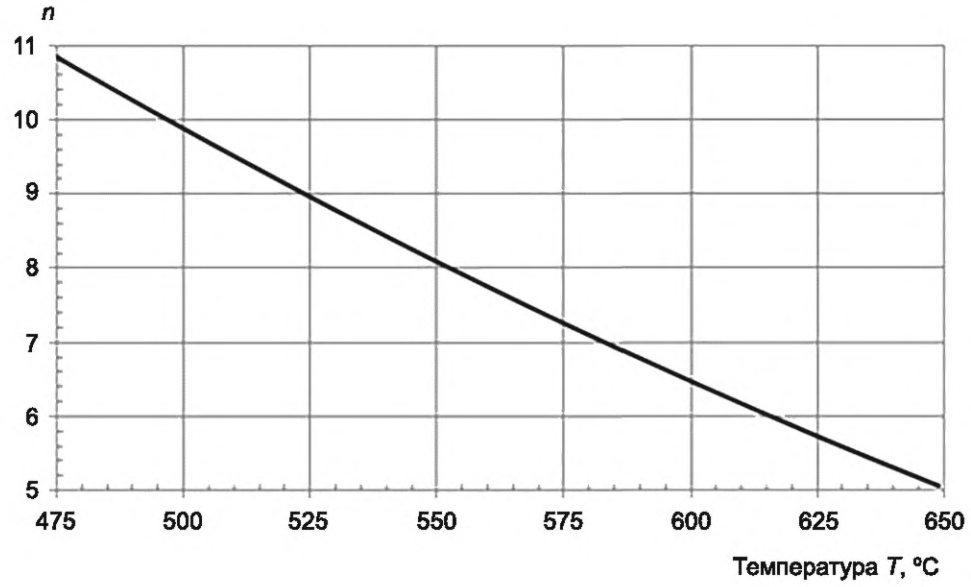


Рисунок Б.6 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для стали марки 12Х8ВФ

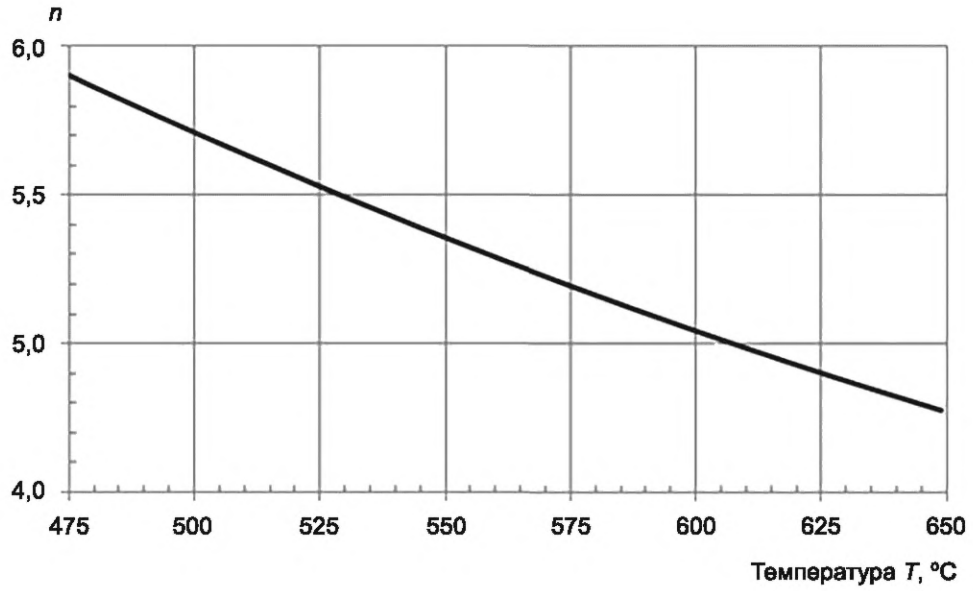


Рисунок Б.7 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для сталей марок 15Х5М, 15Х5МУ

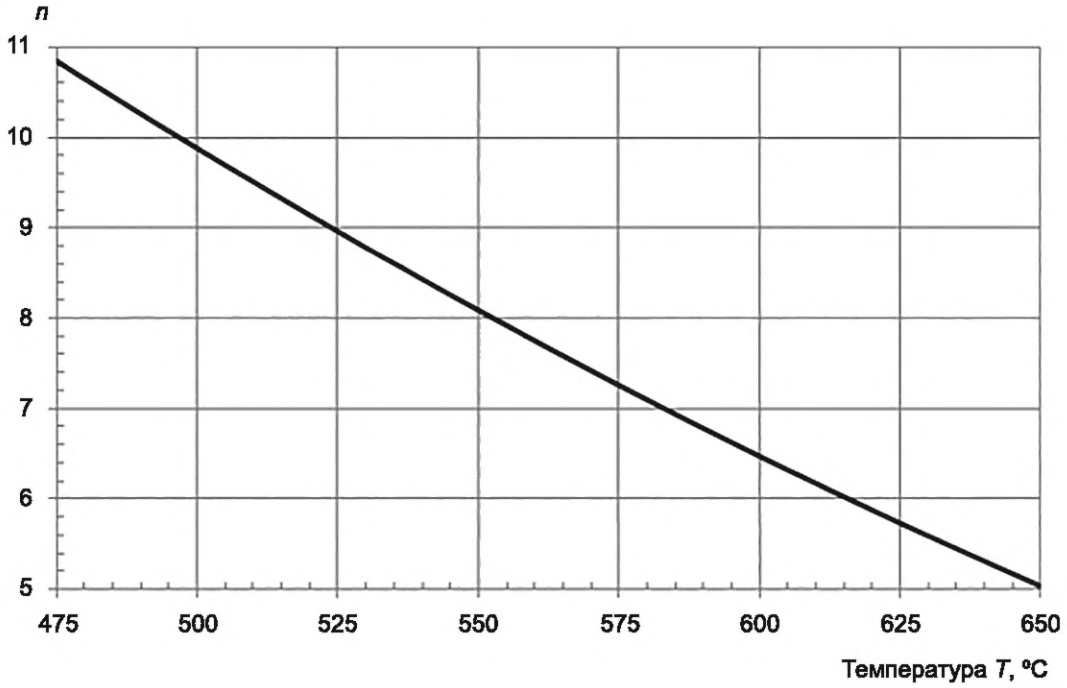


Рисунок Б.8 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для стали марки 13Х9М1

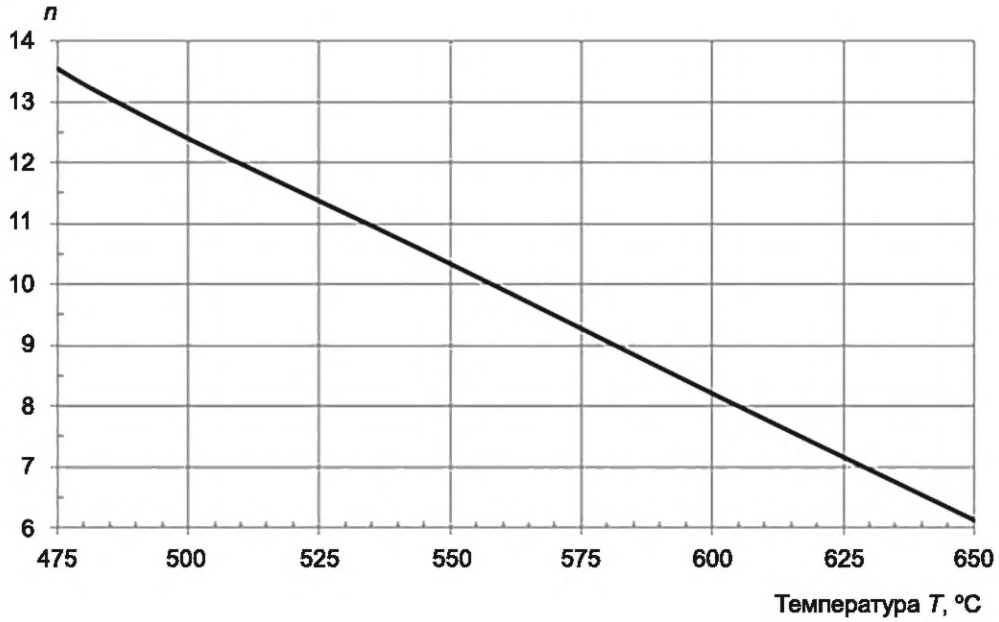


Рисунок Б.9 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для стали марки 10Х9МФБ

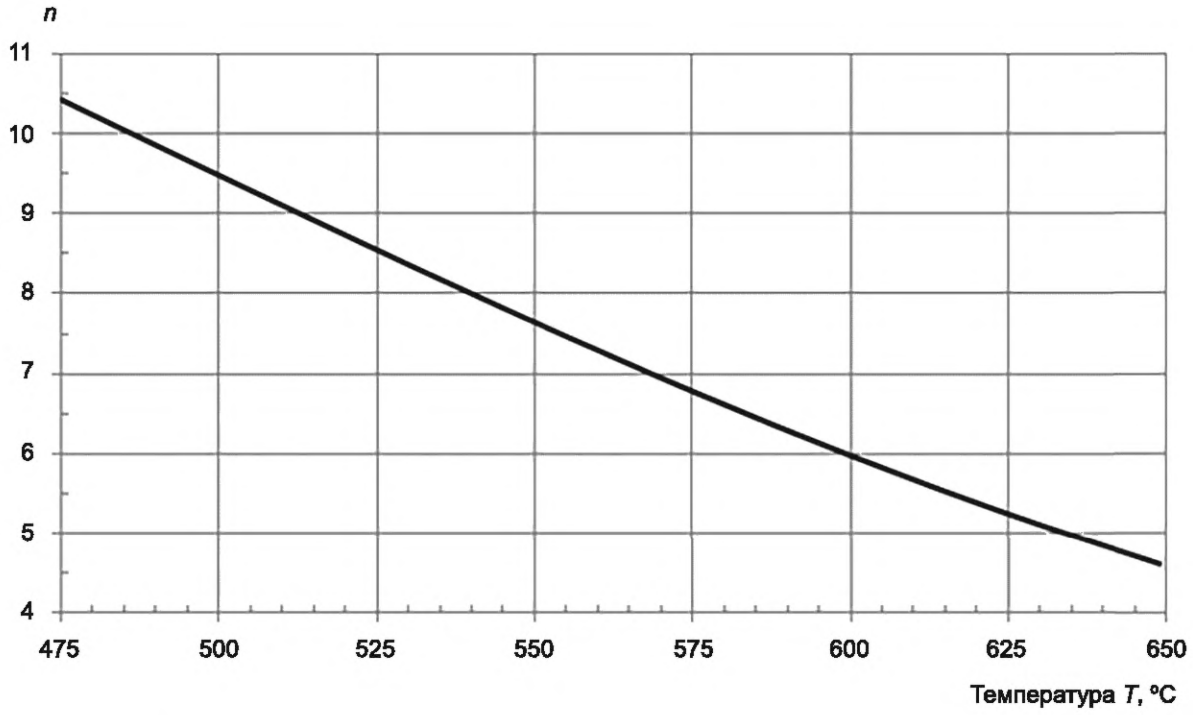


Рисунок Б.10 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для сталей марок 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б

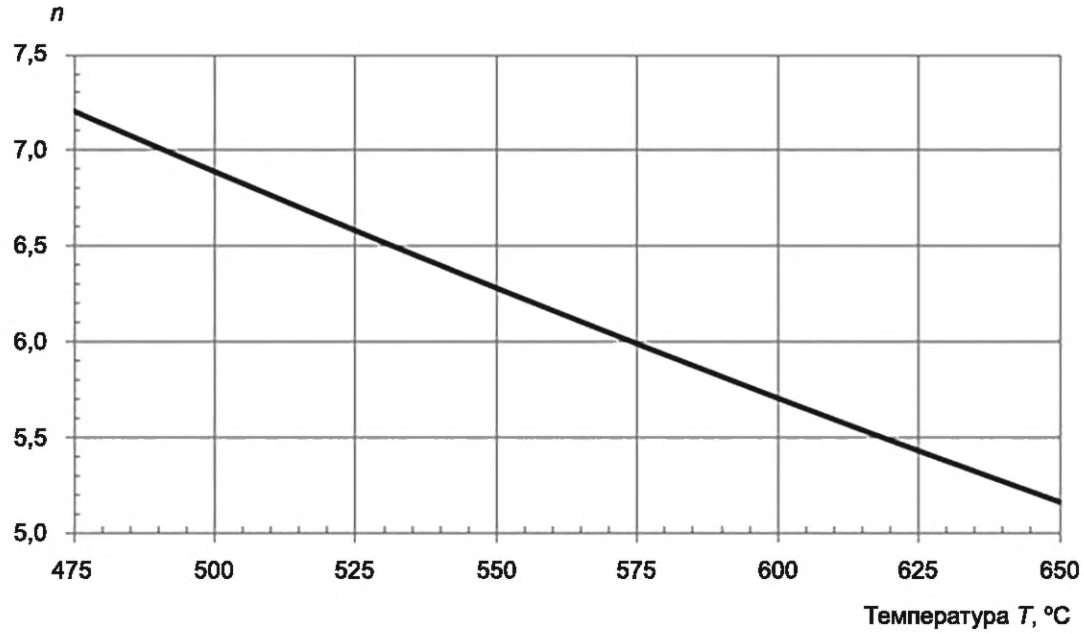


Рисунок Б.11 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для сталей марок 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т

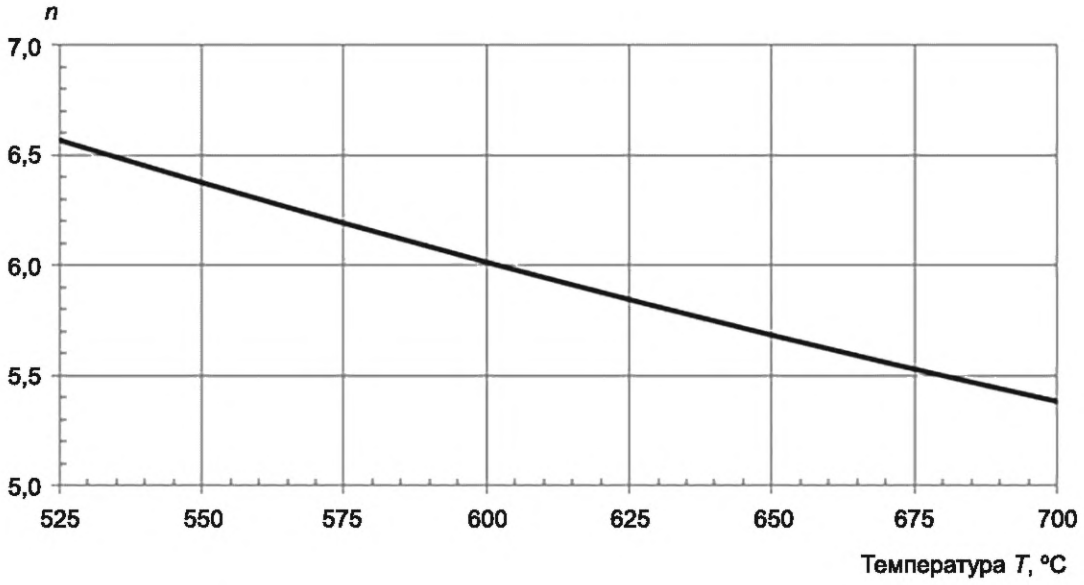


Рисунок Б.12 — График определения показателя степени в уравнении длительной прочности для стали марки 10Х17Н13М2Т

Приложение В
(обязательное)

Расчет и критерий оценки температурных напряжений при работе в области упругих деформаций

В.1 Расчет в соответствии с настоящим приложением выполняют для тех случаев, когда определяющим для назначения допускаемых напряжений в соответствии с разделом 7 является минимальное значение предела текучести при расчетной температуре $R_{e/t}$, МПа, или предела текучести при остаточном удлинении 0,2 % при расчетной температуре $R_{p0,2/t}$, МПа.

Для тех случаев, когда определяющим для назначения допускаемых напряжений является минимальное значение предела длительной прочности за расчетный срок службы при расчетной температуре $R_{m_{\min}/10^n/t}$, то расчет в соответствии с настоящим приложением не выполняют.

В.2 Максимальные температурные напряжения в области упругих деформаций $\sigma_{T_{\max}}$, МПа, определяют по формуле

$$\sigma_{T_{\max}} = X\left[\left(\frac{2y^2}{y^2-1}\right)\ln y - 1\right], \tag{В.1}$$

где

$$X = \left[\frac{\alpha E}{2(1-\nu)}\right]\left[\frac{\Delta T}{\ln y}\right] = \left[\frac{\alpha E}{4(1-\nu)}\right]\left[\frac{q_o D_o}{\lambda_s}\right], \tag{В.2}$$

$$y = D_o/D_i. \tag{В.3}$$

В.3 Коэффициент Пуассона материала трубы ν для высоких температур определяют по формуле

$$\nu = (E/2G) - 1. \tag{В.4}$$

В.4 Свойства материала трубы (α, E, ν, λ_s) определяют по средней толщине стенки и по средней температуре трубы.

В.5 Условия статической прочности при расчетных температурах ниже температур, при которых допускаемые напряжения определяют по пределам длительной прочности, выполняются, если

$$\sigma_m \le [\sigma], \tag{В.5}$$

где

$$[\sigma] = \frac{R_{e/t}}{n_т} \text{ или } \frac{R_{p0,2/t}}{n_т};$$

$$\sigma_m + \sigma_b \le [\sigma]_m \; \sigma_m + \sigma_b + \sigma_{T_{\max}} \le [\sigma]_R, \tag{В.6}$$

где

$$[\sigma]_m = 1{,}5[\sigma]; \; [\sigma]_R = 3[\sigma].$$

Следовательно,

$$\sigma_{T_{\max}} \le [\sigma_T] = [\sigma]_R - \sigma_m - \sigma_b. \tag{В.7}$$

Так как общее мембранное напряжение для трубы равно

$$\sigma_m = \frac{p}{2}\left(\frac{y+1}{y-1}\right) \le \left(\frac{R_{e/t}}{n_т} \text{ или } \frac{R_{p0,2/t}}{n_т}\right) \tag{В.8}$$

и сумма общего мембранного и изгибного напряжений σ_m, σ_b, МПа, равна

$$\sigma_m + \sigma_b \cong y\sigma_m \le y\left(\frac{R_{e/t}}{n_т} \text{ или } \frac{R_{p0,2/t}}{n_т}\right), \tag{В.9}$$

то для сталей марок 10, 20, 09Г2С и 15ХМ, 12Х1МФ, 10Х2М1, 15Х5М, 15Х5МУ, 12Х8ВФ, 10Х9МФБ, 13Х9М1

$$\sigma_m + \sigma_b \le y\left(\frac{R_{e/t}}{1{,}5} \text{ или } \frac{R_{p0,2/t}}{1{,}5}\right) = 0{,}67y\left(R_{e/t} \text{ или } R_{p0,2/t}\right), \tag{В.10}$$

$$[\sigma]_R = 3[\sigma] = 3\left(\frac{R_{e/t}}{1{,}5} \text{ или } \frac{R_{p0,2/t}}{1{,}5}\right) = 2\left(R_{e/t} \text{ или } R_{p0,2/t}\right); \tag{В.11}$$

для сталей марок 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т

$$\sigma_m + \sigma_b \le y\left(\frac{\frac{R_e}{t}}{1{,}1} \text{ или } \frac{\frac{R_{p0,2}}{t}}{1{,}1}\right) = 0{,}9y\left(\frac{R_e}{t} \text{ или } \frac{R_{p0,2}}{t}\right); \quad \text{(В.12)}$$

$$\left[\sigma\right]_R = 3\left[\sigma\right] = 3\left(\frac{R_{e/t}}{1{,}1} \text{ или } \frac{R_{p0,2/t}}{1{,}1}\right) = 2{,}7\left(R_{e/t} \text{ или } R_{p0,2/t}\right). \quad \text{(В.13)}$$

В.6 Допускаемые температурные напряжения $[\sigma_T]$, МПа, определяют по формулам:

- для сталей марок 10, 20, 09Г2С и 15ХМ, 12Х1МФ, 10Х2М1, 15Х5М, 15Х5МУ, 12Х8ВФ, 10Х9МФБ, 13Х9М1

$$[\sigma_T] = (2{,}00 - 0{,}67y)(R_{e/t} \text{ или } R_{p0,2/t}); \quad \text{(В.14)}$$

- для сталей марок 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т

$$[\sigma_T] = (2{,}7 - 0{,}9y)(R_{e/t} \text{ или } R_{p0,2/t}). \quad \text{(В.15)}$$

Приложение Г
(рекомендуемое)

Расчет максимальной температуры поверхности радиантных труб

Г.1 В настоящем приложении приведен приближенный расчет максимальной температуры поверхности радиантных труб.

Расчет учитывает такие факторы, как коэффициент теплоотдачи между стенкой трубы и пленкой жидкости, тепловой поток при теплопередаче излучением, расположение труб, степень загрязнения внутренней поверхности труб и характеристики потока жидкости в трубах.

В некоторых случаях для определения максимальной температуры поверхности радиантных труб необходимо проводить анализ последовательно, труба за трубой, от входа жидкости до достижения начальной точки кипения.

Метод расчета максимальной температуры поверхности радиантных труб, приведенный в настоящем приложении, является приближенным и использует ряд допущений, характерных для большинства нагревательных печей, используемых в химической, нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей промышленности.

Например, поток жидкости в трубах в приводимых ниже зависимостях считают турбулентным, так как ламинарное течение жидкости в трубах нагревательных печей, используемых в химической, нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей промышленности, встречается крайне редко.

Допускается вместо расчета максимальной температуры поверхности радиантных труб по приводимым ниже формулам использовать более точные методы расчета, в том числе методы, использующие численное моделирование гидрогазодинамики и процесса теплопередачи в радиантных змеевиках нагревательных печей.

Г.2 Коэффициент теплоотдачи от жидкости к металлу на внутренней поверхности труб является основным фактором, необходимым для расчета максимальной температуры поверхности труб.

Число Рейнольдса *Re* определяют по формуле

$$Re = \frac{D_i \cdot q_{mA}}{1000 \cdot \mu_{f,Tb}}. \qquad (Г.1)$$

Число Прандтля *Pr* определяют по формуле

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu_{f,Tb}}{\lambda_{f,Tb}}. \qquad (Г.2)$$

Для однофазных жидких сред коэффициент теплоотдачи рассчитывают по одному из двух приведенных ниже уравнений (Г.3) или (Г.4).

Коэффициент теплоотдачи жидкой фракции α_l, Вт/(м^2 · К), для режима течения с *Re* более 10 000 определяют по формуле

$$\alpha_1 = 23 \cdot \left(\frac{\lambda_{f,Tb}}{D_i}\right) \cdot Re^{0,8} \cdot P_r^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_{f,Tb}}{\mu_{f,Tw}}\right)^{0,14}. \qquad (Г.3)$$

Коэффициент теплоотдачи газообразной фракции α_v, Вт/(м^2 · К), для режима течения с *Re* более 15 000 определяют по формуле

$$\alpha_v = 21 \cdot \left(\frac{\lambda_{f,Tb}}{D_i}\right) \cdot Re^{0,8} \cdot P_r^{0,4} \cdot \left(\frac{T_b}{T_w}\right)^{0,5}. \qquad (Г.4)$$

Для двухфазных потоков коэффициент теплоотдачи двухфазного потока α_{2p}, Вт/(м^{2}К), приближенно определяют по формуле

$$\alpha_{2p} = \alpha_l w_l + \alpha_v w_v. \qquad (Г.5)$$

Коэффициенты теплоотдачи жидкости и пара α_l и α_v необходимо рассчитать с использованием массового расхода смешанной газожидкостной среды и с использованием свойств жидкости и пара соответственно.

При двухфазном потоке мелкодисперсного типа («туман»), возникающем из-за наличия взвеси мелких капель жидкости в паровой «основной» фазе (например, на выходе из вакуумной печи), коэффициент теплоотдачи рассчитывают на основе суммарного расхода с использованием формулы (Г.4), а не (Г.5).

Также следует иметь в виду, что в формуле (Г.5) применительно к двухфазным потокам в вертикальных трубах при реализации режима кольцевого течения для восходящего и нисходящего течений коэффициенты теплоотдачи различные. Коэффициент теплоотдачи для нисходящего потока, как правило, ниже, чем для восходящего потока.

Допускается использовать для определения коэффициента теплоотдачи для двухфазных потоков более точные и сложные методы расчета.

Г.3 Максимальный локальный тепловой поток в любой точке змеевика можно оценить по среднему тепловому потоку, равному тепловой мощности в радиантной секции, деленной на общую площадь наружной поверхности змеевика в секции или зоне. Максимальный локальный тепловой поток используют для расчета максимальной температуры поверхности труб.

Локальные тепловые потоки значительно различаются как по длине змеевика, так и в каждом сечении трубы по окружности. Значительные различия в тепловом потоке по окружности трубы являются следствием различий в потоке излучения из-за затенения другими трубами или размещения труб рядом со стенкой. Высокая теплопроводность металла труб и конвективный теплообмен от дымовых газов, как правило, уменьшают различия в тепловом потоке по окружности. Продольные различия в тепловом потоке обусловлены близостью к горелкам и колебаниями температуры излучающей топки и температуры жидкой среды. В дополнение к изменениям температуры в радиантной секции для труб в конвективной части печи имеется высокий конвективный тепловой поток.

Максимальный тепловой поток излучением на наружной поверхности трубы $q_{R,\max}$, Вт/м^2, для внешней поверхности в любой точке змеевика определяют по формуле

$$q_{R,\max} = F_{cir} \cdot F_L \cdot F_T \cdot q_{R,ave} + q_{conv}. \quad (Г.6)$$

Коэффициент, учитывающий изменения теплового потока по окружности трубы F_{cir}, приведенный на рисунке Г.1, является функцией расстояния между трубами и геометрии змеевика и представляет собой отношение максимального локального теплового потока на полностью открытой поверхности трубы к среднему тепловому потоку вокруг трубы, рассчитан только для теплопередачи излучением. Такие факторы, как высокая теплопроводность металла стенки трубы и конвекция дымовых газов, снижают его значение. Поскольку в данном расчете эти факторы не учитывают, то расчетное значение несколько превышает фактический максимальный тепловой поток.

Графики определения коэффициента учета изменения теплового потока по окружности трубы представлены на рисунке Г.1. Данные графики построены в предположении, что расстояние между центрами труб и стенкой в полтора раза больше номинального диаметра трубы и с учетом только теплообмена излучением и без учета конвективного теплообмена. Данные графики показывают зависимость максимального локального и среднего теплового потоков от шага расположения труб и диаметра трубы.

Коэффициент, учитывающий изменения теплового потока в продольном направлении F_L, используют для учета изменения теплового потока по длине факела: от горелки до выхода из топки. Как правило, значение этого коэффициента принимают равным от 1,0 до 1,5. В топке с максимально равномерным распределением теплового потока его значение может быть равно 1,0. В зависимости от соотношения сторон топки и высоты пламени максимальное значение этого коэффициента может превышать 1,5 (обычно на высоте, соответствующей 2/3 длины пламени) и составлять 0,7 внизу и 0,5 наверху радиантной секции печи.

Более точно этот коэффициент может быть оценен с помощью методов математического моделирования процесса горения и излучения.

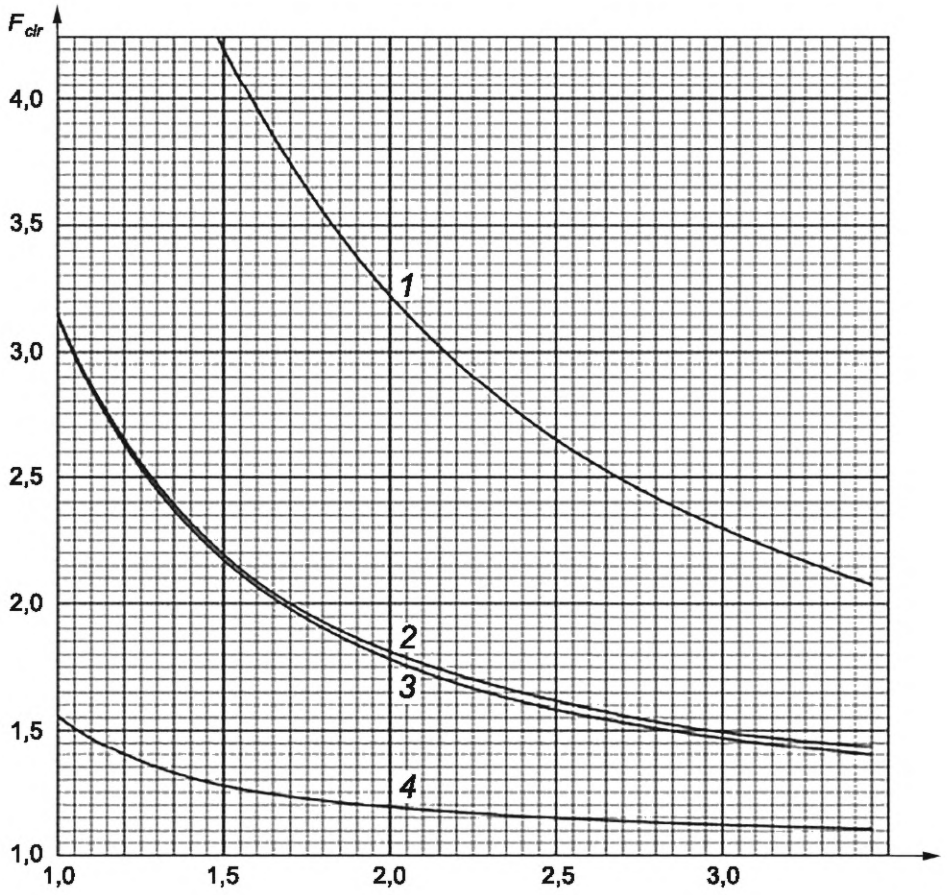
В существующих печах для оценки профиля теплового потока может быть использовано инфракрасное измерение температур труб и опор труб вдоль «пути» пламени.

Коэффициент, учитывающий влияние температуры металла трубы на тепловой поток излучением F_T, составляет менее 1,0 вблизи выхода из змеевика и в областях с максимальной температурой металла труб и превышает 1,0 в областях с более низкими температурами металла труб. Для большинства случаев коэффициент может быть аппроксимирован по формуле

$$F_T = \frac{T_{q,ave}^4 - T_{tm}^4}{T_{q,ave}^4 - T_{tm,ave}^4}. \quad (Г.7)$$

Конвективный тепловой поток в большинстве участков радиантной секции обычно невелик по сравнению с тепловым потоком излучением. Однако в конвективной секции конвективный тепловой поток может быть значительным, поэтому его следует добавлять к тепловому потоку излучением, когда оценивают максимальный тепловой поток в конвективной секции. Следует обратить внимание на то, что часто местоположение максимального конвективного теплового потока не совпадает с максимальным тепловым потоком излучением.

Г.4 Для расчета максимальной температуры поверхности радиантных труб в дополнение к коэффициенту теплопередачи и максимальному тепловому потоку необходимо знать температуру ядра потока жидкости в змеевике и ее изменение вдоль длины змеевика. Температура ядра потока жидкости в змеевике может быть взята из проектной документации или рассчитана специально.



Отношение шага труб к наружному диаметру трубы:

1 — двойной ряд у стенки, расположение труб по вершинам треугольников; *2* — двойной ряд труб с одинаковым излучением с обеих сторон и расстоянием между рядами, равным двум диаметрам труб; *3* — одинарный ряд труб у стенки; *4* — одинарный ряд труб с одинаковым излучением с обеих сторон

Рисунок Г.1 — Графики определения коэффициента учета изменения теплового потока по окружности трубы

Максимальную температуру поверхности труб T_{max}, °С, определяют по формуле

$$T_{max} = T_{bf} + \Delta T_{ff} + \Delta T_f + \Delta T_{tw}, \quad (Г.8)$$

где

$$\Delta T_{ff} = \frac{q_{R,max}}{\propto_{ff}} \left(\frac{D_o}{D_i} \right); \quad (Г.9)$$

$$\Delta T_f = q_{R,max} \cdot R_f \cdot \left(\frac{D_o}{D_i - \delta_f} \right); \quad (Г.10)$$

$$\Delta T_{tw} = q_{R,max} \cdot \left(\frac{D_o \cdot \ln \frac{D_o}{D_i}}{2000 \cdot \lambda_{tm}} \right). \quad (Г.11)$$

Приближенно может быть принято $\propto_{ff} = \propto_{2p}$.

Г.5 Влияние внутреннего загрязнения на температуру материала трубы можно рассчитать, если определен коэффициент загрязнения.

При наличии кокса или окалины коэффициент загрязнения R_f определяют по формуле

$$R_f = \frac{\delta_f}{\lambda_f}. \quad (Г.12)$$

При отсутствии данных о теплопроводности загрязнителя можно использовать следующий диапазон значений:

- для нефтяного кокса — от 4,91 до 5,89 Вт/(м · К);
- окалины (оксида железа) — от 0,87 до 1,05 Вт/(м · К).

Максимальную температуру пристеночного слоя жидкости T_{fm}, °С, определяют по формуле

$$T_{fm} = T_{bf} + \Delta T_{ff}. \quad (Г.13)$$

УДК 66.023:006.354

ОКС 71.120
75.200

Ключевые слова: расчет на прочность, змеевик, труба, отвод, нагревательная трубчатая печь, допускаемые напряжения, коэффициент запаса прочности

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Е.Д. Дульнева*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 07.02.2024. Подписано в печать 29.02.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 3,72.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru