МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ ДОПУСТИМЫХ РАЗНОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУР И СКОРОСТЕЙ ПРОГРЕВА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ КОТЛОВ И ПАРОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БЛОКОВ

МУ 34-70-030-81



МОСКВА
“ТЕКСУС-ИНФО”
2012

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР

ГЛАВНОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ ДОПУСТИМЫХ РАЗНОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУР И СКОРОСТЕЙ ПРОГРЕВА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ КОТЛОВ И ПАРОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БЛОКОВ

СЛУЖБА ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА И ИНФОРМАЦИИ СОЮЗТЕХЭНЕРГО

Москва 1983

Р А З Р А Б О Т А Н О ВТИ им.Ф.Э.Дзержинского
И С П О Л Н И Т Е Л И В.Г.Зеленский, А.А.Бельский, В.П.Плотников, В.В.Севрюгин, А.Г.Землянская (ВТИ), А.Д.Горешник, А.А.Федоришин (Южтехэнерго), В.М.Вигак, А.В.Костенко (Институт прикладных проблем механики и математики АН УССР)
У Т В Е Р Ж Д Е Н О Главным техническим управлением по эксплуатации энергосистем

Главный инженер Ю.И.ТИМОФЕЕВ

О Г Л А В Л Е Н И Е

I. Общие положения 3
2. Основные критерии прочности 4
3. Барабаны котлов I5
4. Коллекторы котлов и детали паропроводов 20
П р и л о ж е н и е I. Условные обозначения..... 33
П р и л о ж е н и е 2. Формулы для определения напряжений в кромках отверстий водоопускных и подъемных труб барабанов котлов по характеристикам изменений параметров рабочей среды 36
П р и л о ж е н и е 3. Формулы для определения напряжений в характерных точках гиба трубы, трубы со штуцером и в сварном стыке трубы..... 4I
П р и л о ж е н и е 4. Примеры расчетов 45
Список использованной литературы 83

© СПО Союзтехэнерго, I983.

УДК [621.186.3 + 621.165] : 669.001.5(083.96)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ ДОПУСТИМЫХ РАЗНОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУР И СКОРОСТЕЙ ПРОГРЕВА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ КОТЛОВ И ПАРОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БЛОКОВ

МУ 34-70-030-81

Срок действия установлен
с 01.01.83 г.
до 01.01.88 г.

Настоящие Методические указания определяют основные методы и требования по расчетной оценке допустимых разностей температур и скоростей прогрева деталей котлов и паропроводов энергетических блоков ТЭС и предназначены для проектных и наладочных организаций Минэнерго СССР в качестве рекомендуемого; МУ могут также использоваться другими организациями при отработке режимов эксплуатации и наладке оборудования ТЭС.

Рекомендуемые методы расчета применимы при условии, что конструкции, материалы, изготовление, монтаж и контроль удовлетворяют требованиям соответствующих норм и правил Госгортехнадзора СССР.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Выбор допустимых перепадов температур и скоростей прогрева деталей энергоблоков производится на основе расчетов, устанавливающих взаимосвязь между режимами эксплуатации и долговечностью оборудования.

I.2. В качестве допустимых принимаются расчетные перепады температур и скорости прогрева или расхолаживания, при которых обеспечивается заданная долговечность без повреждения (образования трещин) конструкций.

I.3. Расчеты конструкций выполняются с учетом всех действующих на них нагрузок при типовых режимах эксплуатации.

I.4. В качестве расчетных принимаются наиболее напряженные узлы конструкций.

I.5. В случаях вынужденного превышения расчетных значений скоростей и достижения расчетной долговечности возможность эксплуатации барабанов котлов, коллекторов, тройников, корпусов армату-

ры и других толстостенных элементов оборудования должна подтверждаться результатами контроля сплошности металла.

При этом интервалы между контрольными проверками состояния металла в наиболее напряженных зонах конструкций не должны превышать половину расчетной долговечности по числу циклов.

Для деталей, например гибов трубопроводов, в которых образование поверхностных трещин сопряжено с быстрой потерей несущей способности, превышение расчетных скоростей прогрева и расхолаживания недопустимо.

I.6. Условные обозначения приведены в приложении I.

2. ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ

2.I. Расчеты производятся по амплитудам приведенных условных упругих напряжений σ_a. В качестве расчетной принимается амплитуда напряжений, равная половине максимального размаха приведенных условных упругих напряжений $(\sigma_R)_{макс}$, определяемого по произведению местной общей деформации на модуль упругости материала при максимальной температуре цикла $E_{t_{макс}}$.

$$\sigma_a = 0{,}5(\sigma_R)_{макс} = 0{,}5 E_{t_{макс}} \left[\frac{(\sigma_{K,j})_{макс}}{E_1} - \frac{(\sigma_{K,j})_{мин}}{E_2} \right],$$

где $K_1\ j = I, 2, 3$; $\sigma_{K,j} = \sigma_K - \sigma_j$ – условные приведенные напряжения;

E_I и E_2 – модули упругости при температурах, соответствующих максимальным и минимальным приведенным напряжениям.

2.2. В местах концентрации амплитуда напряжений равна произведению

$$\sigma_a = K_\sigma \cdot \sigma'_a ,$$

здесь K_σ соответствует $\alpha\varepsilon$.

2.3. Главные напряжения σ_I, σ_2, σ_3 определяются как алгебраическая сумма напряжений от всех видов нагрузок, действующих в данном направлении с учетом концентраторов по каждой составляющей.

2.4. Деформирование считается упругим, если размах условных приведенных напряжений σ_R не превышает сумму пределов текучести при максимальной $(\sigma_{0,2})t_{макс}$ и минимальной $(\sigma_{0,2})t_{мин}$ температурах цикла,

$$\sigma_R \leq (\sigma_{0,2})t_{макс} + (\sigma_{0,2})t_{мин}.$$

2.5. При упругом деформировании коэффициент концентрации деформаций α_ε принимается равным эффективному коэффициенту концентрации напряжений, значение которого равно

$(\alpha_\sigma)_{эф} = \alpha_\sigma$ при $\alpha_\sigma \leq 3$

и $(\alpha_\sigma)_{эф} = 1 + q\,(\alpha_\sigma - 1)$ при $\alpha_\sigma > 3$.

Коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений

$$q = \frac{1}{1 + u/\rho},$$

где ρ – радиус кривизны в зоне концентраций, мм;

u – константа материала. При σ_B, равном 35; 53 и 70, u соответственно равна 0,38; 0,25; 0,17 мм [9].

Допускается применять следующие значения упругих коэффициентов концентрации:

– окружных напряжений от внутреннего давления на внутренних кромках одиночных отверстий $\alpha_\rho = 3$ – для цилиндрических элементов и $\alpha_\rho = 2$ – для сферических элементов;

– окружных и осевых температурных напряжений на кромках отверстий $\alpha_t = 1{,}8 \div 2{,}0$;

– напряжений от внутреннего давления и изгиба для угловых сварных соединений типа "штуцер-труба" $\alpha_\rho = \alpha_u = 4$, для стыковых соединений труб равной толщины $\alpha_\rho = \alpha_u = 2$. Если в зоне концентрации произведена обработка сварных соединений радиусом не мен< 10 мм, указанные коэффициенты принимаются равными 3 и 1,2 соответственно. При полном удалении концентраторов для стыковых сварных соединений

$$\alpha_\rho = \alpha_u = 1{,}0.$$

Для всех других случаев определение коэффициентов концентрации упругих напряжений рекомендуется проводить согласно [6,9,10].

2.6. При неупругом деформировании коэффициент концентрации деформаций α_ε определяется численными либо экспериментальными методами или по формуле

$$\alpha_\varepsilon = \frac{\alpha_\sigma^2}{\alpha_\sigma^1} K_F ,$$

где

$$\alpha_\sigma^1 = \frac{(\alpha_{0,2})t_{макс} + (\sigma_{0,2})t_{мин}}{2\sigma_a^1} .$$

Коэффициент K_F при линейном упрочнении сталей равен

$$K_F = \frac{1}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_n)^{0,5(1-G_T)[1-(\bar{\sigma}_n - 1/\alpha_\sigma)]}} .$$

Модуль упрочнения G_T для сталей I2XIMФ, I5XIMIФ и I2XI8HI2T может приниматься равным 0,I5.

$$\bar{\sigma}_n = \frac{\sigma_a^1}{(\sigma_{0,2})t_{макс}} \quad \text{при} \quad \sigma_a^1 \le (\sigma_{0,2})t_{макс};$$

$$\bar{\sigma}_n = 1 + (\bar{\varepsilon} - 1)G_T \quad \text{при} \quad \sigma_a^1 > (\sigma_{0,2})t_{макс},$$

где $\bar{\varepsilon}$ – относительная деформация, равная отношению деформации при σ_a^1 к деформации, соответствующей $(\sigma_{0,2})\,t_{макс}$.

При $\frac{\alpha_\sigma}{\alpha_T} > 1,25$ и отсутствии данных по G_T значение K_F для других жаропрочных сталей допускается принимать равным 0,8.

Если окажется, что по расчету $K_F > I$ и $\alpha_\sigma^1 < I$, то принимается $K_F = \alpha_\sigma^1 = I$.

Размах условных приведенных напряжений с учетом K_F при неупругом деформировании вычисляется по формуле

$$(\sigma_R)_{н.у} = \frac{K_F \sigma_R^2}{(\sigma_{0,2})t_{макс} + (\sigma_{0,2})t_{мин}} .$$

Для отверстий типовых элементов трубопроводов предельное значение K_σ допускается принимать равным 4,5.

2.7. Прочность рассчитываемого элемента обеспечивается, если размах приведенных условных напряжений, вычисленных без учета концентраторов и местных температурных напряжений, соответствует ус-

ловию упругого деформирования и амплитуда условных приведенных напряжений σ_a, определенная с учетом концентрации по всем компонентам главных напряжений, не превышает допустимое значение для заданного числа и асимметрии циклов.

2.8. Для пластичных сталей, применяемых в котлотурбостроении (табл.I), допустимая амплитуда условных приведенных напряжений σ_a^* или допустимое количество циклов (расчетная долговечность) N^* при заданной амплитуде напряжения определяется из соотношения

$$\sigma_a^* = \frac{2{,}3 \cdot n_\partial \cdot E^t_{мин}}{4\sqrt{n_N N^*}} \cdot \ell g \frac{100}{100 - \psi} + \frac{1 - r}{2} \eta\, \sigma_{доп},$$

где $E^t_{мин}$ - минимальное значение модуля упругости в интервале рабочих температур, МПа(кгс/мм^2).

Расчетное значение относительного сужения

$$\psi = \frac{1}{2}(\psi^t_{мин} + \psi^t_B),$$

где $\psi^t_{мин}$ - минимальное значение относительного сужения в рабочем интервале температур, %;

ψ^t_B - равномерное сужение, определяемое при напряжении, равном пределу прочности, по формуле

$$\psi^t_B = \psi^t_{мин} \cdot \frac{1 - \frac{\sigma^t_{0,2}}{\sigma^t_B}}{1 + 1{,}4 \cdot \frac{\psi^t_{мин}}{100} - \frac{\sigma^t_{0,2}}{\sigma^t_B}}.$$

Коэффициент асимметрии цикла определяется для упругого и повторно упруго-пластического нагружения по формулам:

$$r = \frac{\sigma_{макс} - \sigma_R}{\sigma_{макс}} \text{ при } \sigma_{макс} \leq (\sigma_{0,2})t_{мин} \text{ и}$$

$$\sigma_R < (\sigma_{0,2})t_{макс} + (\sigma_{0,2})t_{мин};$$

$$r = \frac{(\sigma_{0,2})t_{мин} - \sigma_R}{(\sigma_{0,2})t_{мин}} \quad \text{при } \sigma_{макс} > (\sigma_{0,2})t_{мин} \text{ и } \sigma_R < (\sigma_{0,2})t_{мин} + (\sigma_{0,2})t_{макс};$$

$$r = -\frac{(\sigma_{0,2})t_{макс}}{(\sigma_{0,2})t_{мин}} \quad \text{при } \sigma_R \geq (\sigma_{0,2})t_{макс} + (\sigma_{0,2})t_{мин}.$$

Если же окажется, что $r < -1$ или $r > 1$, то в расчете принимается $r = -1$.

При упругом нагружении, когда максимальная температура ниже температуры ползучести, коэффициент асимметрии вычисляется с учетом остаточных напряжений, определяемых соответствующим расчетом или экспериментально.

n_N – принимается равным 10. Для отдельных толстостенных элементов, ограничивающих маневренные характеристики установок, значение n_N может быть снижено до 5 при условии опытного подтверждения такой возможности или организации контроля металла с периодичностью, равной половине расчетной долговечности N^x при $n_N = 10$.

Коэффициент η выбирается в зависимости от значения концентрации условных приведенных напряжений: $\eta = 0{,}75$, если $K_\sigma \leq 1{,}2$ или $\Psi \leq 30\%$; $\eta = 1{,}0$, если $K_\sigma \geq 3$. При $1{,}2 < K_\sigma < 3$ коэффициент η оценивается интерполяцией.

Коэффициент n_∂ учитывает снижение циклической прочности металла в условиях ползучести и релаксации напряжений и выражается следующим образом:

$$n_\partial = \frac{lg(1 + \delta_\partial^t - \delta')}{lg(1 - \delta_o^t)},$$

где δ_∂^t – длительная пластичность металла (относительное удлинение при длительном разрыве за расчетный период);

δ_o^t – относительное удлинение при кратковременных испытаниях;

δ' – односторонне накопленная деформация вследствие ползучести, равная

$$\delta' = \delta_{\partial}^{t} \frac{\tau}{T} \left(\frac{\sigma_{эк}}{\sigma_{\partial}}\right)^{m},$$

где τ - время работы металла в условиях ползучести;

T - расчетное время.

Допускается принимать $\sigma_{\partial} = 1{,}5\,\sigma_{\partial on}$;

$\sigma_{эк}$ - эквивалентное напряжение, определяемое на основании анализа напряженного состояния рассчитываемого элемента.

При переменном значении текущего напряжения σ_{τ}, при котором происходит процесс ползучести, эквивалентное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_{эк} = \left[\frac{1}{\tau}\int_{0}^{\tau} \sigma_{\tau}^{m}\, d\tau\right]^{\frac{1}{m}}.$$

Наиболее представительные результаты расчетов σ_{a}^{*} обеспечиваются при использовании фактических характеристик металла. При отсутствии фактических данных допускается использовать характеристики сталей, приведенные в табл.1.

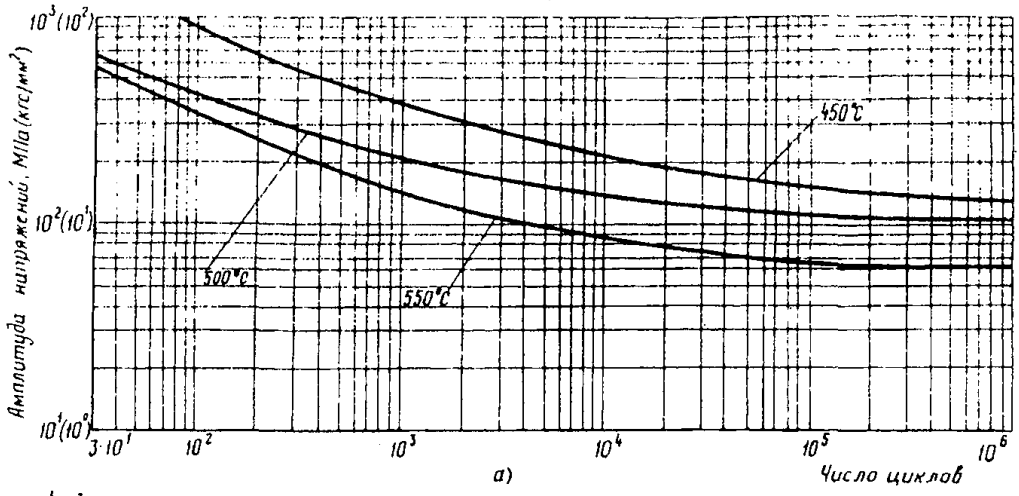
2.9. Долговечность считается неограниченной, если в области малоцикловой усталости $\sigma_{a} \le \frac{1-r}{2}\,\eta\,\sigma_{\partial on}$.

2.10. Кривые малоцикловой усталости ряда сталей для определения допустимого числа циклов по амплитудам напряжений, либо допустимых амплитуд напряжений по требуемому числу циклов при $\eta = 1$ и $r = -1$ приведены на рис.1.

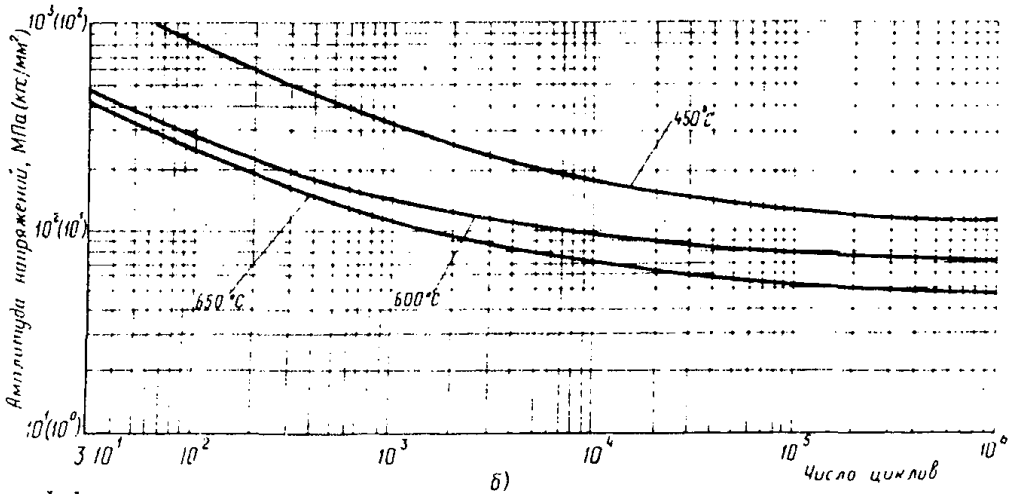
2.11. При определении допустимой амплитуды напряжений σ_{ak} для элементов теплоэнергетического оборудования из углеродистых и низколегированных сталей (барабанов котлов, водоопускных и пароперепускных труб и др.), работающих при переменных нагрузках в условиях коррозионного воздействия горячей воды и влажного пара, принимается дополнительный запас φ_{k} по напряжениям $\sigma_{ak} = \varphi_{k}\,\sigma_{a}^{*}$, где φ_{k} для углеродистых сталей равен 0,5; для низколегированных - 0,7 и нержавеющих - 0,85.

2.12. Допустимая амплитуда напряжений σ_{ac}^{*} для сварных соединений, удовлетворяющих требованиям ОСТ 108.031.02-75, определяется по амплитудам, допустимым для основного металла с учетом коэффициента ослабления

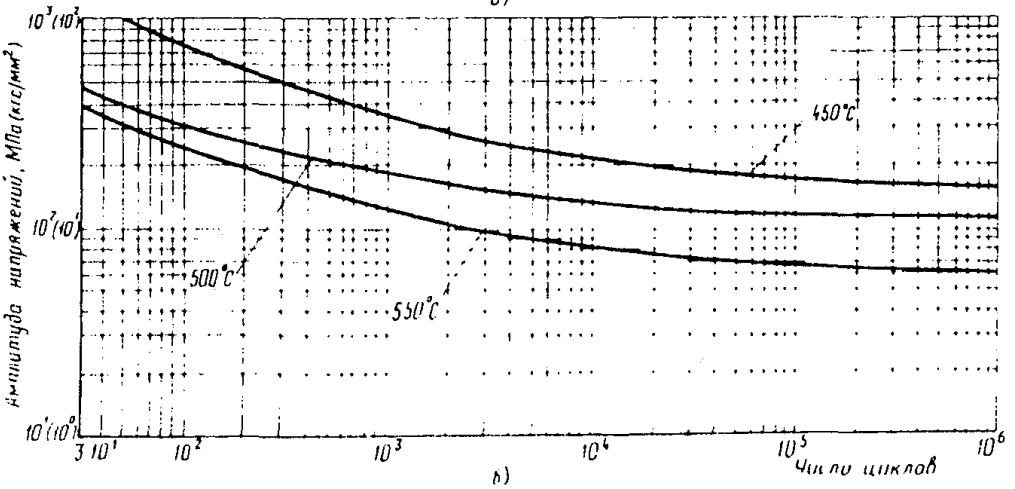
$$\sigma_{ac}^{*} = \varphi_{c}\,\sigma_{a}^{*}.$$


Амплитуда напряжений, МПа (кгс/мм²)
$10^3(10^2)$
$10^2(10^1)$
$10^1(10^0)$
$3\cdot10^1$
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6
450°C
500°C
550°C
Число циклов

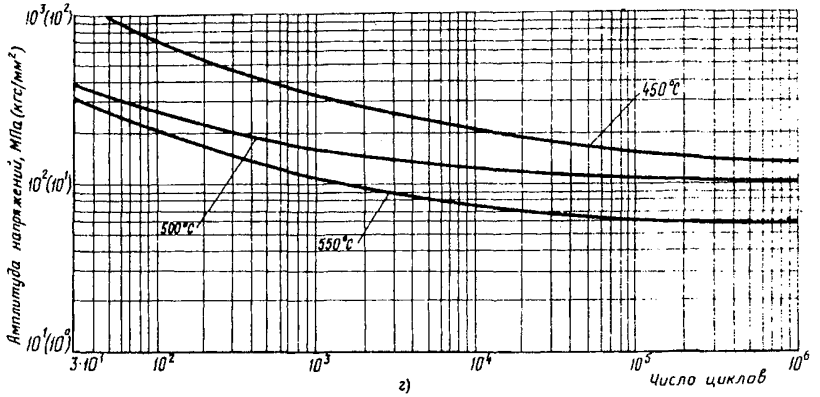
а)


Амплитуда напряжений, МПа (кгс/мм²)
$10^3(10^2)$
$10^2(10^1)$
$10^1(10^0)$
$3\cdot10^1$
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6
450°C
650°C
600°C
Число циклов

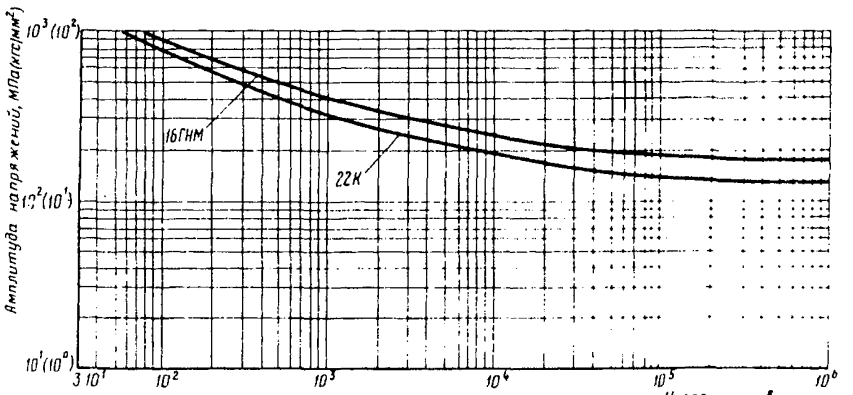
б)


Амплитуда напряжений, МПа (кгс/мм²)
$10^3(10^2)$
$10^2(10^1)$
$10^1(10^0)$
$3\cdot10^1$
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6
450°C
500°C
550°C
Число циклов

в)



г)



д)

Рис.I. Расчетные кривые усталости для стали:
а - I2ХIМФ ; *б* - I2Х18Н12Т; *в* - I5ХIМIФ; *г* - I5ХIМIФЛ; *д* - I6ГНМ и 22К (до температуры 350°С)

Таблица I

Марка стали	Интервал температуры, t, °С	Модуль упругости $E^t \cdot 10^{-4}$, МПа (кгс/мм^2)	Допустимые напряжения $\sigma_{доп}$, МПа (кгс/мм^2)	Длительная пластичность $\delta_д$	Коэффициент $n_д$	Относительное сужение ψ, %	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм^2)	$\sigma_{0,2}/\sigma_в$	Показатель ползучести m
I2XIMФ	20–450	I8,4(I,88)	I35(I3,8)		I,00		275(28)	0,5I	–
	540	I7,4(I,78)	72(7,3)	0,08	0,39	40	245(25)	0,54	5,0
	560	I7,2(I,76)	58(5,9)		0,39		2I6(22)	0,54	4,3
I5XIMIФ	20–450	I7,8(I,8I)	I49(I5,2)		I,00		3I4(32)	0,57	–
	540	–	76(7,8)	0,07	0,32	36	294(30)	0,60	3,6
	560	I6,9(I,72)	63(6,4)		0,32		284(29)	0,69	3,2
I5XIMIФБ	20–450	I7,9(I,83)	I26(I2,9)		I,00		3I4(32)	0,55	–
	540	–	65(6,6)	0,06	0,27	33	255(26)	0,73	–
	560	I7,I(I,74)	53(5,4)		0,27		226(23)	0,90	3,2
I2XI8NI2T	20–450	I7,0(I,73)	I05(I0,7)		I,00		2I6(22)	0,43	–
	600	I5,7(I,60)	72(7,4)	0,04	0,I7	39	I47(I5)	0,42	4,I
	650	I5,2(I,55)	47(4,8)		0,I7		II8(I2)	0,25	–
XI6H9M2	20–450	I7,4(I,78)	I05(I0,7)		I,00		2I6(22)	0,42	–
	600	I5,6(I,6I)	72(7,4)	0,23	0,58	43	I37(I4)	0,33	–
	650	I5,5(I,58)	47(4,8)		0,58		II8(I2)	0,3I	–
20X3MBФ	20–450	I7,3(I,76)	–		I,00		47I(48)	0,65	–
(ЭИ4I5)	500	I5,3(I,56)	I37(I4,0)	0,08	0,55	33	55I(46)	0,75	4,7
	550	I3,5(I,38)	II8(I2,0)		0,55		402(4I)	0,76	3,4
25XIMФ	20–450	I9,4(I,98)	I63(I6,6)		I,00		530(54)	0,76	–
(Р2М)	500	I8,2(I,86)	I43(I4,6)	0,08	0,46	35	4I2(42)	0,77	3,5
	550	I7,4(I,78)	98(I0,0)		0,46		392(40)	0,77	2,5
XH35BT	20–450	I7,6(I,80)	235(24,0)		I,00		5I0(52)	0,68	–
	600	I6,6(I,69)	I37(I4,0)	0,02	0,II	I6	373(38)	0,70	–
	650	I6,I(I,64)	I04(I0,6)		0,II		353(36)	0,72	8

20	20-350	I6,2(I,65)	I04(I0,6)		I,00		2I6(22)	0,44	-
	450	I5,3(I,56)	58(5,9)	0,I8	0,69	40	I57(I6)	0,45	5,3
	500	I5,0(I,52)	25(2,6)		0,69		I47(I5)	0,45	4,9
IX2M	20-400	-			I,00		274(28)	-	-
	500	I7,6(I,79)	88(9,0)	0,I8	0,90	4I	264(27)	-	-
	550	I7,2(I,75)	59(6,0)		0,90		255(26)	-	-
I5XM	20-350	-	I37(I4,0)		I,00		226(23)	0,43	7,2
	450	I6,8(I,7I)	I24(I2,7)	0,08	0,42	40	I86(I9)	0,39	6,4
	500	-	I03(I0,5)		0,42		I47(I5)	0,3I	6,0
I2XM	20-350	I9,2(I,96)	I34(I3,7)		I,00		206(2I)	0,47	7,2
	450	I7,8(I,82)	I22(I2,5)	0,05	0,20	35	I76(I8)	0,42	6,4
	500	I7,4(I,78)	93(9,5)		0,20		I37(I4)	0,35	6,0
IXIIB2MФ	20-450	I7,6(I,79)	I22(I2,4)		I,00		294(30)	0,43	-
(ЭИ756)	550	I6,I(I,64)	I05(I0,7)	0,I2	0,38	33	265(27)	0,90	4,3
	600	I5,4(I,57)	59(6,0)		0,38		2I6(22)	0,90	3,7
22K	20	20,6(2,I)	I67(I7,0)		I,0		226(23)	0,5	-
	350	I9,6(2,0)	I18(I2,0)	-		32	I67(I7)	0,5	-
I6ГНМ	20	20,I(2,05)	I86(I9,0)				294(30)	0,5	-
		I8,6(I,9)	I57(I6,0)	-	I,00	37	255(26)	0,5	-

Примечание. E_t, $\sigma_{доп}$, $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{c2}/\sigma_в$ и m определены по данным [I0-I3]. Значения коэффициента $n_д$ даны без учета одностороннего накопления остаточной деформации (при $\delta' = 0$), что характерно для трубопроводов, коллекторов, корпусов арматуры, барабанов котлов и гнутых элементов при отсутствии овальности поперечного сечения. В случае овальности или искажения формы поперечного сечения гибов значение коэффициента $n_д$ необходимо рассчитывать с учетом δ'.

Для углеродистой и низколегированной сталей коэффициент ослабления φ_c = I,0 при наличии термообработки и φ_c = 0,9 без термообработки.

Для хромомолибденованадиевых, высокохромистых и аустенитных сталей при температуре до 500°С коэффициент φ_c = 0,8 при наличии термообработки и φ_c = 0,6 без термообработки. При более высоких температурах значение φ_c принимаются равными 0,7 и 0,5 соответственно.

При наличии исходных данных по свойствам металла расчеты сварных соединений выполняются по п.2.8.

2.I3. В случаях определения допустимой амплитуды напряжений $\sigma^*_{a\partial}$ для элементов оборудования, которые на стадии изготовления или монтажа подвергались деформированию без последующей термообработки, принимается дополнительный запас φ_∂, учитывающий снижение деформационной способности материала

$$\sigma^*_{a\partial} = \varphi_\partial \sigma^*_a + (1-\varphi_\partial)\eta\,\sigma_{\partial on}\frac{1-r}{2},$$

где

$$\varphi_\partial = \frac{\ell g(1+\delta-\delta'')}{\ell g(1+\delta_0)};$$

δ'' – значение технологической деформации металла при изготовлении данной конструкции с учетом снижения пластичности вследствие деформационного старения.

2.I4. При наличии результатов испытаний натурных конструкций или их моделей для режимов нагружения, соответствующих эксплуатационным, принятые значения коэффициентов запасов и концентрации напряжений могут быть уточнены.

2.I5. Оценка ресурса (расчетной долговечности по числу циклов) с учетом нестационарных силовых и температурных нагрузок при эксплуатации оборудования на различных режимах является завершающим этапом поверочных расчетов и производится на основе линейного суммирования относительной повреждаемости при каждом расчетном режиме (цикле) нагружения, т.е.

$$\sum_{i=1}^{K}\frac{N_i}{[N]_i} \le 1,$$

где N_i - число циклов нагружения на i -м режиме нагружения;
$[N]_i$ - допустимое число циклов на i-м режиме нагружения, определяемое по формуле, приведенной в п.2.8;
K - общее число режимов нагружения.

При использовании экспериментальных данных по фактическим значениям пластичности и прочности металла расчет допустимых напряжений и располагаемого ресурса длительно работавшего оборудования допускается выполнять без учета предистории его нагружения.

При выборе режимов эксплуатации оценка относительной повреждаемости с учетом фактического количества циклов на каждом режиме является исходным этапом расчетов, в процессе которого производится определение допустимых значений амплитуд напряжений.

Количество циклов, определяемое по амплитудам приведенных напряжений от внутреннего давления и внешних нагрузок (изгибающего и крутящего моментов от самокомпенсации, весовых и других нагрузок), характеризует предельно возможную долговечность $N_{пр}$ и является показателем работоспособности конструкций при переменных нагрузках.

3. БАРАБАНЫ КОТЛОВ

3.I. При определении допустимых скоростей прогрева-расхолаживания барабанов и разностей температур "верх-низ" в качестве типовых расчетных режимов принимаются: пуск из холодного состояния, пуск из неостывшего состояния (после ночного простоя) и гидроопрессовка.

Для оценки относительной повреждаемости соотношение числа пусков из холодного состояния N_x, из неостывшего состояния $N_г$ и гидроопрессовок $N_{го}$ принимается соответственно I : 4 : 0,I* .

В качестве исходного расчетного режима принимается пуск из холодного состояния. Допустимое число таких пусков N_x^* определяется согласно уравнению линейного суммирования повреждаемости с учетом рекомендуемого соотношения пусков.

$$\frac{N_x}{N_x^*} + \frac{4N_x}{N_г^*} + \frac{0{,}1N_x}{N_{го}^*} \leqslant D;$$

$$D = 1 - \sum_{n=1}^{n=i} \frac{N_{нр}}{N^*_{нр}} ,$$

где $N_{нр}, N^*_{нр}$ - фактическое и предельное число нерасчетных режимов, сумма отношений которых характеризует относительную повреждаемость металла (исчерпание ресурса) вследствие отклонений от нормальных условий эксплуатации барабанов (позднее замыкание циркуляции в экранах, тепловые удары при заполнении водой и др.);

$N^*_{нр}$ - вычисляется по амплитудам напряжений, определяемых в каждом конкретном случае расчетно-экспериментальными методами в соответствии с требованиями разд.2 и приложения 2.

3.2. Расчет допустимых скоростей прогрева $V_п$, выбор допустимых разностей температур "верх-низ" при прогреве $\Delta\vartheta$, расчет $N^*_х$, $N^*_г$ и $N^*_{г0}$ производятся по напряженному состоянию кромки в продольном сечении отверстия водоопускных труб.

3.3. Допустимое число гидроопрессовок $N^*_{г0}$ и пусков из неостывшего состояния $N^*_г$ определяется по амплитудам приведенных условных напряжений $(\sigma_a)_{г0}$ и $(\sigma_a)_г$, вычисляемых соответственно по формулам:

$$(\sigma_a)_{г0} = \frac{1}{2} \cdot 1{,}25 \cdot p_н \cdot 10^{-2} \left(\frac{\beta^2+1}{\beta^2-1} \cdot \alpha^{\vartheta}_p + 1 \right);$$

$$(\sigma_a)_г = \frac{1}{2} \left[10^{-2} \cdot \left(\alpha^{\vartheta}_p \frac{\beta^2+1}{\beta^2-1} + 1 \right) \cdot \left(p_н - p_г \frac{E_{t_{макс}}}{E_{t_{мин}}} \right) + \right.$$

$$\left. + 0{,}5 \alpha_t s^2 \varphi_м \varphi_2 V_г \frac{E_{t_{макс}}}{E_{t_{мин}}} \right],$$

где $p_н$ - давление при номинальном режиме, кгс/см^2 (10^{-1} МПа);

---

*При условиях эксплуатации, существенно отличающихся от принятых, соотношение $N_х : N_г : N_{г0}$ следует скорректировать.

p_r - давление в барабане котла перед пуском из неостывшего состояния, кгс/см^2 (10^{-1} МПа);

α_p^θ - коэффициент концентрации от внутреннего давления в окружном направлении;

V_r - скорость прогрева барабана в начальный момент пуска из неостывшего состояния, принимаемая равной 3°С/мин;

$E_{t_{макс}}, E_{t_{мин}}$ - модуль упругости соответственно при максимальной и минимальной температуре цикла; кгс/мм^2 (10 МПа);

$П, О$ - индексы, указывающие принадлежность параметра соответственно пуску и останову.

3.4. Амплитуда напряжений в пусках из холодного состояния в кромке отверстий водоопускных труб при продольном сечении их $\sigma_{a\theta}$ определяется по максимальным напряжениям сжатия в начальный момент пуска (p=0) и максимальных напряжениях растяжения при номинальных параметрах. Необходимая для расчета допустимой скорости прогрева $V_п$ допустимая амплитуда напряжений ($\sigma_{a\theta}$) вычисляется по допустимому числу циклов N_x^*, получаемому по уравнению п.3.1 для задаваемого ряда значений числа пусков из холодного состояния N_x.

3.5. Допустимая скорость прогрева $V_п$ при пусках из холодного состояния для ряда принимаемых значений разностей температур верх-низ ($\Delta\vartheta_п$) определяется по формуле

$$V_п = \frac{[2\sigma_{a\theta}] \cdot 10^{-2} p_н \left(\alpha_p^\theta \frac{\beta^2+1}{\beta^2-1} + 1\right) - \alpha E_{tп}^n \gamma \Delta\vartheta_п \frac{E_{t_{макс}}}{E_{t_{мин}}}}{\alpha_t s^2 \Phi_2 \Phi_{mn} \frac{E_{t_{макс}}}{E_{t_{мин}}}},$$

где γ - коэффициент, учитывающий характер распределения температуры по периметру поперечного сечения барабана; для зоны опускных труб принимается равным 0,3; для боковых отверстий - 0,4.

Окончательный выбор допустимой скорости прогрева и разности температур "верх-низ" производится из полученного ряда значений

$V_п$ и $\Delta\vartheta$ с учетом нужд эксплуатации, конструктивных особенностей барабана и возможностей пусковой схемы, но при обязательном сохранении полученной взаимной зависимости между $V_п$ и $\Delta\vartheta$. Так, для котлов, эксплуатируемых в полупиковых и пиковых режимах, рекомендуется выбирать комбинацию $V_п$ и $\Delta\vartheta$ с повышенным значением $V_п$, а для котлов с малой пропускной способностью пуско-сбросных устройств (неблочные котлы), наоборот, с повышенным значением $\Delta\vartheta$.

3.6. Допустимые скорости охлаждения (V_0) и перепад температур "верх-низ" при останове $\Delta\vartheta_0$ определяются двумя условиями прочности кромки отверстий на боковой образующей барабана:

- непревышением допустимого размаха приведенных условно упругих напряжений за цикл пуска-останова в поперечном сечении отверстий;

- ограничением при охлаждении барабана максимума растягивающих окружных напряжений в продольном сечении отверстий значением, обусловленным только внутренним номинальным давлением.

Для выполнения последнего условия необходимо, чтобы начальная скорость охлаждения в зоне давления $\rho_н - 0{,}8\,\rho_н$ не превышала I,0 °С/мин.

3.7. Расчет допустимых скоростей охлаждения производится по формулам:

$$V_0=\left[10^{-2}\left(\alpha_p^{\theta}\,\frac{\beta^2+1}{\beta^2-1}+1\right)(\rho_н-\rho_i)-\alpha_0 E_{t_0}\gamma\,\Delta\vartheta_0\right]\frac{1}{\alpha_t s^2 \Phi_2 \Phi_{мо}}$$

для кромки в продольном сечении отверстия и

$$V_0=\left\{\left[2\sigma_{a_2}\right]-\left[10^{-2}\left(\alpha_p^{z}\cdot\frac{\beta^2+1}{\beta^2-1}+1\right)(\rho_i+\rho_п)+K_{\Delta\vartheta}E_{tп}\alpha_п\gamma\,\frac{E_{t_{макс}}}{E_{t_{мин}}}\Delta\vartheta_п+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\alpha_t V_п s^2 \Phi_2 \Phi_{мп}\,\frac{E_{t_{макс}}}{E_{t_{мин}}}+K_{\Delta\vartheta}E_{t_0}\alpha_0\gamma\,\Delta\vartheta_0\right]\right\}\cdot\frac{1}{\alpha_t s^2 \Phi_2 \Phi_{мо}}$$

для кромки в поперечном сечении отверстия,

где α_{ρ}^{z} - коэффициент концентрации напряжений от внутреннего давления в осевом направлении;

$K_{\Delta\vartheta}$ - коэффициент концентрации напряжений при одноосном растяжении - сжатии от разности температур "верх-низ";

$\Phi_{мп}$ $\Phi_{мо}$ - коэффициенты, характеризующие свойства материала при температурах, соответствующих максимальным напряжениям сжатия при пуске и растяжения при останове;

$\rho_{п}$ - давление в начальный момент пуска при $\Delta\vartheta_{п\,макс}$, принято $\rho_{п}$ = 0,5 МПа = 5 кгс/см^2.

3.8. Граница применения формул определяется давлением при останове $\rho = \rho_{гр}$, получаемым при совместном решении уравнений п.3.7 и при сохранении условия $\Delta\vartheta_{0} \leq K_{к}(t_{\rho_{н}}^{н} - t_{\rho}^{н})$,

где $t_{\rho_{н}}^{н}$ - температура насыщения при номинальном давлении, °С;

$t_{\rho}^{н}$ - температура насыщения при текущем давлении, °С;

$K_{к}$ - опытный коэффициент, зависящий от конструктивных характеристик котла; в различных типах меняется в пределах 0,4-0,8.

3.9. Допустимая амплитуда напряжений в поперечном сечении отверстий $\sigma_{a\,z}$ для пусков из холодного состояния рассчитывается по допустимому числу циклов N_{xz}^{*}, которое, в свою очередь, определяется из уравнений пп.3.I и 3.3 при выбранных по пп.3.6-3.8 значениях $V_{п}$, $\Delta\vartheta_{п}$, $N_{х}$ и замене в уравнениях п.3.2 α_{ρ}^{θ} на α_{ρ}^{z}.

Целесообразно принимать $N_{х}$ = 400, что соответствует предельному числу пусков из холодного состояния за две рабочие кампании между капитальными ремонтами.

3.I0. Для определения скорости расхолаживания V_{0} при $\rho > \rho_{гр}$ рекомендуется формула п.3.7, допустимый перепад температур "верх-низ" принимается равным $\Delta\vartheta_{0} \leq K_{к}(t_{\rho_{н}}^{н} - t_{\rho}^{н})$. При $\rho_{i} \leq \rho_{гр}$ для определения по уравнению п.3.7 допустимого значения $\Delta\vartheta_{0}$ рекомендуется задаваться следующими значениями V_{0} :

ρ_{i} МПа(кгс/см^2)	Св.6 до 8 (Св.60 до 80)	Св. 2 до 6 (Св. 20 до 60)	Св.0,I до 2 (Св.I до 20)
V_{0} °С/мин	Св.I,0 до 4,0	Св. I,0 до 3,0	Св.0,5 до 2,0

4. КОЛЛЕКТОРЫ КОТЛОВ И ДЕТАЛИ ПАРОПРОВОДОВ

4.I. Расчет допустимых скоростей прогрева коллекторов котлов и деталей паропроводов (труб со штуцерами, тройников, корпусов арматуры, гибов и сварных соединений) осуществляется при следующих основных типовых режимах:

- пуске из холодного состояния, когда температура рассчитываемого узла не превышает I50°С;
- пуске из горячего (неостывшего) состояния.

4.2. Для каждого типового режима расчет выполняется для следующих характерных точек (рис.2), отличающихся между собой значением переменных температур, давления и скорости прогрева-охлаждения:

a - исходное состояние перед прогревом $p=0$; $V=0$; $0 \le t < t_p$ (t_p - рабочая температура);

$б$ - номинальный рабочий режим $V=0$; $t=t_p$; $p=p_p$ (p_p - рабочее давление);

$в$ - кратковременное изменение температуры за счет эксплуатационных отклонений режима от номинального со скоростью $V \approx$ - I,0°С/мин;

$г$ - режим останова блока с обеспариванием паропроводов

$$V=0;\ p=0;\ t=t_p;$$

для коллекторов высокого давления и паропроводов свежего пара блоков с барабанными котлами данный режим не учитывается;

$g_1 - g_5$ — промежуточные текущие точки основных типовых режимов, соответствующие выбору интервалов температур через каждые I00-I50°С и фактическому значению давления в этих точках.

Первая точка соответствует началу прогрева ($p > 0$; $V > 0$; $0 \le t < t_p$), а последняя характеризуется параметрами $p = p_p$; $t = t_p$; $V > 0$.

4.3. Предусматривается применение двух методов расчета:

- прямой расчет допустимых температурных напряжений в зависимости от компонентов напряженного состояния для коллекторов, штуцеров при коэффициентах концентрации напряжений в отверстиях $\alpha_p = \alpha_ц = 3$ и $\alpha_t = 2$, гибов с действием компенсационных моментов в плоскости гиба и сварных соединений;

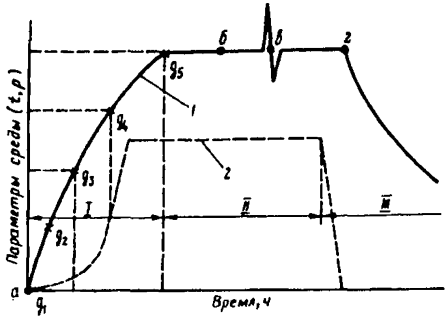


Рис.2. Характерные ($а$-$г$) и расчетные (q_1-q_5) точки цикла нагружения элемента: I - t, °С; 2 - p, МПа(кгс/см^2); I - пуск; II - номинальный режим; III - остывание

- определение допустимых скоростей методом последовательных приближений для характерных точек сечений (п.4.10) и задаваемых коэффициентах концентрации по специальной программе, указанной в[15]. Формулы, необходимые для выполнения указанных расчетов даны в приложении 3.

4.4. При определении размаха напряжений, необходимого для расчета допустимых скоростей прогрева-охлаждения трубы со штуцером, тройника и корпуса задвижки, в качестве определяющих принимаются точки в местах максимальной концентрации напряжений I, 2, 4, 5 на внутренней кромке отверстия (рис.3,4), и точки 3, 6, 7 на наружной поверхности. В качестве расчетных для гиба принимаются точки I, 3, 5 в местах максимальных напряжений на наружной и 2, 4, 6 на внутренней поверхностях.

4.5. Расчет скоростей прогрева и расхолаживания, а также температурных напряжений выполняется по схеме квазистационарного режима.

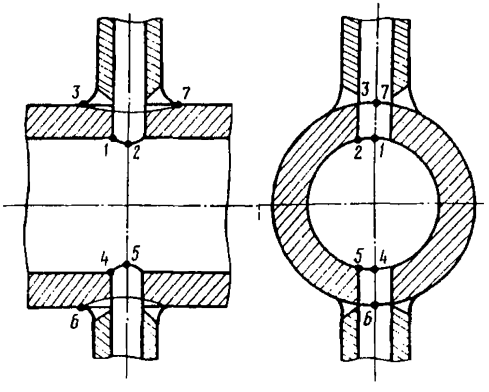


Рис.3. Расчетные точки для коллектора тройника и трубы со штуцером: I-6 - для коллектора; I,2, 3,7 - для тройника и трубы со штуцером (5 и 6 - только для прямого расчета)

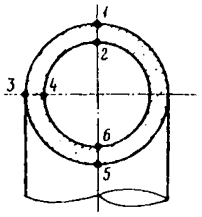


Рис.4. Расчетные точки для гиба

Для всех рассчитываемых узлов трубопровода допустимые скорости определяются по формулам:

- для наружной поверхности

$$V=\frac{a(1-\mu)\sigma_t}{60\alpha E\Phi_1 s^2}=\frac{\sigma_t}{s^2\Phi_1\Phi_M};$$

- для внутренней поверхности

$$V=\frac{a(1-\mu)\sigma_t}{60\alpha E\Phi_2 s^2}=\frac{\sigma_t}{s^2\Phi_2\Phi_M},$$

где при расчете значения $\beta=\frac{D_H}{D_B}$ для трубы со штуцером и гиба принимаются номинальные значения наружного и внутреннего диаметров трубы, а для тройника и корпуса арматуры - фактические диаметры наиболее утолщенной части тройника и патрубка арматуры. Значения коэффициентов формы Φ_1 и Φ_2 для цилиндрических тел в зависимости от отношения наружного диаметра к внутреннему представлены на рис.5. Для корпуса задвижки коэффициенты формы принимаются равными 0,75 на внутренней поверхности и 0,25 на наружной.

4.6. Для выполнения расчетов допустимых скоростей необходимо предварительно определить максимальные размахи напряжений от давления и внешних нагрузок, предельное количество циклов нагружения и задаться расчетным количеством циклов каждого вида.

4.7. Предельное количество циклов нагружения при пусках из холодного $N_X^{пр}$ и горячего $N_Г^{пр}$ состояний определяется соответствующими максимальными размахами напряжений от давления и внешних нагрузок. Максимальные размахи напряжений $\sigma_R^{пр}$ для трубы со штуцером, тройника, корпуса задвижки и для трубы со сварным соединением определяются решением уравнений согласно п.4.II относительно σ_R.

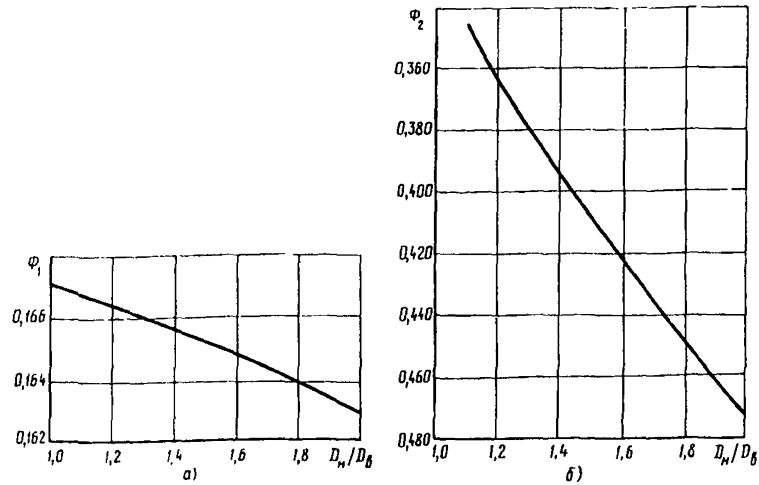


Рис.5. Зависимость коэффициента формы для цилиндра от $D_н / D_в$: а - наружная поверхность; б - внутренняя поверхность

При этом температурные напряжения на наружной и внутренней поверхностях $\sigma_t^н = \sigma_t^в = 0$, за исключением сочетаний с точкой $в$ (см.рис.2) в качестве верхней, где $\sigma_t^в$ рассчитывается согласно п.4.5 при $V = -1$ °С/мин.

Максимальный размах напряжений для гиба при $\lambda \geqslant 1{,}5$ определяется по формуле

$$\sigma_R^0 = \sigma_p^в - (\gamma_m + \beta_m)\sigma_u^R - C\,\sigma_p^н \quad \text{при} \quad p_в \geqslant C\,p_н ,$$

либо

$$\sigma_R^0 = -\sigma_p^в - (\gamma_m + \beta_m)\sigma_u^R + C\,\sigma_p^н \quad \text{при} \quad p_в < C\,p_н ,$$

где

$$\lambda = \frac{S_R}{r^2 C_p}; \quad \gamma_m = \frac{18\lambda}{1+12\lambda^2}; \quad \beta_m = \frac{2+12\lambda^2}{1+12\lambda^2} \quad \text{при } \lambda < 1{,}5,$$

либо

$$\sigma_R^0 = \sigma_p^в - \gamma_m \sigma_n^R - C\,\sigma_p^н \quad \text{при} \quad p_в \geqslant C p_н ;$$

$$\sigma_R^0 = -\sigma_p^в - \gamma_m \sigma_n^в + C\,\sigma_p^н \quad \text{при} \quad p_в < C p_н .$$

Коэффициенты γ_m и β_m принимаются согласно РТМ 24.038.08-72; $C=\frac{E_в}{E_н}$, индексы "Н" и "в" указывают на напряжения в нижней и верхней точках рассматриваемого интервала цикла.

Для определения максимального размаха напряжений необходимо осуществить расчеты в характерных точках, указанных в п.4.2, выбрав в качестве нижней и верхней точек следующие возможные сочетания:

Верхняя точка	б	в	г	в	в	б
Нижняя точка	а	а	а	б	г	г

По указанным формулам с учетом неупругого деформирования (см. п.2.6) определяются размахи напряжений и по их максимальному значению с помощью формул п.2.8 - $N^{пр}$ для каждого рассчитываемого узла. При этом второй член формулы, приведенной в п.2.8, принимается равным $\sigma_{доп}$.

4.8. После определения $N_\chi^{пр}$ и $N_г^{пр}$ проверяется прочность конструкции по заданному количеству циклов за весь срок эксплуатации. Условие прочности удовлетворяется, если обеспечивается соотношение

$$\frac{N_\chi}{N_\chi^{пр}} + \frac{N_г}{N_г^{пр}} \leq 1.$$

4.9. Выбор расчетных количеств циклов нагружения с пусками из холодного N_χ^* и горячего $N_г^*$ состояний определяет соотношение допустимых скоростей прогрева для этих режимов нагружения.

При $N_\chi + N_г < N_\chi^{пр}$ можно принимать

$N_\chi^* = N_г^* = N_\chi + N_г$, что обеспечивает примерно равные допустимые скорости при обоих видах пуска.

4.10. После определения $N_\chi^{*пр}$ и $N_г^{*пр}$ (см.п.4.7) по формулам п.2.8 рассчитываются допустимые размахи напряжений, по значениям которых с помощью формул п.4.5 вычисляются скорости прогрева для каждого узла и в качестве допустимой выбирается минимальное значение. При этом для определения допустимых температурных напряжений в отдельных интервалах температуры по формулам п.4.11 необходимо осуществить расчеты для возможных сочетаний характерных и расчетных точек, представленных на рис.2:

верхняя точка	g_i	б	в	г
нижняя точка	а	g_i	g_i	g_i

Расчеты проводятся последовательно для сочетаний характерных точек с g_1, g_2 и т.д.

В качестве допустимой скорости прогрева для заданного температурного интервала, определяемого текущей расчетной точкой g_i, принимается минимальное значение.

4.II. Прямой расчет выполняется отдельно для определяющих точек внутренней и наружной поверхностей рассматриваемого сечения.

Для расчета скорости прогрева по внутренней поверхности трубы со штуцером, тройника и корпуса арматуры допустимые температурные напряжения в нижней и верхней точках рассматриваемого диапазона изменения температур определяются по формулам:

$$2\dot{\sigma}_t^H = \frac{1}{C}\left(\sigma_R - \sigma_p^B + 3\dot{\sigma}_u^R/\beta + 2\dot{\sigma}_t^B\right) + \sigma_p^H$$

при $\frac{\dot{\sigma}_u^R}{\beta} \leqslant 2C\left(\sigma_p^H + 10^{-2}p_H\right) - 2\left(\sigma_p^B + 10^{-2}p_B\right)$;

$$2\dot{\sigma}_t^H = \frac{1}{C}\left(\sigma_R - 5\sigma_p^B - 4\cdot 10^{-2}p_B + \dot{\sigma}_u^R/\beta + 2\dot{\sigma}_t^B\right) + 5\sigma_p^H + 4\cdot 10^{-2}p_H$$

при $\frac{\dot{\sigma}_u^H}{\beta} \geqslant 2C\left(\sigma_p^H + 10^{-2}p_H\right) - 2\left(\sigma_p^B + 10^{-2}p_B\right)$;

$$2\dot{\sigma}_t^B = \sigma_R + \sigma_p^B + 3\dot{\sigma}_u^R/\beta + C\left(-\sigma_p^H + 2\dot{\sigma}_t^H\right)$$

при $\frac{\dot{\sigma}_u^R}{\beta} \leqslant 2\left(\sigma_p^B + 10^{-2}p_B\right) - 2C\left(\sigma_p^H + 10^{-2}p_H\right)$;

$$2\dot{\sigma}_t^B = \sigma_R + 5\sigma_p^B + 4\cdot 10^{-2}p_B + \dot{\sigma}_u^R/\beta + C\left(-5\sigma_p^H - 4\cdot 10^{-2}p_H + 2\dot{\sigma}_t^H\right)$$

при $\frac{\dot{\sigma}_u^R}{\beta} \geqslant 2\left(\sigma_p^B + 10^{-2}p_B\right) - 2C\left(\sigma_p^H + 10^{-2}p_H\right)$.

При этом σ_R - задается либо определяется согласно пп.4.7 и 4.I0 при расчете σ_t^H и σ_t^B ;

$$\sigma_p = \frac{10^{-2}}{\varphi}\cdot\frac{p}{\beta^2 - 1};$$

Для трубопроводов, тройников и корпусов арматуры $\varphi = 1$;

$$\sigma_и^р = -|\sigma_и^в| - C|\sigma_и^н|$$

при изменении знака суммарных напряжений $\sigma_и$ на протяжении рассматриваемого диапазона изменения температуры;

$$\sigma_и^R = \pm|\sigma_и^в| \pm C|\sigma_и^н|$$

при постоянстве знака $\sigma_и$ в указанном диапазоне.

В последней формуле "плюс" принимается при $|\sigma_и^в| \geq C|\sigma_и^н|$, а "минус" при $|\sigma_и^в| \leq C|\sigma_и^н|$.

4.12. Для расчета скорости прогрева по наружной поверхности трубы со штуцером, тройника и корпуса арматуры допустимые температурные напряжения в нижней и верхней точках рассматриваемого диапазона изменения температур определяются по формулам:

$$\alpha_t \sigma_t^в = \sigma_R - \alpha_р \sigma_р^в + \alpha_и \sigma_и^R + C(\alpha_р \sigma_р^н + \alpha_t \sigma_t^н);$$

$$\alpha_t \sigma_t^н = \frac{1}{C}(\sigma_R + \alpha_р \sigma_р^в + \alpha_и \sigma_и^R + \alpha_t \sigma_t^в) - \alpha_р \sigma_р^н.$$

При этом для трубы со штуцером $\alpha_р = \alpha_и = 4$ для корпусов арматуры и тройников $\alpha_р = 3$, а $\alpha_и = 2$.

4.13. Напряжения изгиба рассчитываются:

- для трубы со штуцером по формуле

$$\sigma_и = \frac{M_и}{W},$$

$M_и, W$ определяются в месте расположения штуцера без учета ослабления сечения трубы отверстием;

для тройника и корпуса арматуры по формуле

$$\sigma_и = \frac{M_и}{W} + 0{,}7\frac{M_и'}{W'} K_ш,$$

где W, W' – определяются в сечениях, указанных на рис.3.

Для корпуса арматуры принимается $M_и' = 0$; коэффициент $K_ш$ определяется по формуле п.5.2.4 РТМ 108.020.01-75 для $K_{из(ш)}$.

Для промежуточной температуры t

$$M_и = M_и^x + (M_и^в - M_и^x)\frac{t}{t_р}.$$

Расчетные сечения для прямолинейных участков гибов и тройников со сварными штуцерами должны выбираться в зонах действия наибольших эквивалентных напряжений, определяемых по этапу III полного расчета трубопровода (РТМ 24.038.08-72), а при наличии фасонных элементов или арматуры с большей толщиной стенки, чем у труб основных магистралей - для каждого типоразмера этих элементов.

4.14. Для расчета скорости прогрева гиба по условиям прочности со стороны внутренней поверхности допустимые температурные напряжения в нижней и верхней точках изменения температур определяются по формулам:

$$\sigma_t^H = \frac{1}{C}\left(\sigma_R \cdot 2\sigma_p^B - 2\cdot 10^{-2} p_B + \gamma_m \sigma_и^R + \sigma_t^B\right) + 2\sigma_p^H + 2\cdot 10^{-2} p_H$$

при $(\gamma_m - \beta_m)\sigma_и^R \le \sigma_p^B + 10^{-2} p_B - C(\sigma_p^H + 10^{-2} p_H)$;

$$\sigma_t^H = \frac{1}{C}\left(\sigma_R - \sigma_p^B - 10^{-2} p_B + \beta_m \sigma_и^R + \sigma_t^B\right) + \sigma_p^H + 10^{-2} p_H$$

при $(\gamma_m - \beta_m)\sigma_и^R \ge \sigma_p^B + 10^{-2} p_B - C(\sigma_p^H + 10^{-2} p_H)$;

$$\sigma_t^B = \sigma_R + \sigma_p^B + 10^{-2} p_B + \beta_m \sigma_и^R + C(-\sigma_p^H 10^{-2} p_H + \sigma_t^H)$$

при $(\gamma_m - \beta_m)\sigma_и^R \ge C(\sigma_p^H + 10^{-2} p_H) - \sigma_p^B - 10^{-2} p_B$;

$$\sigma_t^B = \sigma_R + 2\sigma_p^B + 2\cdot 10^{-2} p_B + \gamma_m \sigma_и^R + C(-2\sigma_p^H - 2\cdot 10^{-2} p_H + \sigma_t^H)$$

при $(\gamma_m - \beta_m)\sigma_и^R \le C(\sigma_p^H + 10^{-2} p_H) - \sigma_p^B - 10^{-2} p_B$.

В качестве $\sigma_и$ принимается большое значение:

$$\sigma_и = \left| \frac{M_и}{W} - \frac{2R D_H p}{s(D_H - s)} a_T \cdot 10^{-4} \right|$$

или

$$\sigma_и = \left| \frac{M_и}{W} - \frac{4R D_H p}{s(D_H - s)} a_T \cdot 10^{-4} \right|,$$

a_T - фактическая овальность, %. Допускается принимать овальность по ТУ с учетом коэффициента снижения X_9 (РТМ.24.038.08-72); учитывается момент ($M_И$), действующий в плоскости гиба; положительное значение момента $M_И$ уменьшает радиус гиба.

4.15. Для расчета скорости прогрева по условиям прочности со стороны наружной поверхности гиба допустимые температурные напряжения в нижней и верхней точках изменения температур определяются по формулам:

$$\sigma_t^H = \frac{1}{C}(\sigma_R + 2\sigma_p^B + \gamma_m \sigma_И^R + \sigma_t^B) - 2\sigma_p^H$$

при $(\gamma_m - \beta_m)\sigma_И^R \le C\sigma_p^H - \sigma_p^H$;

$$\sigma_t^H = \frac{1}{C}(\sigma_R + \sigma_p^B + \beta_m \sigma_И^R + \sigma_t^B) - \sigma_p^H$$

при $(\gamma_m - \beta_m)\sigma_И^R \ge C\sigma_p^H - \sigma_p^B$;

$$\sigma_t^B = \sigma_R - 2\sigma_p^B + \gamma_m \sigma_И^R + C(2\sigma_p^H + \sigma_t^H)$$

при $(\gamma_m - \beta_m)\sigma_И^R \le \sigma_p^B - C\sigma_p^H$;

$$\sigma_t^B = \sigma_R - \sigma_p^B + \beta_m \sigma_И^R + C(\sigma_p^H + \sigma_t^H)$$

при $(\gamma_m - \beta_m)\sigma_И^R \ge \sigma_p^B - C\sigma_p^H$.

4.16. Для расчета скорости прогрева сварного стыка трубы по условиям прочности со стороны внутренней поверхности допустимые температурные напряжения в нижней и верхней точках изменения температур определяются по формулам:

$$\alpha_t \sigma_t^H = \frac{1}{C}\left[\sigma_R - \alpha_p \sigma_p^B - 10^{-2} p_B + \alpha_И \sigma_И^R K + \alpha_t \sigma_t^B\right] + \alpha_p \sigma_p^H + 10^{-2} p_H$$

при $(1-\alpha_t)\sigma_R - (\alpha_p - 2\alpha_t)\sigma_p^B - (1-2\alpha_t)10^{-2} p_B + \alpha_И \sigma_И^R K +$

$$+ C\left[(\alpha_p - 2\alpha_t)\sigma_p^H + (1-2\alpha_t)\cdot 10^{-2} p_H\right] < 0;$$

$$\alpha_t^H = \frac{1}{C}\left[\sigma_R - 2\sigma_p^B - 2\cdot 10^{-2} p_B + \sigma_t^B\right] + 2\sigma_p^H + 2\cdot 10^{-2} p_H$$

при $(1-\alpha_t)\sigma_R - (\alpha_p - 2\alpha_t)\sigma_p^B - (1-2\alpha_t)\cdot 10^{-2} p_B + \alpha_и \sigma_и^R/\beta +$
$+ C\left[(\alpha_p - 2\alpha_t)\sigma_p^H + (1-2\alpha_t)\cdot 10^{-2} p_H\right] > 0$;

$$\alpha_t \sigma_t^B = \sigma_R + \alpha_p \sigma_p^B + 10^{-2} p_B + \alpha_и \sigma_и^R/\beta - C\left[\alpha_p \sigma_p^H + 10^{-2} p_H - \alpha_t \sigma_t^H\right]$$

при $(1-\alpha_t)\sigma_R + (\alpha_p - 2\alpha_t)\sigma_p^B + (1-2\alpha_t)\cdot 10^{-2} p_B + \alpha_и \sigma_и^R/\beta -$
$- C\left[(\alpha_p - 2\alpha_t)\sigma_p^H + (1-2\alpha_t)\cdot 10^{-2} p_H\right] < 0$;

$$\sigma_t^B = \sigma_R + 2\sigma_p^B + 2\cdot 10^{-2} p_B - C\left[2\sigma_p^H + 2\cdot 10^{-2} p_H - \sigma_t^H\right]$$

при $(1-\alpha_t)\sigma_R + (\alpha_p - 2\alpha_t)\sigma_p^B + (1-2\alpha_t\cdot 10^{-2} p_B + \alpha_и \sigma_и^R/\beta -$
$- C\left[(\alpha_p - 2\alpha_t)\sigma_p^H + (1-2\alpha_t)\cdot 10^{-2} p_H\right] > 0.$

Если найденные напряжения σ_t^H и σ_t^B превышают напряжения, определенные по формулам

$$(\alpha_t - 1)\sigma_t^H = \frac{1}{C}\left[\sigma_R + (2-\alpha_p)\sigma_p^B + 10^{-2} p_B + \alpha_и \sigma_и^R/\beta - (1-\alpha_t)\sigma_t^B\right] -$$
$$- (2-\alpha_p)\sigma_p^H - 10^{-2} p_H;$$

$$(\alpha_t - 1)\sigma_t^B = \sigma_R - (2-\alpha_p)\sigma_p^B - 10^{-2} p_B + \sigma_и^R/\beta + C\left[(2-\alpha_p)\sigma_p^H + \right.$$
$$\left. + 10^{-2} p_H - (1-\alpha_t)\sigma_t^H\right],$$

то в качестве допустимых принимаются напряжения, найденные из последних формул.

Здесь учитываются α_t, α_p в аксиальном направлении, а $\alpha_и$ в поперечном сварном стыке трубопровода.

4.17. Для расчета скорости прогрева сварного стыка трубы по наружной поверхности допустимые температурные напряжения в нижней и верхней точках изменения температур определяются по формулам:

$$\alpha_t \sigma_t^H = \frac{1}{C}\left[\sigma_R + \alpha_\rho \sigma_\rho^B + \alpha_и \sigma_и^R + \alpha_t \sigma_t^B\right] - \alpha_\rho \sigma_\rho^H$$

при $(1-\alpha_t)\sigma_R + (\alpha_\rho - 2\alpha_t)\sigma_\rho^B + \alpha_и \sigma_и^R - C(\alpha_\rho - 2\alpha_t)\sigma_\rho^H < 0$;

$$\sigma_t^H = \frac{1}{C}\left[\sigma_R + 2\sigma_\rho^B + \sigma_t^B\right] - 2\sigma_\rho^H$$

при $(1-\alpha_t)\sigma_R + (\alpha_\rho - 2\alpha_t)\sigma_\rho^B + \alpha_и \sigma_и^R - C(\alpha_\rho - 2\alpha_t)\sigma_\rho^H > 0$;

$$\alpha_t \sigma_t^B = \sigma_R - \alpha_\rho \sigma_\rho^B + \alpha_и \sigma_и^R + C\left[\alpha_\rho \sigma_\rho^H + \alpha_t \sigma_t^H\right]$$

при $(1-\alpha_t)\sigma_R - (\alpha_\rho - 2\alpha_t)\sigma_\rho^B + \alpha_и \sigma_и^R + C(\alpha_\rho - 2\alpha_t)\sigma_\rho^H < 0$;

$$\sigma_t^B = \sigma_R - 2\sigma_\rho^B + C\left[2\sigma_\rho^H + \sigma_t^H\right]$$

при $(1-\alpha_t)\sigma_R - (\alpha_\rho - 2\alpha_t)\sigma_\rho^B + \alpha_и \sigma_и^R + C(\alpha_\rho - 2\alpha_t)\sigma_\rho^H > 0$.

Найденные напряжения σ_t^H и σ_t^B при этом не должны превышать напряжений, определенных по формулам:

$$(\alpha_t - 1)\sigma_t^H = \frac{1}{C}\left[\sigma_R - (2-\alpha_\rho)\sigma_\rho^B + \alpha_и \sigma_и^R - (1-\alpha_t)\sigma_t^B\right] + (2-\alpha_\rho)\sigma_\rho^H;$$

$$(\alpha_t - 1)\sigma_t^B = \sigma_R + (2-\alpha_\rho)\sigma_\rho^B + \alpha_и \sigma_и^R - C\left[(2-\alpha_\rho)\sigma_\rho^H + (1-\alpha_t)\sigma_t^H\right].$$

В противном случае в качестве допустимых температурных напряжений принимаются напряжения, найденные из последних формул.

Формулы пп.4.I6 и 4.I7 при $\alpha_t = \alpha_\rho = \alpha_и = 1$ пригодны для определения допустимых температурных напряжений гладкой трубы без концентраторов напряжений.

4.I8. Для расчета допустимых скоростей прогрева методом последовательных приближений выполняется вычисление размахов условных приведенных напряжений для всех определяющих точек сечения при переходе от рассматриваемого режима до нижнего и верхнего стационарных режимов в соответствии с пп. 4.2 и 4.II. За определяющее принимается такое значение скорости прогрева, при котором максимальное значение размаха в каком-либо из интервалов: а-∂, ∂-б, ∂-в и ∂-г (см. п.4.I0) достигнет предельного значения, принимаемого согласно п.2.8 и заданному количеству пусков. Формулы для расчета главных напряжений для трубы со сварным соединением, гиба и трубы со штуцером приведены в приложении 3.

4.I9. *Значения найденных по* п.4.II расчетных скоростей прогрева при пусках из холодного и горячего состояний могут быть по условиям эксплуатации скорректированы в требуемом направлении, для чего необходимо по сравнению с первоначальной изменить в нужном направлении одну из составляющих повреждаемости, например $N_г/N_г^*$, и весь расчет повторить в соответствии с пп.4.I0–4.I7 до получения требуемого соотношения скоростей прогрева в горячем и холодном состоянии.

При корректировке относительной повреждаемости $N_х/N_х^*$ и $N_г/N_г^*$ не должны нарушаться следующие условия:

$$N_х^* < N_х^{пр};\ N_г^* < N_г^{пр};\ \frac{N_х}{N_х^*} + \frac{N_г}{N_г^*} \leq 1.$$

Возможна также прямая корректировка одной из скоростей в требуемом направлении, например скорости прогрева при горячих пусках с последующим расчетом размахов напряжений, предельных значений $N_х^*$, $N_г^*$ и одной из искомых скоростей, в данном случае скорости прогрева при холодных пусках.

4.20. Для расчета допустимых скоростей принудительного расхолаживания трубы со штуцером, тройника и гиба допустимые температурные напряжения для наружной и внутренней поверхности определяются согласно формулам пп.4.II, 4.I2, 4.I4, 4.I5. При этом необходимо изменить знаки перед напряжением σ_p и давлением p на противоположные. В случае расчетов методом последовательных приближений в соответствии с п.4.I8 требуется задавать отрицательные значения скорости прогрева (V).

4.2I. Допустимый размах напряжений для расчета скоростей принудительного расхолаживания принимается равным размаху при пуске из холодного состояния.

Максимальный размах напряжений определяется по формуле п.4.8 с определением размаха напряжений от проверяемого режима расхолаживания до всех характерных точек (а, б, в, г, g), включая режимы прогрева.

4.22. Возможно увеличение скорости принудительного расхолаживания по сравнению с найденной по 4.2I при соответствующем сокращении допустимых скоростей прогрева из условия линейного суммирования повреждений:

$$\frac{N_X}{N_X^*} + \frac{N_Г}{N_Г^*} + \frac{N_0}{N_0^*} \leq 1,$$

где N_0 – предполагаемое количество остановов с принудительным расхолаживанием;

N_0^* – расчетное количество остановов с расхолаживанием, по которому определяется допустимый размах напряжений.

4.23. Допустимые перепады температур $\Delta t = t_c - t_0$ для высокоинтенсивных тепловых процессов, например режима заполнения холодного коллектора либо паропровода горячей водой, заполнения горячего коллектора либо паропровода холодной водой в процессе прогрева этих узлов паром в диапазоне температур ниже насыщения, именуемых тепловыми ударами, определяются по формуле

$$\Delta t = \frac{60\, s^2 \beta^2 \nu \Phi_2}{0{,}7\, a\, \Phi_3},$$

где t_c – температура греющей среды, равная температуре воды либо температуре насыщения при прогреве паром в диапазоне температур ниже насыщения;

t_0 – начальная температура металла трубы;

Φ_3 – безразмерная величина, определяемая по графику рис.6 в зависимости от безразмерной величины $\frac{\alpha_2 s}{2\lambda_T}$.

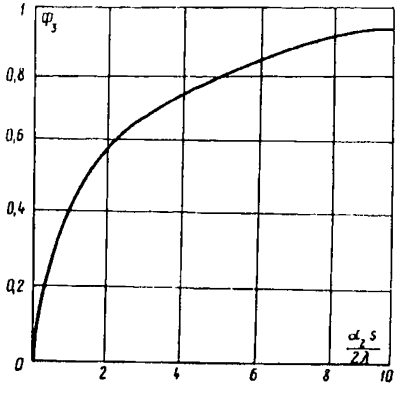


Рис.6. Зависимость коэффициента Φ_3 от соотношения $\alpha_2 s / 2\lambda$

Приложение I

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

S - номинальная толщина стенки, м;

$D_н$ - наружный диаметр трубы, м;

$D_в$ - внутренний диаметр трубы, м;

R - радиус гиба, м;

$r_{ср}$ - средний радиус трубы, м;

β - отношение наружного диаметра трубы к внутреннему ($\beta = \frac{D_н}{D_в}$);

σ_a - амплитуда приведенных условных упругих напряжений, МПа(кгс/мм^2);

σ'_a - амплитуда приведенных условных упругих напряжений без учета концентрации, МПа(кгс/мм^2);

σ^*_a - допустимая амплитуда условных приведенных напряжений при заданном количестве циклов, МПа (кгс/мм^2);

σ_R - размах приведенных условных упругих напряжений, МПа(кгс/мм^2);

σ^R_u - размах изгибающих напряжений, МПа (кгс/мм^2);

σ_i - (i = I,2,3) - главные напряжения, МПа (кгс/мм^2);

$\sigma_{0,2}$ - предел текучести материала, МПа (кгс/мм^2);

$\sigma_в$ - предел прочности(временное сопротивление), Па (кгс/мм^2);

σ_u - изгибающие напряжения, МПа (кгс/мм^2);

σ_p - напряжения от давления, МПа (кгс/мм^2);

σ_t - температурные напряжения, МПа (кгс/мм^2);

$\sigma_{\Delta v}$ - напряжения от разности температур "верх-низ", МПа (кгс/мм^2);

$\sigma_{доп}$ - допустимые напряжения, МПа (кгс/мм^2);

$\sigma_д$ - предел длительной прочности, МПа (кгс/мм^2);

α_σ - теоретический коэффициент концентрации напряжений;

K_σ - коэффициент концентрации условных упругих напряжений;

α_ε - коэффициент концентрации деформаций;

α_u - коэффициент концентрации изгибающих напряжений;

α_p - упругий коэффициент концентрации напряжений от давления;

α_t - упругий коэффициент концентрации температурных напряжений;

M_u - изгибающий момент, н.м (кгм);

M_u^x - изгибающий момент в "холодном" состоянии, н.м (кгм);

M_u^p - изгибающий момент в рабочем состоянии, н.м (кгм);

M_u' - изгибающий момент, действующий на штуцер или отвод, н.м(кгм);

W - момент сопротивления изгибу, $см^3$;

W' - момент сопротивления изгибу штуцера, $см^3$;

a_T - овальность, %;

λ - безразмерный геометрический коэффициент

$$\lambda = \frac{sR}{r_{cp}};$$

γ_m - коэффициент интенсификации изгибных поперечных напряжений в гибе;

β_m - коэффициент интенсификации изгибных продольных напряжений в гибе;

N^* - допустимое количество циклов (расчетная долговечность) при заданной амплитуде напряжений;

ψ - относительное сужение, %;

n_N - коэффициент запаса долговечности по числу циклов нагружения;

m - показатель степени в уравнении ползучести;

φ - коэффициент прочности материала;

p - давление среды, МПа ($кгс/см^2$);

t - температура среды, ^oC;

Δt - перепад температур, ^oC;

E - модуль упругости, МПа ($кгс/мм^2$);

μ - коэффициент Пуассона;

a - коэффициент температуропроводности, $м^2/ч$;

α_2 - коэффициент теплоотдачи Вт/(м^2·°С) [ккал/(м^2·ч·°С)] ;

λ_1 - коэффициент теплопроводности материала стенки Вт/(м·°С) [ккал/(м·ч·°С)] ;

α - коэффициент линейного расширения, 1/°С;

V - скорость прогрева или охлаждения, °С/мин;

$\Delta\vartheta$ - перепад температур между верхом и низом барабана, °С;

Φ_M - комплекс, характеризующий свойства материалов, МПа·мин/(мм^2·°С) [кгс·мин/(мм^4·°С)] ;

$$\Phi_M = \frac{\alpha E 60}{(1-\mu)a};$$

Φ_1 - безразмерный коэффициент формы для наружной поверхности цилиндра

$$\Phi_1 = \frac{1}{8(\beta-1)^2}\left(\beta^2 + 1 - \frac{4\beta^2 \ell n\,\beta}{\beta^2-1}\right);$$

Φ_2 - безразмерный коэффициент формы для внутренней поверхности цилиндра

$$\Phi_2 = \frac{1}{8(\beta-1)^2}\left(3\beta^2 - 1 - \frac{4\beta^4 \ell n\,\beta}{\beta^2-1}\right),$$

θ, Z, r - индексы, указывающие направление усилия соответственно окружного, осевого и радиального.

Приложение 2

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В КРОМКАХ ОТВЕРСТИЙ ВОДООПУСКНЫХ И ПОДЪЕМНЫХ ТРУБ БАРАБАНОВ КОТЛОВ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ (рис.7-9)

Компоненты напряжений	Точка	
	I	2
Окружные σ_θ	$\sigma_p^\theta + \sigma_t^\theta + \sigma_{\Delta v}^\theta$	$-p \cdot 10^{-2}$
Осевые σ_z	$-p \cdot 10^{-2}$	$\sigma_p^z + \sigma_t^z + \sigma_{\Delta v}^z$
Радиальные σ_r	$-p \cdot 10^{-2}$	$-p \cdot 10^{-2}$

I. Напряжения от внутреннего давления:

для точки I $$\sigma_p^\theta = \alpha_p^\theta p \frac{\beta^2+1}{\beta^2-1} \cdot 10^{-2};$$

для точки 2 $$\sigma_p^z = \alpha_p^z p \frac{\beta^2+1}{\beta^2-1} \cdot 10^{-2}.$$

2. Температурные ("скоростные") напряжения для точек I и 2

$$\sigma_t^\theta = \sigma_t^z = \sigma_t = \alpha_t V s^2 \Phi_2 \Phi_H .$$

3. Напряжение от неравномерного распределения температур по периметру поперечного сечения (от разности температур "верх-низ");

для точки I $$\sigma_{\Delta v}^\theta = K_{\Delta v}^\theta \alpha_p^\theta E \Delta v \gamma ;$$

для точки 2 $$\sigma_{\Delta v}^z = K_{\Delta v}^z \alpha_p^z E \Delta v \gamma .$$

4. Расчетные коэффициенты.

Для кромок отверстий водоопускных труб (расчет проводится для точки I - *продольное сечение*):

коэффициент концентраций напряжений от разности температур "верх-низ";

$$K^{\theta}_{\Delta U} = -1;$$

коэффициент концентрации напряжений от внутреннего давления в окружном направлении

$$\alpha^{\theta}_{p} = 3,0.$$

Для кромок отверстий подъемных труб (расчет проводится для точки 2 - поперечное сечение):

коэффициент концентрации напряжений от разности температур "верх-низ"

$$K^{z}_{\Delta U} = 3,5;$$

коэффициент концентрации напряжений от внутреннего давления в осевом направлении

$$\alpha^{z}_{p} = 1,2.$$

Коэффициент, учитывающий характер распределения температуры по периметру поперечного сечения барабана γ ; для опускных труб принимается равным 0,3; для боковых отверстий 0,4.

Коэффициент концентрации температурных "скоростных" напряжений $\alpha_t = 1,8$.

5. Начальная скорость прогрева барабана при пуске из неостывшего состояния принимается равной $V_{пг} = 3^{o}C/мин$. С учетом доквазистационарного температурного режима (кратковременный прогрев со скоростью $V_{пг}$) определение минимального напряжения в этом цикле следует производить, принимая в расчет не более половины квазистационарного значения температурного напряжения, соответствующего $V_{пг} = 3^{o}C/мин$.

6. Начальная скорость охлаждения в момент $p = p_{н}$ принимается равной $V_{0} \leq 1,0^{o}C/мин$.

7. Изменение основных параметров в цикле "пуск-останов" блока представлено на рис.7.

Изменение окружных σ_{θ} напряжений на кромке отверстия под водоопускные трубы для точек 1(продольное сечение) и 2(поперечное сечение) для цикла "пуск-останов" дано на рис.8.

Изменение напряжений на кромке отверстий под подъемные трубы на боковой образующей барабана для точки 1(продольное сечение) и трубы 2(поперечное сечение) для цикла "пуск-останов" представлено на рис.9.

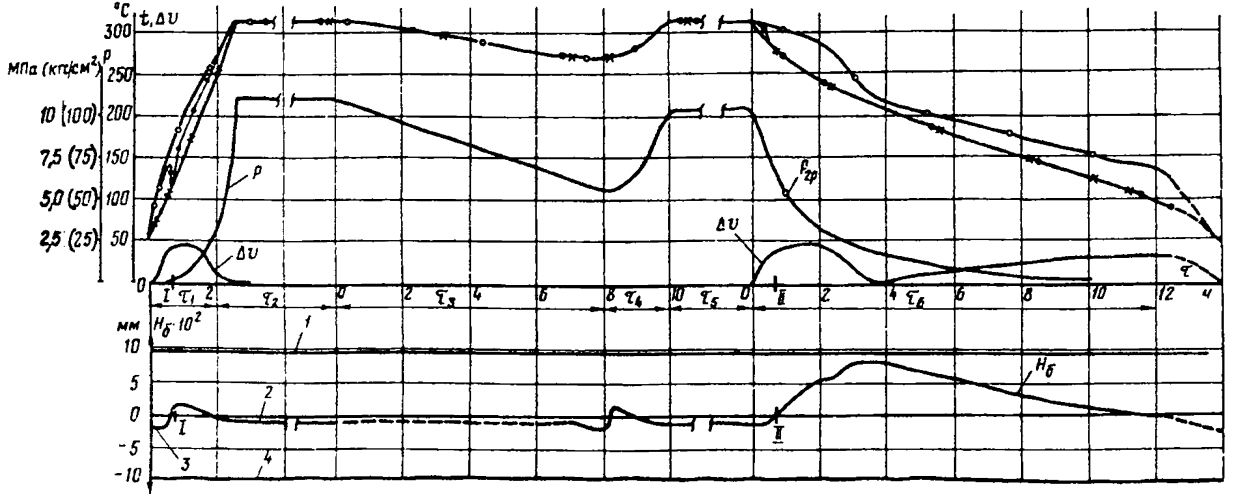


Рис.7. Изменение основных параметров в цикле "пуск–останов" блока:
температура образующей: x – нижней; —o— – верхней; —●— – боковой; $H_б$ – уровень воды в барабане: I – верхней образующей; 2 – нормальный; 3 – растопочный; 4 – нижней образующей; $\Delta\vartheta$ – перепад температур "верх–низ"; I, II – моменты "затопления" отверстий подъемных труб; продолжительность: τ_1 – пуска из холодного состояния; τ_2 и τ_5 – работы; τ_3 – ночного простоя; τ_4 – пуска после ночного простоя; τ_6 – останова с расхолаживанием

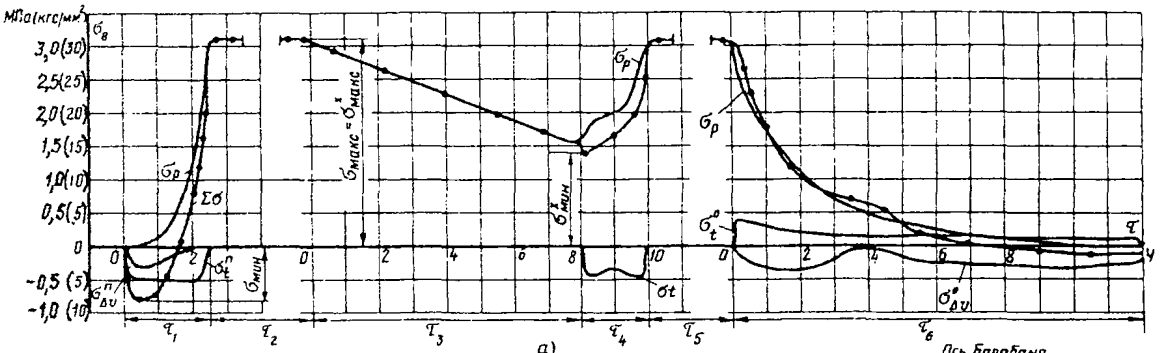
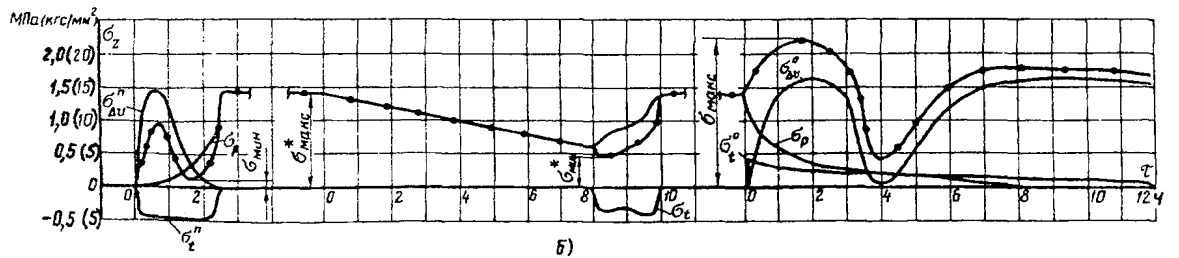
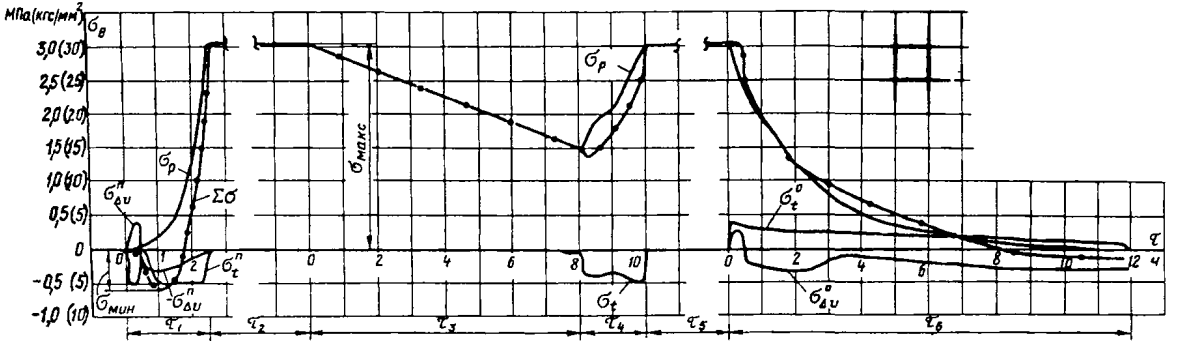


Рис.8. Изменение составляющих напряжения на кромке отверстий барабана под водоопускные трубы:

$\sigma^{*}_{макс}$ и $\sigma^{*}_{мин}$ - максимальные и минимальные суммарные напряжения в цикле после ночного простоя; σ'_t - температурные "скоростные" напряжения а - для точки I (окружное направление σ_θ); б - для точки 2 (осевое направление σ_z).

Остальные обозначения см. рис.7



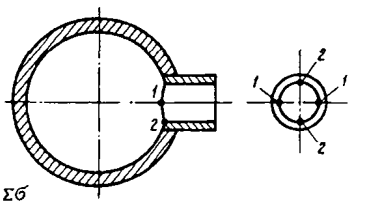


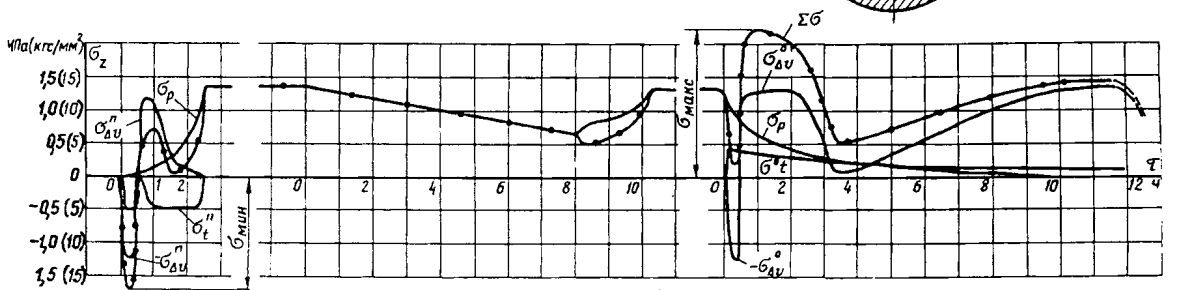
а)

Рис.9. Изменение составляющих напряжения на кромке отверстий под подъемные трубы (боковая образующая):

а – для точки I; *б* – для точки 2.

Обозначения см. рис.7,8





б)

Приложение 3

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧКАХ ГИБА ТРУБЫ, ТРУБЫ СО ШТУЦЕРОМ И В СВАРНОМ СТЫКЕ ТРУБЫ

Компоненты напряжений	Точка			
	I	2	3	4
Осевые σ_z	$\sigma_p + M_и \beta_m / W + Vs^2 \Phi_1 \Phi_м$	$\sigma_p + M_и \beta_m / W - Vs^2 \Phi_2 \Phi_м$	$\sigma_p + Vs^2 \Phi_1 \Phi_м$	$\sigma_p - Vs^2 \Phi_2 \Phi_м$
Окружные σ_θ	$2\sigma_p - M_и \gamma_m / W + Vs^2 \Phi_1 \Phi_м$	$2\sigma_p + 10^{-2} p + M_и \gamma_m / W - Vs^2 \Phi_2 \Phi_м$	$2\sigma_p + M_и \gamma_m / W + Vs^2 \Phi_1 \Phi_м$	$2\sigma_p + 10^{-2} p - M_и \gamma_m / W - Vs^2 \Phi_2 \Phi_м$
Радиальные σ_r	0	$-10^{-2} p$	0	$-10^{-2} p$

$$\sigma_p = \frac{10^{-2} p}{\beta^2 - 1};$$

$$M_и = M_и^x + (M_и^p - M_и^x)\, t/t_p - 0{,}02 \frac{pRWa_T}{s} \frac{D_н}{(D_н - s)} \quad \text{или} \quad M_и = M_и^x + (M_и^p - M_и^x)\, t/t_p - 0{,}04 \frac{pRWa_T}{s} \frac{D_н}{D_н - s}$$

для точек I и 3 принимаются бóльшие, для точек 2 и 4 – мéньшие значения $M_и$ (в расчетных точках g_i цикла). Для характерных точек a, $б$, $в$, $г$ коэффициент 0,02 или 0,04 принимается такой же, как и для расчетной точки в проверяемом сочетании.

$M_и^p$ и $M_и^x$ - действуют в плоскости гиба.

При $\lambda \geqslant 1{,}5$ $\gamma_m = \frac{18\lambda}{1+12\lambda^2}$, при $\lambda < 1{,}5$ $\beta_m = \frac{2+12\lambda^2}{1+12\lambda^2}$, γ_m и β_m принимаются согласно РТМ 24.038.08-72.

Безразмерный геометрический параметр $\lambda = \frac{RS}{r_{ср}^2}$.

Примечания: 1. При $\lambda < 1{,}5$ расчет выполняется для наиболее нагруженных точек, положение которых может отличаться от точек I-4 рис.4.

2. При $\lambda < 1{,}5$ и значительных отклонениях от овальной формы сечения значения допустимых скоростей прогрева, полученные по приведенным формулам, могут быть заниженными. В необходимых случаях допускается более строгий расчет компонентов напряжений согласно п.8.6 РТМ I08-020.01-75.

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧКАХ КОЛЛЕКТОРА, ТРУБЫ СО ШТУЦЕРОМ (ТРОЙНИКА)

Компоненты напряжений	Точка		
	I,4	2,5	3,6
Осевые σ_z	$-10^{-2}p$	$\sigma_p\alpha_p^a - (2\sigma_p + 10^{-2}p)\alpha_p^\theta \pm$ $\pm \alpha_и^a \cdot \frac{M_и}{W\beta} - \alpha_t' V s^2 \Phi_2 \Phi_м$	$\alpha_p\sigma_p \pm \alpha_ц(\frac{M_и}{W} + 0{,}7 K_{шх} \times$ $\times \frac{\lvert M_и^x \rvert}{W'}) + \alpha_t V s^2 \Phi_1 \Phi_м$
Окружные σ_θ	$(2\sigma_p + 10^{-2}p)\alpha_p^a - \sigma_p\alpha_p^\theta \mp$ $\mp \alpha_и^t \cdot \frac{M_и}{W\beta} - \alpha_t' V s^2 \Phi_2 \Phi_м$	$-10^{-2}p$	$2\sigma_p + V s^2 \Phi_1 \Phi_м$
Радиальные σ_r	$-10^{-2}p$	$-10^{-2}p$	0

$$\delta_p = \frac{10^{-2} p}{\beta^2 - 1}; \qquad M_и = M_и^x + (M_и^p - M_и^x)\frac{t}{t_p}; \quad M_и' = M_и^{1x} + (M_и^{1p} - M_и^{1x})\frac{t}{t_p},$$

где $M_и^p$ и $M_и^x$ действуют на основную магистраль в точке подключения штуцера;

$M_и^{1p}$ и $M_и^{1x}$ действуют на ответвление в точке соединения штуцера (тройника) с основной магистралью;

$K_ш$ вычисляется по формуле для $K_{из(ш)}$ согласно п.5.2.4 РТМ I08-020-0I-75.

Примечание. Для тройника или одиночного приварного штуцера большого диаметра значение $M_и$ в плоскости осей тройника и штуцера равно $M_и = M_x \sin\varphi - M_y \cos\varphi$, где M_x и M_y - значения изгибающего момента для заданной температуры относительно осей координат x и y, перпендикулярных к оси основной магистрали;

φ - угол наклона оси штуцера относительно оси x.

Положительное значение $M_и$ должно соответствовать растягивающим осевым напряжениям в зоне отверстия.

Расчет напряжений для точки 7 проводится по формулам для точки 3 со знаком "-" перед $0{,}7 K_{шx}$.

Расчет напряжений для точек 4,5 и 6 не требуется.

ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНОМ СТЫКЕ ТРУБЫ

Компоненты напряжений	Поверхность	
	наружная	внутренняя
Осевые σ_z	$\alpha_p \sigma_p \pm \alpha_и \frac{M_и}{W} + \alpha_t V s^2 \Phi_1 \Phi_м$	$\alpha_p \sigma_p \pm \alpha_и \frac{M_и}{W\beta} - \alpha_t V s^2 \Phi_2 \Phi_м$
Окружные σ_θ	$2\sigma_p + V s^2 \Phi_1 \Phi_м$	$2\sigma_p + 10^{-2} p - V s^2 \Phi_2 \Phi_м$
Радиальные σ_r	0	$-10^{-2} p$

$$\sigma_p = \frac{10^{-2} p}{\beta^2 - 1}; \qquad M_и = M_и^x + (M_и^p - M_и^x)\frac{t}{t_p};$$

значения $M_и^x$, $M_и^p$ рассчитываются в сечении сварного стыка;

α_p, $\alpha_и$ и α_t выбираются для сварного соединения.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

I. Расчет допустимых скоростей прогрева и расхолаживания барабанов котлов и градиентов температур в барабанах

Наименование	Обозначение	Формула	Котлы электростанций	
			неблочных	блочных
			$p_н$=II МПа= =II0 кгс/см^2; $D_б$ =I600 мм; S =89 мм	$p_н$ =I5,5МПа= =I55 кгс/см^2; $D_б$ =I600 мм; S =II5 мм
Характеристика материала				
Марка стали	-	-	Сталь 22	I6ГНМА
Температура, °С	t	-	I00; 3I6	I00; 343
Модуль упругости, МПа(кгс/мм^2)	$E_t \cdot I0^{-4}$		20,8(2,08); 20,0(2,00)	20,5(2,05); I9,2(I,92)
Температурный коэффициент линейного расширения, I/°С	$\alpha_t \cdot I0^6$	-	I2,80 I3,60	I2,30 I4,70
Коэффициент температуропроводности, м^2/ч	$a \cdot I0^2$	-	4,75 3,42	4,I4 3,24
Предел текучести, МПа(кгс/мм^2)	$\sigma_{0,2}$	-	2I0(2I); I90(I9)	320(32); 255(25,5)
Предел прочности, МПа(кгс/мм^2)	$\sigma_{вt}$	-	430(43); 420(42)	490(49); 470(47)

Наименование	Обозначение	Формула	Котлы электростанций	
			неблочных	блочных
			$p_н$=II МПа= =II0 кгс/см^2; $D_в$=I600 мм; S =89 мм	$p_н$=I5,5МПа= =I55 кгс/см^2; $D_в$ =I600 мм; S =II5 мм
Допустимые напряжения	$\sigma_{доп}=\frac{\sigma^t_в}{n}$	–	I65(I6,50); I6I,3(I6,I3)	I88(I8,80); I8I(I8,I0)
при $n_в$ =2,6; $n_{0,2}$ =I,5, МПа(кгс/мм^2)	$\frac{\sigma^t_{0,2}}{n_{0,2}}$	–	I40(I4,0); I27(I2,7)	2I3(2I,3); I70(I7,0)
Относительное сужение поперечного сечения образца, %	$\psi_{мин}$	–	48 43	50 50
Равномерное сужение, определяемое при напряжении, равном пределу прочности, %	$\psi^t_в$	$\psi_{мин}\frac{1-\frac{\sigma^t_{0,2}}{\sigma^t_в}}{1+\frac{1,4\psi^t_{мин}}{100}\frac{\sigma^t_{0,2}}{\sigma^t_в}}$	I8,5 I8,4	II,8 I6,8

Расчетное значение относительного сужения поперечного сечения образца, %	ψ'	$\frac{1}{2}(\psi^t_{мин} + \psi^t_B)$	33,3 30,7	30,9 33,4
Коэффициент Пуассона	μ	-	0,30	0,30
Отношение диаметров	β	$\frac{D_H}{D_B}$	I,I00	I,I05
Коэффициенты концентраций напряжений:				
температурных "скоростных"	αt	-	I,80	I,80
от разности "верх-низ" в сечении отверстия:				
продольном	$K^{\theta}_{\Delta v}$	-	-I,00	-I,00
поперечном	$K^{z}_{\Delta v}$	-	3,50	3,50
от внутреннего давления в сечении:				
поперечном	α^{z}_{p}	-	I,25	I,25
продольном	α^{θ}_{p}	-	3,00	3,00
Коэффициент, учитывающий характер распределения температуры по периметру поперечного сечения барабана для зоны отверстий:	γ			
водоопускных		-	0,30	0,30
боковых		-	0,40	0,40

Наименование	Обозначение	Формула	Котлы электростанций	
			неблочных	блочных
			$p_н$=II МПа= =II0 кгс/см^2; $D_в$=I600 мм; s =89 мм	$p_н$=I5,5МПа= =I55 кгс/см^2; $D_в$ =I600 мм; s =II5 мм
Вспомогательные комплексы		$\frac{(\beta^2+1)}{(\beta^2-1)}\alpha_p^z+1$	I3,I0	8,60
		$\frac{(\beta^2+1)}{(\beta^2-1)}\alpha_p^\theta+1$	29,70	I7,90
Коэффициент свойств материала, $\frac{кг \cdot мин}{(мм \cdot {}^0C)}$	$\Phi_м \cdot 10^4$	$\frac{\alpha E 6 \cdot 10^{-5}}{(1-\mu)\cdot a}$	4,60 6,43	5,23 7,40
Коэффициент формы	Φ_2^*	$\frac{1}{3}(\frac{\beta}{\beta-1})\ell u \beta$	0,35	0,35

Расчет допустимых скоростей прогрева барабана при пуске блока

Определение допустимых чисел гидроопрессовок в продольном сечении отверстий

Амплитуда напряжений, МПа(кгс/мм^2)	σ_a	$\frac{1}{2}\cdot 1{,}25 p_н \cdot 10^{-2} \times$	204(20,4)	I73(I7,3)

		$\times\left(\frac{\beta^2+1}{\beta^2-1}\right)\alpha_\rho^\theta+1$		
Амплитуда напряжений с учетом коррозии, МПа(кгс/мм^2)	σ_a^*	$K'\sigma_a$, где $K'=2$	408(40,8)	346(34,6)
Допустимое число циклов при $r=-1$	N_{r0}^*	$\left[\frac{2{,}3F_t\,lg\frac{100}{100-\psi}}{4(\sigma_a^*-\sigma_{доп})}\right]^{\frac{2}{10}}$	740	1416

Определение допустимого числа пусков из неостывшего состояния в продольном сечении отверстий

Давление перед пуском, МПа(кгс/см^2)	p_r		6,6(66)	6,2(62)
Амплитуда напряжений при начальной скорости прогрева v_0=3 °С/мин, МПа(кгс/мм^2)	$(\sigma_a)_r$	Формула п.3.3	86(8,6)	122(12,2)
Размах напряжений, МПа(кгс/мм^2)	σ_r	$2(\sigma_a)_r$	172(17,2)	244(24,4)
Максимальное напряжение, МПа(кгс/мм^2)	$\sigma_{макс}$	$p_н\cdot10^{-2}\times\left(\frac{\beta^2+1}{\beta^2-1}\alpha_\rho^\theta+1\right)$	320(32,0)	276(27,6)
Проверка выполнения условия для вычисления коэффициента асимметрии, МПа(кгс/мм^2)		$\sigma_{макс}\geq(\sigma_{0,2}\,t_{макс})$	320>190 (32,0>19,0)	276>255 (27,6>25,5)

Наименование	Обозначение	Формула	Котлы электростанций	
			неблочных	блочных
			$p_н$=II МПа= =II0 кгс/см^2; $D_в$ =I600 мм; s =89 мм	$p_н$=I5,5МПа= =I55 кгс/см^2; $D_в$ =I600 мм; s =II5 мм
Коэффициент асимметрии	r	$\frac{\sigma_{0,2\,t_{мин}} - \sigma_r}{\sigma_{0,2\,t_{мин}}}$	0,I8	0,24
Амплитуда напряжений с учетом коррозии, МПа(кгс/мм^2)	$(\sigma_a)^*_г$	$K'(\sigma_a)_г$ при $K'=2$	I72(I7,2)	242(24,2)
Допустимое число циклов	$N^*_г$	$\left[\frac{2,3E_t lg\frac{100}{100-\Psi}}{4(\sigma_a)^*_г - \sigma_{доп}\left/\frac{1-r}{2}\right.}\right]^2 \cdot \frac{1}{10}$	3062	I246

Определение допустимых скоростей прогрева или числа пусков из холодного состояния по условию прочности в продольном сечении отверстий

Допустимое число пусков из холодного состояния при фактическом соотношении $N_x : N_г : N_{г0}$ = I:4:0,I при D = I (см.п.3.I)	N^*_x	$\frac{N_x}{1 - \frac{4N_x}{N^*_г} - 0,1\frac{N_x}{N^*_{г0}}}$	$\frac{N_x}{1-0,00143N_x}$	$\frac{N_x}{1-0,00328N_x}$

Задаваемое число пусков из холодного состояния	N_x		390;354;345	I60;I5I;I37
Допустимое число пусков из холодного состояния при заданном N_x^*	N_x^*		870 760 690	335 300 250
Амплитуда условно-упругих напряжений с учетом концентрации деформаций и коррозии, МПа(кгс/см^2)	$(\sigma_a^*)_x$	$\frac{2{,}3E_t \lg \frac{100}{100-\Psi}}{4\sqrt{N_x^* \cdot 10}} + \sigma_{доп}$	357(35,7) 370(37,0) 382(38,2)	504(50,4) 535(53,5) 570(57,0)
То же без учета коррозии, МПа(кгс/см^2)	$(\sigma_a)_x$	$\frac{\sigma_a^x}{K'}$ при $K'=2$	I78(I7,8) I85(I8,5) I9I(I9,I)	252(25,2) 267(26,7) 285(28,5)
газмах напряжений, МПа(кгс/мм^2)	$(\sigma_r)_x$	$2(\sigma_a)_x$	357(35,70) 370(37,00) 382(38,20)	504(50,40) 535(53,50) 570(57,00)
Сумма пределов текучести, МПа(кгс/мм^2)	–	$\sigma_{0,2}t_{макс} + \sigma_{0,2}t_{мин}$	400(40,0)	575(57,5)
Проверка выполнения условия упругого деформирования, МПа(кгс/мм^2)	–	$\sigma_r \leq \sigma_{0,2}t_{макс} + \sigma_{0,2}t_{мин}$	357 < 400 (35,7< 40,0) 370 <400 (37,0 < 40,0) 382 <400 (38,2 < 40,0)	504 < 575 (50,4 < 57,3) 535 < 575 (53,5 < 57,5) 570 < 575 (57,0 < 57,5)
Задаваемые значения перепадов температур "верх-низ", ^{0}C		$\Delta\vartheta$	0; 30; 40; 50; 60	
Значение скорости прогрева при заданных значениях перепадов температур "верх-низ", ^{0}C/мин,	$V_п$	Формула п.3.5	I,I0;I,60;2,I0 4,30;4,90;5,56 0,20;0,70;I,20 3,90;4,50;5,I0 0,40; 0,90 3,70;4,30;5,00 0,I3; 0,70 3,60;4,20;4,80 0,40 3,40;4,00;4,60	

Наименование	Обозначение	Формула	Котлы электростанций	
			неблочных	блочных
			$p_н$ =11МПа= =110 кгс/см^2; $D_в$ =1600 мм; s =89 мм	$p_н$ =15,5МПа= =155 кгс/см^2; $D_в$ =1600 мм; s =115 мм
Выбор допустимых значений скоростей пусков из холодного состояния при заданных значениях скорости прогрева $V_п$ и перепадов температур $\Delta\vartheta$, либо допустимых скоростей прогрева $V_п$ при заданном числе пусков из холодного состояния $N_х$ и перепаде температур $\Delta\vartheta$		Производится по графику рис.10, построенному по результатам расчета		

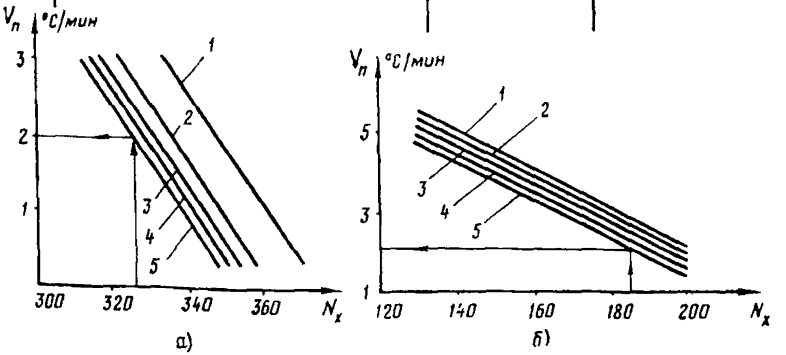


Рис.10. Зависимость допустимых скоростей прогрева барабанов котлов при пусках из холодного состояния от количества пусков при различных перепадах температур "верх-низ":

а – вариант I; *б* – вариант 2; $\Delta\vartheta$:
I – 0°С; 2 – 30°С; 3 – 40°С;
4 – 50°С; 5 – 60°С

Расчет допустимых значений скоростей расхолаживания и разности температур "верх-низ" при расхолаживании барабана котла (применительно к отверстиям на боковой образующей барабана)

Определение допустимого числа гидроопрессовок в поперечном сечении боковых отверстий

Амплитуда напряжений, МПа(кгс/мм^2)	$[\sigma_a]_{roz}$	$\frac{1}{2}1{,}25p_н\cdot10^{-2}\chi\left(\frac{\beta^2+1}{\beta^2-1}\alpha_p^z+1\right)$	90,0(9,00)	82,5(8,25)
То же с учетом коррозии, МПа(кгс/мм^2)	$[\sigma_a]^*_{ro}$	$K'(\sigma_a)_{roz}$	I80(I8,0)	I65(I6,5)
Допустимое число циклов	(N_{roz})	$\left[\frac{2{,}3E_t\,lg\frac{100}{100-\varphi}}{4([\sigma_a]^*_{roz}-\sigma_{don})}\right]^2\cdot\frac{1}{10}$	I,9·I0^5	5,0·I0^7

Определение допустимого числа пусков из неостывшего состояния по условию прочности в поперечном сечении отверстия

Амплитуда напряжений при пусках из неостывшего состояния при начальной скорости прогрева $V_г$=3°С/мин МПа(кгс/мм^2)	$(\sigma_{aг})_z$	Формула п.3.3	50(5)	80(8)
То же с учетом коррозии, МПа(кгс/мм^2)	$(\sigma_{aг})^*_z$	$K'(\sigma_{aг})_z$	I00(I0)	I60(I6)

Наименование	Обозначение	Формула	Котлы электростанций	
			неблочных	блочных
			$p_н$=II МПа= =II0 кгс/см^2; $D_в$ =I600 мм; s =89 мм	$p_н$=I5,5МПа= =I55 кгс/см^2; $D_в$ =I600 мм; s =II5 мм
Размах напряжений, МПа(кгс/мм^2)	$(\sigma_r)_{Fz}$	$2(\sigma_a)_{Fz}$	I00(I0)	I60(I6)
Максимальное напряжение, МПа(кгс/мм^2)	$\sigma_{макс}$	$p_н 10^{-2}\left(\frac{\beta^2+1}{\beta^2-1}\alpha_p^z+1\right)$	I44(I4,4)	I33(I3,3)
Проверка условия для вычисления коэффициента асимметрии, МПа(кгс/мм^2)		$\sigma_{макс} \le \sigma_{0,2\,t_{мин}}$ $\sigma_r < (\sigma_{0,2\,t_{макс}} + \sigma_{0,2\,t_{мин}})$	I44(I4,4) 2I0(2I,0) I00(I0,0) I00(I0,0)	I33(I3,3) 320(32,0) I60(I6,0) 575(57,5)
Коэффициент асимметрии	r	$\frac{\sigma_{макс}-\sigma_R}{\sigma_{макс}}$	-0,305	-0,020
Допустимое число пусков из неостывшего состояния	N^*_{Fz}	$\left[\frac{2{,}3E_t \lg\frac{100}{100-\Psi}}{4\left[(\sigma_a)^*_{Fz}-\sigma_{доп}\frac{1-r}{2}\right]}\right]^{\frac{2}{1/10}}$	II200	8700

Определение допустимого числа пусков из холодного состояния
по условию прочности в продольном сечении отверстий

Допустимое число пусков из холодного состояния при фактическом соотношении циклов $N_X : N_Г : N_{ГО} = 1:4:0,1$	N^*_{Xz}	$\dfrac{N_X}{1-\dfrac{4N_X}{N^*_Г}-0,1\dfrac{N_X}{N^*_{ГО}}}$	$\dfrac{N_X}{1-0,000232N_X}$	$\dfrac{N_X}{1-0,000460N_X}$
Принятые для расчета значения скорости прогрева, ^oC/мин	$V_п$	–	2	2
Перепады температур "верх-низ", ^oC	$\Delta\vartheta$	–	60	60
Число пусков из холодного состояния	N_X	–	328	186
Допустимое число циклов	N^*_{Xz}	–	355	204

Определение допустимой амплитуды напряжений в поперечном сечении боковых отверстий
при пуске из холодного состояния

Амплитуда условно-упругих напряжений с учетом концентраций деформаций и коррозии, МПа(кгс/мм^2)	$(\sigma_a)^*_z$	$\dfrac{2,3E_t \lg\dfrac{100}{100-\Psi}}{4\sqrt{N^*_{Xz}\cdot 10}}+\sigma_{доп}$	685 (68,50)	608 (60,80)
Амплитуда без учета коррозии, МПа(кгс/мм^2)	$(\sigma_a)_z$	$\dfrac{(\sigma_a)^*_z}{K'}$	342,5(34,25)	304(30,40)

Наименование	Обозначение	Формула	Котлы электростанций: неблочных	Котлы электростанций: блочных
			$p_н$=11МПа=110 кгс/см^2; $D_в$=1600 мм; S=89 мм	$p_н$=15,5МПа=155 кгс/см^2; $D_в$=1600 мм; S=115 мм
Размах напряжений при неупругой деформации, МПа(кгс/мм^2)	σ_{RZH}	$2(\sigma_a)_z$	685(68,50)	608(60,80)
Размах условных приведенных напряжений с учетом концентрации при упругой деформации $K = 0,8\ (\sigma_R)$, МПа(кгс/мм^2)	–	$\sqrt{\frac{(\sigma_{0,2t_{макс}} + \sigma_{0,2t_{мин}})\,\sigma_{RZH}}{0,8}}$	585(58,50)	662,5(66,25)
Определение допустимой разности температур "верх-низ" в барабане при останове котла				
Начальная скорость расхолаживания, °С/мин	V_0	Задается	0,5-1,0	0,5-1,0
Задаваемые значения скоростей (°С/мин) расхолаживания в интервалах давлений:	$V_п$			
100>p>80		Задается	–	3
80>p>60			3	3
60>p>20			2	2
20>p> 1			1	1

Допустимая разность температур (°С) расхолаживания в интервалах давлений:	$\Delta\vartheta_0$	$\dfrac{\left\{\vartheta_{rz}-\left[10^2\left(\dfrac{\beta^2+1}{\beta^2-1}\alpha_p^z+1\right)(p-p_n)+K_t s^2\Phi_2\left(\Phi_{M0}V_0+\Phi_{Hn}V_n\dfrac{E_{t0}}{E_{tn}}\right)\right]\right\}}{K_{\Delta\vartheta\beta}\left(\alpha_{t0}E_{t0}+\alpha_{tn}E_{tn}\dfrac{E_{t0}}{E_{tn}}\right)}$, где p_n = 0,5 МПа(5 кгс/см^2)		
100>p>80			-	78-72
80>p>50			50-58	80-76
50>p>20			64-62	85-78
20>p> I			85-70	87-83

2. РАСЧЕТ СКОРОСТИ ПРОГРЕВА ВЫХОДНОГО КОЛЛЕКТОРА ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ

Определяются допустимые скорости прогрева при пусках из холодного и горячего состояний выходного коллектора пароперегревателя с наружным диаметром 426 мм и толщиной стенки 90 мм, изготовленного из стали I5XIMIФ. Минимальная и максимальная температуры в цикле при пуске из холодного состояния соответственно составляют 20 и 545°С, а рабочее давление равно 25,5 МПа(255 кгс/см^2). Коэффициент прочности, учитывающий ослабление детали отверстиями, составляет $\varphi = 0{,}8$.

Предполагается, что коллектор не несет весовых и компенсационных нагрузок и температурные градиенты вдоль длины и по периметру поперечного сечения коллектора пренебрежимо малы. Принимается, что давление при пусках энергоустановки из холодного состояния в заданных диапазонах температур изменяется линейно согласно данным, приведенным ниже.

Температура, °С...	20	300	350	420	480	545
Давление, МПа(кгс/см^2)...	0	3(30)	5(50)	I2(I20)	25,5(255)	25,5(255)

При пусках из горячего состояния в диапазоне температур от 250 до 430°С давление повышается от I0 до 25,5 МПа (от I00 до 255 кгс/см^2), оставаясь в дальнейшем постоянным.

Проектное число циклов "пуск-останов" принимается равным I000, при этом число пусков из холодного состояния N_x составляет 200, а число пусков из горячего состояния $N_г = 800$.

Таблица 2

Обозначение точек	t °С	p МПа(кгс/см^2)	V °С/мин Задано	σ_p МПа(кгс/мм^2)	$E\cdot10^{-4}$ МПа(кгс/мм^2)	$a\cdot10^5$ м^2/с	$\alpha\cdot10^6$ 1/°С
Характерные точки							
a	0	0	0	0	2I,4(2,I4)	I,I3	I0,60
$б$	540	25,5(255)	0	I6,0(I,6)	I7,4(I,74)	0,69	I3,60
$в$	540	25,5(255)	-I	I6,0(I,6)	I7,4(I,74)	0,69	I3,60
$г$	540	0	0	0	I7,4(I,74)	0,69	I3,60
Расчетные точки							
g_1	20	0	-	0	2I,4(2,I4)	I,I3	I0,60
g_2	I00	I,0(I0)	-	0,6(0,06)	20,85 (2,085)	I,08	II,I0
g_3	200	2,0(20)	-	I,2(0,I2)	20,I(2,0I)	I,03	II,65
g_4	300	3,0(30)	-	I,8(0,I8)	I9,4(I,94)	0,94	I2,45
g_5	400	I0,0(I00)	-	6,0(0,6)	I8,7(I,87)	0,85	I3,00
g_6	500	25,5(255)	-	I6,0(I,6)	I7,75 (I,775)	0,74	I3,45
g_7	540	25,5(255)	-	I6,0(I,6)	I7,4 (I,740)	0,69	I3,60

Вначале определяется предельное количество циклов $N_{пр}$ по размаху напряжений от давления и внешних нагрузок.

Ввиду отсутствия изгибающего момента ($\sigma_и = 0$) при определении размаха напряжений σ_R и допустимых температурных напряжений σ_t расчет проводится для сочетаний характерных точек, согласно пп.4.7 и 4.I0 только по формулам, приведенным в настоящих РТМ для внутренней поверхности коллектора. Параметры характерных точек расчета приведены в табл. 2.

Согласно пп. 4.7 и 4.II максимальный размах напряжений σ_R для внутренней поверхности коллектора составляет:

- для сочетания характерных точек расчета $б-а$ (см.п.4.7)

при $\sigma^{R}_{u/\beta} = 0$ и $2C(\sigma^{H}_{p} + 10^{-2}\cdot p_H) - 2(\sigma^{B}_{p} + 10^{-2} p_B) < 0$, так как $p_H = \sigma^{H}_{p} = \sigma^{H}_{t} = 0$, то согласно п.4.11

$$\sigma_R = 5\sigma^{B}_{p} + 4\cdot 10^{-2} p_B = 5\cdot \frac{10^{-2}}{\varphi}\frac{p_B}{\beta^2-1} + 4\cdot 10^{-2} p_B =$$

$$\frac{5\cdot 10^{-2}\cdot 255}{0{,}8\cdot(1{,}73^2-1)} + 4\cdot 10^{-2}\ 255 = 5\cdot 1{,}6 + 4\cdot 2{,}55 =$$

$$= 18{,}2 \text{ кгс/мм}^2 \approx (182 \text{ МПа}),$$

при этом $\sigma^{B}_{p} = 1{,}6$ кгс/мм$^2 \approx 16$ МПа;

- для сочетания $в - а$

$$\sigma_R = 5\sigma^{B}_{p} + 4\cdot 10^{-2} p_B + 2\sigma_t = \frac{5\cdot 10^{-2} p_B}{\varphi(\beta^2-1)} + 4\cdot 10^{-2} p_B + \frac{2\alpha E s^2}{(1-\mu)a}\Phi_2 V =$$

$$= 5\cdot 1{,}6 + 4\cdot 2{,}55 - \frac{2\cdot 13{,}6\cdot 10^{-6}\cdot 1{,}74\cdot 90^2}{(1-0{,}3)\cdot 0{,}690\cdot 10^{6}\cdot 10^{-5}\cdot 60} \times 0{,}435\ (-1) =$$

$$= 5\cdot 1{,}6 + 4\cdot 2{,}55 + 2{,}88\cdot 2 = 23{,}96 \text{ кгс/мм}^2 \approx 239{,}6 \text{ МПа},$$

при этом $\sigma_t = 2{,}88$ кгс/мм$^2 \approx 28{,}8$ МПа;

- для сочетания $г - а$

$\sigma_R = 0$, поскольку $p_B = p_H = 0$;

- для сочетания $в - б$

$$\sigma_R = 5\sigma^{B}_{p} + 4\cdot 10^{-2} p_B + 2\sigma_t - C(5\sigma^{H}_{p} + 4\cdot 10^{-2} p_H),$$

но поскольку $C = \frac{E_B}{E_H} = \frac{E_{545}}{E_{545}} = 1$ и $p_B = p_H$, то

$$\sigma_R = 2\sigma_t = 2\cdot 2{,}88 = 5{,}76 \text{ кгс/мм}^2 \approx 57{,}6 \text{ МПа};$$

- для сочетания $в - г$

$\sigma_R = 5\sigma^{B}_{p} + 4\cdot 10^{-2}\cdot p_B + 2\sigma_t$, т.е. как и для сочетания $в - а$

$\sigma_R = 23{,}96$ кгс/мм$^2 \approx 239{,}6$ МПа;

- для сочетания $б - г$

$\sigma_R = 5\,\sigma_p^B + 4\cdot10^{-2}\cdot p_B$, т.е. как и для сочетания $б - а$

σ_R = I8,2 кгс/мм^2 $\approx$ I82 МПа.

Таким образом, максимальный размах напряжений σ_R от давления и внешних нагрузок составляет 239,6 МПа(23,96 кгс/мм^2). Минимальное значение суммы $\sigma_{0,2}$ для верхней и нижней точек при сочетании $в$ -2 составляет

$$\left[\sigma_{0,2}^{545} + \sigma_{0,2}^{545} = 50\ \text{кгс/мм}^2 = 500\text{МПа}\right] > \left[\sigma_R = 23,96\ \text{кгс/мм}^2 = 239,6\ \text{МПа}\right].$$

Таким образом, имеет место упругое деформирование (см.п.2.4).

Предельное количество циклов, соответствующее найденному размаху напряжений σ_R , определяемое по формуле из п.2.8 при η= I . и r = -I, равно

$$N_X^{пр} = \left[\frac{A}{\frac{\sigma_R}{2} - \sigma_{доп}}\right]^2,$$

где $$A = \frac{2,3\cdot n_э E_t}{4\cdot\sqrt{n_N}}\ lg\frac{100}{100-\psi} = \frac{2,3\cdot0,32\cdot I,725\cdot10^4}{4\cdot\sqrt{10}} \times$$

$$\times\ lg\frac{I00}{I00-36} = I94,$$

т.е.

$$N_X^{пр} = \left[\frac{I94}{\frac{23,96}{2} - 7,5}\right]^2 = I875.$$

Так как изгибающие моменты в обоих видах циклов при пусках из холодного и горячего состояний отсутствуют, то размахи напряжений σ_R совпадают, поэтому $N_X^{пр} = N_Г^{пр}$.

Проверка наличия решения (см.п.4.8):

$$\frac{N_X}{N_X^{пр}} + \frac{N_Г}{N_Г^{пр}} = \frac{200}{I875} + \frac{800}{I875} < I.$$

В соответствии с п.4.9 при $N_X + N_Г < N_X^{пр}$ принимается

$$N_\Gamma^* = N_X^* = N_X + N_\Gamma = 200 + 800 = 1000.$$

Допустимый размах напряжений, соответствующий N_X^* и N_Γ^*, при $\eta = 1$ и $r = -1$ равен (см.п.2.8)

$$\sigma_R = 2\left(\frac{A}{\sqrt{N_{X\Gamma}^*}} + \frac{1-r}{2}\cdot\eta\,\sigma_{доп}\right) = 2\left(\frac{194}{\sqrt{1000}} + 7{,}5\right) =$$

$$= 27{,}3 \text{ кгс/мм}^2 \approx 273 \text{ МПа}.$$

Теперь согласно п.4.10 определяются допустимые температурные напряжения.

В качестве точки ∂_1 принимается напряженное состояние коллектора при температуре 20°С. При этом, поскольку $\sigma_H^R = 0$, то

$$2c\left(\sigma_p^H + 10^{-2}\cdot p_H\right) - 2\left(\sigma_p^B + 10^{-2}\cdot p_B\right) \le 0$$

и для расчета допустимых температурных напряжений справедлива формула

$$2\sigma_t^H = \frac{1}{C}\left(\sigma_R - 5\sigma_p^B - 4\cdot 10^{-2}\cdot p_B + 2\sigma_t^B\right) + 5\sigma_p^H + 4\cdot 10^{-2} p_H.$$

Тогда для характерных точек расчета (см.п.4.10):

- для сочетания ∂_1 - а $p_H = p_B = 0$,

$$2\sigma_t^H = \sigma_R, \qquad \sigma_t^H = \frac{27{,}3}{2} = 13{,}65 \text{ кгс/мм}^2 \approx 136{,}5 \text{ МПа};$$

- для сочетания $\delta - \partial_1$ при $p_H = 0$, $p_B = 255$ кгс/см$^2 \approx 25{,}5$ МПа и $C = \frac{E_B}{E_H} = \frac{E_{545}}{E_{20}} = 0{,}813$

$$2\sigma_t^H = \frac{1}{0{,}813}\cdot(27{,}3 - 5\cdot 1{,}6 - 4\cdot 2{,}55) = \frac{9{,}1}{0{,}813},$$

$$\sigma_t^H = \frac{9{,}1}{2\cdot 0{,}813} = 5{,}59 \text{ кгс/мм}^2 \approx 55{,}9 \text{ МПа};$$

- для сочетания $в - g_1$ при $p_н = 0$, $p_в = 255$ кгс/см^2 $\approx 25{,}5$ МПа и $\sigma_t = -2{,}88$ кгс/мм^2 $\approx -28{,}8$ МПа

$$2\sigma_t^н = \frac{1}{0{,}813}\ (27{,}3 - 5\cdot 1{,}6 - 4\cdot 2{,}55 - 2\cdot 2{,}88),$$

$$\sigma_t^н = 2{,}05 \text{ кгс/мм}^2 \approx 20{,}5 \text{ МПа};$$

- для сочетания $г - g_1$ при $p_н = p_в = 0$

$$2\sigma_t^н = \frac{27{,}3}{0{,}813}; \qquad \sigma_t^н = \frac{27{,}3}{2\cdot 0{,}813} = 16{,}8 \text{ кгс/мм}^2 \approx 168 \text{ МПа}.$$

Таким образом, для расчетной точки g_1 минимальное значение допустимого температурного напряжения, определяемое сочетанием $в - g_1$, составляет

$$\sigma_t = 2{,}05 \text{ кгс/мм}^2 \approx 20{,}5 \text{ МПа}.$$

Аналогичным образом рассчитываются допустимые температурные напряжения σ_t согласно пп.4.10 и 4.11 для остальных расчетных точек g_i. Значения этих температурных напряжений приведены в табл.3.

Выбрав в качестве допустимых из табл.3 минимальные рассчитанные температурные напряжения, по формуле

$$V = \frac{a\cdot(1-\mu)}{\alpha E \Phi_2 s^2}\ \sigma_t$$

определяют допустимые скорости прогрева коллектора. При этом $\beta = D_н / D_в = 1{,}73$, Φ_2 согласно рис.4 равно 0,435. Значения V для принятых расчетных температур приведены в табл.4.

Таблица 3

Сочетания характерных точек расчета ($i = 1,2,\ldots 7$)	Нумерация точек g_i ($i = 1,2, \ldots 7$)						
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
$g_i - а$	13,65	13,65	13,80	14,65	11,70	14,45	14,45
$б - g_i$	5,59	5,54	5,54	6,12	8,40	13,40	13,65
$в - g_i$	2,05	2,36	2,62	2,91	5,30	10,46	10,46
$г - g_i$	16,80	16,50	15,75	15,30	15,00	14,70	14,40

Таблица 4

Параметр	Температура, °С						
	20	I00	200	300	400	500	545
σ_t МПа(кгс/мм^2)	20,5 (2,05)	23,6 (2,36)	26,2 (2,62)	29,1 (2,9I)	53,0 (5,3)	I04,5 (I0,46)	I04,6 (I0,46)
V °С/мин	I,20	I,30	I,37	I,35	2,20	3,86	3,64

Результаты аналогичных расчетов допустимых температурных напряжений и скоростей прогрева для коллектора при пусках из горячего состояния приведены в табл.5, параметры точек - в табл.6.

Таблица 5

Параметр	Температура, °С				
	200	300	400	500	545
p МПа(кгс/см^2)	0	2,0(20)	8(80)	25,5 (255)	25,5 (255)
σ_t МПа(кгс/мм^2)	I9,I(I,9I)	29(2,9)	46,2(4,62)	I08(I0,8)	I07,7 (I0,77)
V °С/мин	I,00I	I,35	I,93	4,0	3,7

Таблица 6

Обозначение точек	t °С	p МПа(кгс/см^2)	V °С/мин	σ_p МПа (кгс/мм^2)	$E\cdot10^{-4}$ МПа (кгс/мм^2)	$a\cdot10^5$ м^2/с	$\alpha\cdot10^6$ 1/°С
Характерные точки							
а	200	0	0	0	2,0I	I,03	II,65
б	540	25,5 (255)	0	I6,0(I,6)	I,74	0,69	I3,60
в	540	25,5 (255)	-I	I6,0(I,6)	I,74	0,69	I3,60
г	540	0	0	0	I,74	0,69	I3,60

Окончание таблицы 6

Обозначение точек	t °С	p МПа(кгс/см^2)	V °С/мин	σ_p МПа(кгс/мм^2)	$E\cdot10^{-4}$ МПа (кгс/мм^2)	$a\cdot10^3$ м^2/с	$\alpha\cdot10^6$ 1/°С
Расчетные точки							
g_1	200	0	-	0	2,01	1,03	11,65
g_2	300	3,0(30)	-	1,8(0,18)	1,94	0,94	12,45
g_3	400	8,0(80)	-	4,8(0,48)	1,87	0,85	13,00
g_4	500	25,5 (255)	-	16,0(1,6)	1,775	0,74	13,45
g_5	540	25,5 (255)	-	16,0(1,6)	1,74	0,69	13,60

3. РАСЧЕТ СКОРОСТИ ПРОГРЕВА ПАРОПРОВОДА СО СВАРНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ

Определяются скорости прогрева паропровода диаметром 325х60 мм, изготовленного из стали 15Х1М1Ф, рассчитанного на рабочие параметры 540°С и 25 МПа (250 кгс/см^2). Максимальные изгибающие моменты от компенсации температурных расширений и собственного веса равны: $M_и^P = 7\cdot10^3$ Н·м(кгс·м); $M_и^X = -22\cdot10^3$ Н·м(кгс·м). Коэффициенты концентрации напряжений в сварном соединении $\alpha_p=\alpha_и=2$; $\alpha_t = 1,5$.

Проектное число циклов "пуск-останов" принимается равным 700, при этом число пусков из холодного состояния $N_x = 200$, число пусков из горячего состояния $N_г = 500$.

Параметры характерных и расчетных точек цикла с пуском из горячего и холодного состояния приведены в табл. 7-10 и рис. 11.

Для определения предельного количества циклов $N^{пр}$ необходимо вначале найти максимальный размах напряжений от давления и внешних нагрузок σ_R.

Для сочетания характерных точек расчета $\delta-a$ (см. п. 4.7) при

$$\sigma_и^R = -\left|\frac{M_и^P}{W}\right| - C\left|\frac{M_и^X}{W}\right| = -\left|\frac{7\cdot10^3\cdot10^3}{2837\cdot10^3}\right| - 0,813\left|\frac{22\cdot10^3\cdot10^3}{2837\cdot10^3}\right| =$$

$$= -8,77 \text{ кгс/мм}^2 \approx -87,7 \text{ МПа},$$

$\sigma_p^н = p_н = 0$ и $p_в = 250$ кгс/см$^2 \approx 25$ МПа;

$$\sigma_p^в = \frac{10^2 \cdot p_в}{\beta^2 - 1} = \frac{10^{-2} \cdot 250}{1{,}585^2 - 1} = 1{,}65 \text{ кгс/мм}^2 \approx 16{,}5 \text{ МПа}.$$

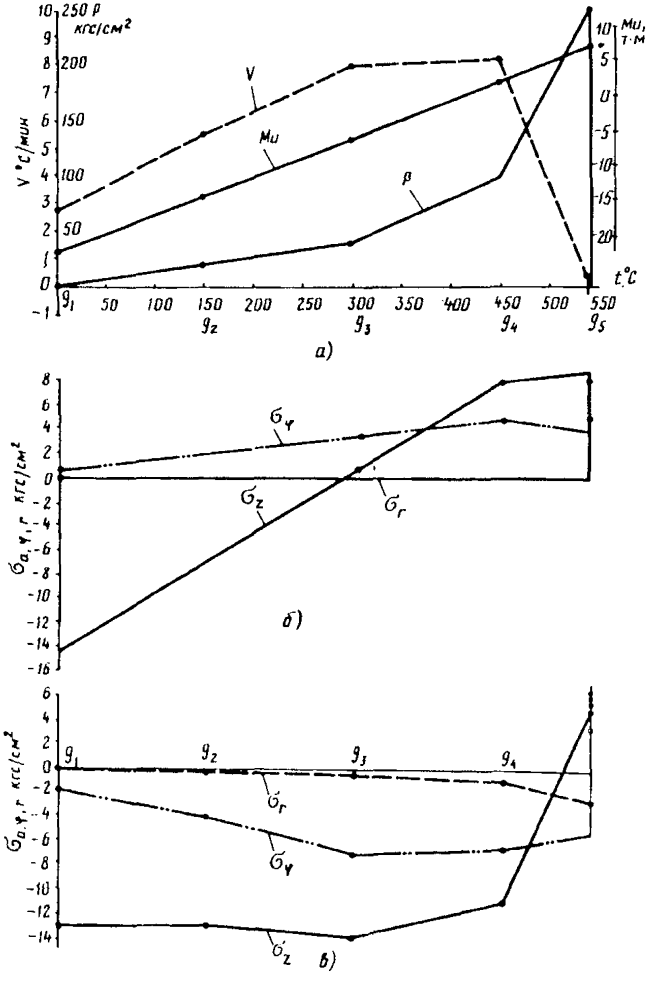


Рис.II. Параметры нагружения (а) и напряжения на наружной (б) и внутренней (в) поверхностях труб диаметром 325х60 мм при пуске из холодного состояния

Таблица 7

Обозначение точек	t °C	p МПа (кгс/см^2)	V °C/мин (задано)	σ_p МПа (кгс/мм^2)	$M_и \cdot 10^{-5}$ кН·м=кгс·см	$E \cdot 10^{-4}$ МПа (кгс/см^2) (справочные данные)	$a \cdot 10^5$ м^2/с (справочные данные)	$\alpha \cdot 10^6$ 1/°C (справочные данные)
Характерные точки								
a	0	0	0	0	-22	0,214 (2,14)	1,10	11,0
$б$	540	25,0 (250)	0	16,5 (1,65)	7,0	0,174 (1,74)	0,69	13,6
$в$	540	25,0 (250)	-1	16,5 (1,65)	7,0	0,174 (1,74)	0,69	13,6
$г$	540	0	0	0	7,0	0,174 (1,74)	0,69	13,6
Расчетные точки								
g_1	0	0	-	0	-22	0,214 (2,14)	1,10	11,0
g_2	150	2,0 (20)	-	1,3 (0,13)	-13,95	0,208 (2,08)	1,05	11,4
g_3	300	4,0 (40)	-	2,6 (0,26)	-5,89	0,201 (2,01)	0,94	12,5
g_4	450	10,0 (100)	-	6,6 (0,66)	2,17	0,182 (1,82)	0,80	13,2
g_5	540	25,0 (250)	-	16,5 (1,65)	7,0	0,174 (1,74)	0,69	13,6

Для внутренней поверхности паропровода σ_R можно найти на основании п.4.16 по формуле

$$\sigma_R = \alpha_p \sigma_p^B + 10^{-2} p_B - \frac{\alpha_и}{\beta} \sigma_и^R = 2 \cdot 1,65 + 2,5 + \frac{2}{1,585} \cdot 8,77 =$$

$$= 16,87 \text{ кгс/мм}^2 \approx 168,7 \text{ МПа},$$

а для наружной поверхности - на основании п.4.17 по формуле

$$\sigma_R = \alpha_p \sigma_p^B - \alpha_и \sigma_и^R = 2 \cdot 1,65 + 2 \cdot 8,77 = 20,84 \text{ кгс/мм}^2 \approx 208,4 \text{ МПа}.$$

Таблица 8

Обозначение точки	t °С	p МПа (кгс/см^2)	V °С/мин (задано)	σ_p МПа (кгс/мм^2)	$M_И \cdot 10^{-5}$ Н·м=кгс·см	$E \cdot 10^{-4}$ МПа (кгс/см^2) (справочные данные)	$a \cdot 10^5$ м^2/с (справочные данные)	$\alpha \cdot 10^6$ 1/°С (справочные данные)
Характерные точки				$\sigma_p = \frac{10^{-2} p}{\beta^2 - 1}$	$M_И^* + (M_И^p - M_И^*) \frac{t}{t_{раб}}$			
a	150	0	0	0	-13,95	0,208 (2,08)	1,05	11,4
$б$	540	25 (250)	0	16,5 (1,65)	7,0	0,174 (1,74)	0,69	13,6
$в$	540	25 (250)	-1	16,5 (1,65)	7,0	0,174 (1,74)	0,69	13,6
$г$	540	0	0	0	7,0	0,174 (1,74)	0,69	13,6
Расчетные точки								
g_1	150	0	-	0	-13,95	0,208 (2,08)	1,05	11,4
g_2	300	4,0 (40)	-	2,6 (0,26)	-5,89	0,201 (2,01)	0,94	12,5
g_3	450	10 (100)	-	6,6 (0,66)	2,17	0,182 (1,82)	0,80	13,2
g_4	540	25 (250)	-	16,5 (1,65)	7,0	0,174 (1,74)	0,69	13,6

В качестве расчетного принимается большое значение размаха σ_R= 20,84 кгс/мм^2 $\approx$ 208,4 МПа.

Аналогично определяются размахи напряжений для остальных сочетаний характерных точек расчета $б-а$, $г-а$ и др. (см.п.4.7). Значения найденных размахов приведены в табл.8 для пусков из холодного состояния и в табл.9 - для пусков из горячего состояния.

Таблица 9

Точка интервала (см.п.4.7)		$C=\frac{E_в}{E_н}$	$\sigma_и^р$ МПа (кгс/мм^2)	$\sigma_R^х$ МПа (кгс/мм^2)	$\sigma_{0,2}^в+\sigma_{0,2}^н$, кгс/мм^2 (МПа)
верхняя	нижняя				
б	*а*	0,813	-87,9(-8,79)	208,4(20,84)	25+32=57 (570)
в	*а*	0,813	-87,9(-8,79)	178,7(17,87)	25+32=57 (570)
г	*а*	0,813	-87,9(-8,79(	110,8(11,08)	25+32=57 (570)
в	*б*	1,0	0	18,5(1,85)	25+25=50 (500)
в	*г*	1,0	0	95,3(9,53)	25+25=50 (500)
б	*г*	1,0	0	83,0(8,30)	25+25=50 (500)

Таблица 10

Точка интервала (см.п.4.7)		$C=\frac{E_в}{E_н}$	$\sigma_и^R$ МПа (кгс/мм^2)	$\sigma_R^г$ МПа (кгс/мм^2)	$\sigma_{0,2}^в+\sigma_{0,2}^н$ кгс/мм^2 (МПа)
верхняя	нижняя				
б	*а*	0,837	-66,1(-6,61)	165,8(16,58)	25+32=57 (570)
в	*а*	0,837	-66,1(-6,61)	159,6(15,96)	25+32=57 (570)
г	*а*	0,837	-66,1(-6,61)	131,8(13,18)	25+32=57 (570)
в	*б*	1,0	0	18,5(1,85)	25+25=50 (500)
в	*г*	1,0	0	95,3(9,53)	25+25=50 (500)
б	*г*	1,0	0	83,0(8,30)	25+25=50 (500)

Максимальный размах напряжений σ_R = 20,84 кгс/мм^2 ≈ 208,4 МПа для паропровода со сварным соединением при нулевой скорости прогрева не превышает $\sigma_{0,2}^{20} + \sigma_{0,2}^{540}$ = 57 кгс/мм^2 ≈ 570 МПа

(см.табл.7 и 8). Поэтому металл паропровода работает в упругой области.

Предельное количество циклов (см.п.2.8), соответствующее найденному размаху напряжений, при η = 1, r = -1 и

$$A = \frac{2,3 n_\partial E^t_{мин}}{4\sqrt{n_N}} \lg \frac{100}{100-\psi} = \frac{2,3 \cdot 0,27 \cdot 1,74 \cdot 10^4}{4\sqrt{10}} = \lg \frac{100}{100-36} = 196$$

(для стали 15Х1М1Ф при t_p=540°С и n_N = 10)

$$N_x^{пр} = \left[\frac{A}{\frac{\sigma_R^x}{2\varphi_c} - \sigma_{доп}^x}\right]^2 = \left[\frac{196}{\frac{20,84}{2 \cdot 0,7} - 7,8}\right]^2 = 765;$$

$$N_г^{пр} = \left[\frac{A}{\frac{\sigma_R^г}{2\varphi_c} - \sigma_{доп}^г}\right]^2 = \left[\frac{196}{\frac{16,58}{2 \cdot 0,7} - 7,8}\right]^2 = 2350,$$

φ_c выбран согласно п.2.12.

Проверка наличия решения(см.п.4.8):

$$[N_x = 200] < [N_x^{пр} = 765],$$

$$[N_г = 500] < [N_г^{пр} = 2350],$$

$$\frac{N_x}{N_x^{пр}} + \frac{N_г}{N_г^{пр}} = \frac{200}{765} + \frac{500}{2350} = 0,47 < 1.$$

Расчетное количество циклов принимается равным (см.п.4.7)

$$N_x^* = N_г^* = N_x + N_г = 700.$$

Тогда допустимый размах напряжений равен

$$\sigma_R = 2\varphi_c \left(\frac{A}{\sqrt{N^*_{x,г}}} + \sigma_{доп}\right) = 2 \cdot 0,7 \left(\frac{196}{\sqrt{700}} + 7,8\right) = 21,2 \text{ кгс/мм}^2 \approx$$

≈ 212 МПа.

В соответствии с пп.4.16 и 4.17 находятся допустимые температурные напряжения, а на основании их, согласно формуле п.4.5 - допустимые скорости прогрева паропровода. В качестве характерных точек расчета принимаются температуры и давления, приведенные в табл.6 и 7. Там же приведены исходные величины, необходимые для расчета допустимых температурных напряжений и скоростей прогрева паропровода.

В качестве примера определения допустимых температурных напряжений σ_t и скоростей прогрева V приводится расчет этих величин для нижней точки g_5 по размаху напряжений до верхней точки B (сочетание $B-g_5$).

Для сочетания этих расчетных точек $\sigma_H^R = 0$. Определяющим для внутренней поверхности паропровода является условие (см.п.4.16):

$$(1-\alpha_t)\sigma_R-(\alpha_p-2\alpha_t)\sigma_p^B-(1-2\alpha_t)\cdot 10^{-2}p_B+$$
$$+C\left[(\alpha_p-2\alpha_t)\sigma_p^H+(1-2\alpha_t)\cdot 10^{-2}p_H\right]<0,$$

$$(1-1{,}5)\cdot 21{,}2-(2-2\cdot 1{,}5)\cdot 1{,}65-(1-2\cdot 1{,}5)\times$$
$$\times 10^{-2}\cdot 250+1\left[(2-2\cdot 1{,}5)\,1{,}65+(1-2\cdot 1{,}5)\cdot 10^{-2}\times\right.$$
$$\left.\times 250\right]<0.$$

Следовательно, для расчета допустимых температурных напряжений справедлива формула

$$\sigma_t=\frac{1}{C\alpha_t}\left[\sigma_R-\alpha_p\sigma_p^B-10^{-2}p_B+\alpha_t\sigma_t\right]+\frac{\alpha_p}{\alpha_t}\sigma_p^H+\frac{10^{-2}p_H}{\alpha_t}=$$

$$=\frac{1}{C\alpha_t}\left[\sigma_R-\alpha_p\sigma_p^B-10^{-2}p_B+\frac{\alpha_t\alpha E\Phi_2 s^2(V_B)}{a(1-\mu)}\right]+\frac{\alpha_p}{\alpha_t}\sigma_p^H+\frac{10^{-2}p_H}{\alpha_t}=$$

$$=\frac{1}{1\cdot 1{,}5}\left[21{,}2-2\cdot 1{,}65-2{,}5-1{,}5\cdot 1{,}234\right]+\frac{2}{1{,}5}\cdot 1{,}65+\frac{2{,}5}{1{,}5}=$$

$$=12{,}89\ \text{кгс/мм}^2\approx 128{,}9\ \text{МПа}.$$

Допустимая скорость прогрева, соответствующая этим температурным напряжениям, равна:

$$V=\frac{a(1-\mu)}{\alpha E\Phi_2 s^2}\sigma_t=\frac{0{,}69\cdot 10^{-5}\cdot 60\cdot(1-0{,}3)\cdot 12{,}9\cdot 10^6}{13{,}6\cdot 10^{-6}\cdot 1{,}74\cdot 10^4\cdot 0{,}42\cdot 60^2}=10{,}5^{\circ}\text{C/мин}.$$

Определяющим для наружной поверхности паропровода является условие (см.п.4.I7):

$$(1-\alpha_t)\sigma_R+(\alpha_p-2\alpha_t)\sigma_p^B-C(\alpha_p-2\alpha_t)\sigma_p^H<0,$$

$$(1-1,5)\cdot 21,2+(2-2\cdot 1,5)\cdot 1,65-1(2-2\cdot 1,5)\cdot 1,65<0,$$

которое для расчета допустимых температурных напряжений рекомендует формулу

$$\sigma_t=\frac{1}{C\alpha_t}(\sigma_R+\alpha_p\sigma_p^B+\alpha_t\sigma_t^B)-\frac{\alpha_p\sigma_p^H}{\alpha_t}=\frac{1}{1\cdot 1,5}\cdot(21,2+$$

$$+2\cdot 1,65-1,5\cdot 0,485)-\frac{2\cdot 1,65}{1,5}=13,65\ \text{кгс/мм}^2\approx 136,5\ \text{МПа}.$$

Допустимая скорость прогрева для этих напряжений равна (см.п.4.5.):

$$V=\frac{a(1-\mu)}{\alpha E\Phi_1 s^2}\sigma_t=\frac{0,69\cdot 10^{-5}\cdot 60\cdot(1-0,3)\cdot 13,65\cdot 10^6}{13,6\cdot 10^{-6}\cdot 1,74\cdot 10^4\cdot 0,165\cdot 60^2}=28,14^{\circ}\text{C/мин}.$$

Допустимой скоростью прогрева паропровода со сварным соединением для расчетной точки g_5 является меньшее значение $V=13,65\ ^{\circ}\text{C/мин}$. Рассчитанные таким путем допустимые температурные напряжения и скорости прогрева для рассматриваемого паропровода приведены в табл.11,12.

В качестве допустимых для каждой из расчетных точек g_1-g_5 выбираются значения скоростей, соответствующие минимальным напряжениям σ_t (см.табл.11,12) для внутренней и отдельно для наружной поверхности.

Резкое падение допустимой скорости прогрева паропровода при пуске из холодного состояния в диапазоне температур выше 450°С объясняется высоким размахом изгибающих моментов напряжений на его наружной поверхности.

Таблица II

Точка интервала		$C=\frac{E_B}{E_H}$	$\sigma_И^R$ МПа (кгс/мм^2) на наружной поверхности	$\sigma_{0,2}^B+\sigma_{0,2}^H$ МПа (кгс/мм^2) (справочные данные)	σ_t МПа (кгс/мм^2)		V °С/мин для минимальных значений σ_t	
верхняя	нижняя				На наружной поверхности (см.п.4.17)	На внутренней поверхности (см.п.4.16)	На наружной поверхности	На внутренней поверхности
g_1	a	I	0	640(64)	I4I(I4,I0)	I4I(I4,I0)	9,78	2,62
$б$	g_1	0,8I3	-87,9(-8,79)	570(57)	56,7(5,67)	35,4(3,54)		
$в$	g_1	0,8I3	-87,9(-8,79)	570(57)	50,8(5,08)	20,2(2,02)		
$г$	g_1	0,8I3	-87,9(-8,79)	570(57)	29,6(2,96)	82,9(8,29)		
g_2	a	0,972	-26,0(-2,60)	640(64)	I05(I0,50)	I23,2(I2,32)	I9,4I	5,5
$б$	g_2	0,837	-66(-6,60)	570(57)	86,3(8,83)	59,5(5,95)		
$в$	g_2	0,837	-66(-6,60)	570(57)	82,5(8,25)	44,7(4,47)		
$г$	g_2	0,837	-66(-6,60)	570(57)	62(6,20)	I05,6(I0,56)		
g_3	a	0,938	-52,I(-5,2I)	640(64)	68,4(6,84)	I04(I0,40)	I8,09	7,99
$б$	g_3	0,866	-42,7(-4,27)	570(57)	II9,4(II,94)	9I,3(9,I3)		
$в$	g_3	0,866	-42,7(-4,27)	570(57)	II3,8(II,38)	76,9(7,69)		
$г$	g_3	0,866	-42,7(-4,27)	570(57)	94(9,40)	I27,8(I2,78)		
g_4	a	0,850	-73,7(-7,37)	640(64)	34,3(3,43)	94,8(9,48)	8,08	8,750
$б$	g_4	0,956	-I7,4(-I,74)	570(57)	I38,8(I3,88)	I07,5(I0,75)		
$в$	g_4	0,956	-I7,4(-I,74)	570(57)	I32,7(I3,27)	94,6(9,46)		
$г$	g_4	0,956	-I7,4(-I,74)	570(57)	II4,8(II,48)	I48(I4,80)		

Окончание таблицы II

Точка интервала		$C=\frac{E_B}{E_H}$	$\sigma_И^R$ МПа (кгс/мм^2) на наружной поверхности	$\sigma_{0,2}^B+\sigma_{0,2}^H$ МПа (кгс/мм^2) (справочные данные)	σ_t МПа (кгс/мм^2)		V °С/мин для минимальных значений σ_t	
верхняя	нижняя				На наружной поверхности (см.п.4.17)	На внутренней поверхности (см.п.4.16)	На наружной поверхности	На внутренней поверхности
g_5	а	0,813	-87,9(-8,79)	570(57)	2,0(0,20)	105(10,50)	0,412	8,580
б	g_5	I	0	500(50)	141(14,10)	141(14,10)		
в	g_5	I	0	500(50)	136,5(13,65)	128,9(12,89)		
г	g_5	I	0	500(50)	119(11,90)	180(18,00)		

Определяющие (минимальные) значения скорости прогрева V: g_1 (0°С) - 2,62; g_2 (150°С) - 5,5; g_3 (300°С) - 7,99; g_4 (450°С) - 8,08; g_5 (500°С) - 0,412.

Таблица I2

Точка интервала		$C=\frac{E_B}{E_H}$	σ_H^R МПа (кгс/мм^2) на наружной поверхности	$\sigma_{0,2}^B$ $\sigma_{0,2}^H$ МПа (кгс/мм^2) (справочные данные)	σ_t МПа (кгс/мм^2)		V °С/мин для минимальных значений σ_t	
верхняя	нижняя				На наружной поверхности (см.п.4.I7)	На внутренней поверхности (см.п.4.I6)	На наружной поверхности	На внутренней поверхности
g_1	a	I	0	640(64)	I4I(I4,I0)	I4I(I4,I0)	I9,95	5,I2
$б$	g_1	0,837	-66(-6,60)	570(57)	90(9,00)	56,4(5,64)		
$в$	g_1	0,837	-66(-6,60)	570(57)	84(8,40)	4I,6(4,I6)		
$г$	g_1	0,837	-66(-6,60)	570(57)	63,7(6,37)	I02,5(I0,25)		
g_2	a	0,966	-26,8(-2,68)	640(64)	I02(I0,20)	I24,9(I2,49)	24,82	7,I5
$б$	g_2	0,866	-42,8(-4,28)	570(57)	II9,2(II,92)	83,2(8,32)		
$в$	g_2	0,866	-42,8(-4,28)	570(57)	II4(II,40)	68,8(6,88)		
$г$	g_2	0,866	-42,8(-4,28)	570(57)	93,8(9,38)	I27,8(I2,78)		
g_3	a	0,875	-50,8(-5,08)	640(64)	64,8(6,48)	II3,2(II,32)	I5,26	8,75
$б$	g_3	0,956	-I7,4(-I,74)	570(57)	I37,8(I3,78)	I07,5(I0,75)		
$в$	g_3	0,956	-I7,4(-I,74)	570(57)	I32,7(I3,27)	94,6(9,46)		
$г$	g_3	0,996	-I7,4(-I,74)	570(57)	II4,8(II,48)	I48(I4,80)		
g_4	a	0,837	-66(-6,6)	570(57)	3I,3(3,I3)	I24,5(I2,45)	6,45	I0,08
$б$	g_4	I,00	0	500(50)	I4I(I4,I0)	I4I(I4,I0)		
$в$	g_4	I,00	0	500(50)	I36,5(I3,65)	I29(I2,90)		
$г$	g_4	I,00	0	500(50)	II9(II,90)	I80(I8,00)		

Определяющие (минимальные) значения V: g_1 (I50°С) - 5,I2; g_2 (300°С) - 7,I5; g_3 (450°С) - 8,75; g_4 (540°С) - 6,45.

4. РАСЧЕТ СКОРОСТИ ПРОГРЕВА ГНУТОГО ОТВОДА ПАРОПРОВОДА

Определяются допустимые скорости прогрева при пусках из холодного и горячего состояний гнутого отвода (гиба) паропровода диаметром 325х60 мм, изготовленного из стали I5XIMIФ и эксплуатируемого при номинальных параметрах пара 540°С, 25 МПа(250 кгс/см^2). На отвод радиусом I370 мм действует изгибающий момент в плоскости гиба $M_И^X$= -22·I0^3 кгс·м(-220Н·м) и $M_И^P$=7·I0^3 кгс·м(70·I0^{3}Н·м). Овальность гиба составляет 6%. Расчетная долговечность гиба τ= =I00000 ч.

Общее число циклов "пуск–останов" принимается равным 700, при этом количество пусков из холодного состояния N_X=200, а из горячего – $N_Г$ =500. Параметры характерных и расчетных точек приведены в табл.I3 и I4.

На первом этапе расчета определяется размах напряжений от давления и внешних нагрузок σ_R для сочетаний характерных точек в соответствии с п.4.I0.

Так, для сочетания точек $\delta-a$

$$\sigma_И^R=-\left|\frac{M_P}{W}-4\,\frac{D_H 10^{-2} p R}{s(D_H-s)}\cdot a_T\cdot 10^{-2}\right|+C\left|\frac{M_И^X}{W}\right|=$$

$$=-\left|\frac{7\cdot I0^6}{2{,}83\cdot I0^6}-\frac{4\cdot 325\cdot I0^{-2}\cdot 250\cdot I370}{60(325-60)}\cdot 6\cdot I0^{-2}\right|+0{,}8I3\left|\frac{22\cdot I0^6}{2{,}83\cdot I0^6}\right|=$$

$$=-I4{,}328+6{,}32=-8{,}0I \text{ кгс/мм}^2=-80{,}I \text{ МПа},$$

$$p_H=\sigma_p^H=0;\qquad p_B=250 \text{ кгс/см}^2=25 \text{ МПа};$$

$$\sigma_p^B=\frac{I0^{-2}\cdot 250}{I{,}585^2-I}=I{,}65 \text{ кгс/мм}^2=I6{,}5 \text{ МПа}.$$

Поэтому для внутренней поверхности гиба на основании определяющего условия (см.п.4.I4)

$$(\gamma_m-\beta_m)\sigma_И^R>\sigma_p^B+10^{-2}p_B=$$

$$=(0{,}3I9-I{,}004)\cdot(-8{,}0I)>I{,}65+2{,}5$$

размах напряжений рассчитывается по формуле $\sigma_R=\sigma_p^B+10^{-2}p_B-\beta_m\sigma_И^R=$

$$=I{,}65+2{,}5+I{,}004\cdot 8{,}0I=I2{,}I9 \text{ кгс/мм}^2=I2I{,}9 \text{ МПа}.$$

Таблица 13

Обозначение точек	t °С	p МПа (кгс/см^2)	V °С/мин	σ_p МПа кгс/мм^2	$M_и \cdot 10^{-5}$ Н·м = кгс·см	$E \cdot 10^{-6}$ МПа (кгс/см^2)	$a \cdot 10^5$ м^2/с	$\alpha \cdot 10^6$ 1/°С
Характерные точки								
a	0	0	0	0	-22,00	0,214 (2,14)	1,10	11,0
$б$	540	25(250)	0	16,5 (1,65)	7,00	0,174 (1,74)	0,69	13,6
$в$	540	25(250)	-1	16,5 (1,65)	7,00	0,174 (1,74)	0,69	13,6
$г$	540	0	0	0	7,00	0,174 (1,74)	0,69	13,6
Расчетные точки								
g_1	0	0	-	0	-22,00	0,214 (2,14)	1,10	11,00
g_2	150	2(20)	-	1,3(0,13)	-13,95	0,208 (2,08)	1,05	11,4
g_3	300	4(40)	-	2,6 (0,26)	-5,89	0,201 (2,01)	0,94	12,5
g_4	450	10(100)	-	6,6 (0,66)	2,17	0,182 (1,82)	0,80	13,2
g_5	540	25(250)	-	16,5 (1,65)	7,00	0,174 (1,74)	0,69	13,6

Таблица I4

Обозначение точек	t °С	p МПа (кгс/см^2)	V °С/мин	σ_p МПа (кгс/мм^2)	$M_и \cdot 10^{-3}$ кгс·см·с/см·м	$E \cdot 10^{-6}$ МПа (кгс/см^2)	$a \cdot 10^5$ м^2/с	$\alpha \cdot 10^6$ 1/°С
Характерные точки								
a	I50	0	0	0	-I3,95	(2,08) 0,208	I,05	II,4
$б$	540	25(250)	0	(I,65) I6,5	7	(I,74) 0,I74	0,69	I3,6
$в$	540	25(250)	-I	(I,65) I6,5	7	(I,74) 0,I74	0,69	I3,6
$г$	540	0	0	0	7	(I,74) 0,I74	0,69	I3,6
Расчетные точки								
g_1	I50	0	-	0	-I3,95	(2,08) 0,208	I,05	II,4
g_2	300	4(40)	-	(0,25) 2,60	-5,89	(2,0I) 0,20I	0,94	I2,5
g_3	450	I0(I00)	-	(0,66) 6,60	2,I7	(I,82) 0,I82	0,80	I3,2
g_4	540	25(250)	-	(I,65) I6,5	7,0	(I,74) 0,I74	0,69	I3,6

Для наружной поверхности (см.п.4.I5) определяющим условием служит неравенство

$$(\gamma_m - \beta_m)\sigma_и^R > \sigma_p^B$$

$(0,3I9-I,004)\cdot(-8,0I) > I,65$.

Поэтому для определения размаха напряжений справедлива формула

$$\sigma_R = \sigma_p^B - \beta_m \sigma_и^R = I,65+I,004\cdot 8,0I = 9,66 \text{ кгс/мм}^2 \approx 96,6 \text{ МПа}.$$

В качестве расчетного принимается бо́льшее значение размаха напряжений σ_R =I2,I9 кгс/мм^2≈I2I,9 МПа.

Аналогично определяются размахи напряжений для остальных сочетаний характерных точек расчета (см.п.4.II). Найденные значения этих размахов приведены в табл.I5 для пусков из холодного состояния и в табл.I6 для пусков из горячего состояния.

Таблица I5

Точка интервала		$C=\frac{E_B}{E_H}$	$\sigma_И^R$ МПа (кгс/мм^2) (см.п.4.5)	σ_R^0 МПа (кгс/мм^2) (см.п.4.I0)	$\sigma_{0,2}^B+\sigma_{0,2}^H$ МПа (кгс/мм^2) (справочные данные)
верхняя	нижняя				
б	*а*	0,8I3	-8I(-8,I)	I2I,9(I2,I9)	620(62)
в	*а*	0,8I3	-8I(-8,I)	I34,3(I3,43)	620(62)
г	*а*	0,8I3	-87,9(-8,79)	88,2(8,82)	620(62)
в	*б*	I,0	0	I2,35(I,235)	600(60)
в	*г*	I,0	-I68(-I6,8)	222,5(22,25)	600(60)
б	*г*	I,0	-I68(-I6,8)	2I0(2I)	600(60)

Определяющее (максимальное) значение в интервале *в-г*

σ_R = 222,5 МПа = 22,25 кгс/мм^2.

Таблица I6

Точка интервала		$C=\frac{E_B}{E_H}$	$\sigma_И^R$ МПа (кгс/мм^2) (см.п.4.5)	σ_R^0 МПа (кгс/мм^2) (см.п.4.I0)	$\sigma_{0,2}^B-\sigma_{0,2}^H$ МПа (кгс/мм^2) (справочные данные)
верхняя	нижняя				
б	*а*	0,837	-I02(-I0,2)	I44(I4,4)	620(62)
в	*а*	0,837	-I02(-I0,2)	I56,4(I5,64)	620(62)
г	*а*	0,837	-66(-6,6)	66,26(6,626)	620(62)
в	*б*	I	0	I2,35(I,235)	600(60)
в	*г*	I	-I68(-I6,8)	222,5(22,25)	600(60)
б	*г*	I	-I68(-I6,8)	2I0(2I)	600(60)

Принимается максимальное значение σ_R= 22,25 кгс/мм^2 = 222,5 МПа.

Максимальное значение размаха напряжений от давления и внешних нагрузок σ_R для обоих циклов составляет 222,5 МПа (22,25кгс/мм^2)

Для определения предельного количества циклов (см.п.2.8), соответствующего найденному максимальному размаху напряжений, предварительно находится значение A по формуле

$$A = \frac{2{,}3\, n_\partial E_t}{4\sqrt{n_N}}\, \ell g \quad \frac{100}{100-\psi},$$

где для рассматриваемого гиба (см.п.2.8)

$$n_\partial = \frac{\ell g(1+\delta_t-\delta)}{\ell g(1+\delta_0^t)} = \frac{\ell g\left[1+\delta_t-0{,}07\,\frac{\tau}{10^5}\left(\frac{\sigma_{экв}}{1{,}5\,\sigma_{доп}}\right)^m\right]}{\ell g(1+\delta_0^t)} =$$

$$= \frac{\ell g\left[1+0{,}07-0{,}07\cdot\frac{10^5}{10^5}\left(\frac{6{,}8}{1{,}5\cdot 7{,}8}\right)^{3{,}5}\right]}{\ell g(1+0{,}235)} = 0{,}271;$$

$\sigma_{экв}$ = 6,8 кгс/мм^2 ≈ 68 МПа в соответствии с [3,4] .

$$A = \frac{2{,}3\cdot 0{,}271\cdot 1{,}74\cdot 10^4}{4\sqrt{10^4}}\, \ell g\, \frac{100}{100-35} = 166{,}2.$$

Тогда предельное количество циклов при η = 1 и r = -1 равно

$$N_{пр}^x = N_{пр}^2 = \left[\frac{A}{\sigma_R-\sigma_{доп}}\right]^2 = \left[\frac{166{,}2}{0{,}5\cdot 22{,}25-7{,}8}\right]^2 = 2498.$$

Следовательно, $N_x < N_{пр}^x$, $N_r < N_{пр}^r$ и

$$\frac{N_x}{N_{пр}^x} + \frac{N_r}{N_{пр}^r} = \frac{200}{2498} + \frac{500}{2498} < 1 \qquad \text{(см.п.4.8).}$$

При $N_x^* = N_r^* = N_x + N_r$ = 700 (см.п.4.9) допустимый размах напряжений равен

$$[\sigma_R] = 2\left(\frac{A}{\sqrt{N_{x,r}^*}} + \sigma_{доп}\right) = 2\left(\frac{166{,}2}{\sqrt{700}} + 7{,}8\right) = 28{,}2 \text{ кгс/мм}^2 = 282\text{МПа}.$$

В соответствии с пп.4.14 и 4.15 находятся допустимые температурные напряжения и по найденным значениям температурных напряжений - допустимые скорости прогрева гиба. В табл.13 и 14 приведены исходные значения, необходимые для расчета допустимых температурных напряжений и скоростей прогрева гиба.

В качестве примера определения допустимых температурных напряжений и скоростей прогрева V приводится расчет этих величин для сочетания нижней расчетной точки g_1 и верхней $в$ по размаху напряжений.

Для сочетания этих расчетных точек $\sigma_и^R$ = -8,1 кгс/мм^2≈-81 МПа. Определяющим для выбора формулы расчета напряжений на внутренней поверхности гиба является условие (см.п.4.14):

$$(\gamma_m-\beta_m)\sigma_и^R > \sigma_p^B + 10^{-2}p_B \quad (\sigma_p^H = p_н = 0),$$

(0,319-1,004)·(-8,1) > 1,65+2,5.

Следовательно, для расчета допустимых температурных напряжений справедлива формула

$$\sigma_t = \frac{1}{C}(\sigma_R - \sigma_p^B - 10^{-2}p_B + \beta_m\sigma_и^R + \sigma_t^B =$$

$$= \frac{1}{C}\left[\sigma_R - \sigma_p^B - 10^2 p_B + \beta_m\sigma_и^R + \frac{\alpha E\Phi_2 s^2}{a(1-\mu)}(-1)\right] =$$

$$= \frac{1}{0,813}(28,2-1,65-2,5-1,004\cdot 8,1-1-1,235) = 18,06 \text{ кгс/мм}^2 \approx 180,6 \text{ МПа}.$$

Допустимая скорость прогрева, соответствующая этим температурным напряжениям, равна (п.4.5):

$$V = \frac{a(1-\mu)}{E\alpha\Phi_2 s^2}\sigma_t = \frac{(1,1\cdot 10\cdot 60)\cdot(1-0,3)\cdot 18,06}{11\cdot 10^{-6}\cdot 2,14\cdot 10^4\cdot 0,42\cdot 60^2} = 23,5^{\circ}\text{C/мин}.$$

Определяющим для наружной поверхности гиба является условие (п.4.15):

$$(\gamma_m-\beta_m)\sigma_и^R > -\sigma_p^B,$$

т.е.

$$(0,319-1,004)\cdot(-8,1) > -1,65,$$

согласно которому допустимые температурные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_t = \frac{1}{C}(\sigma_R + \sigma_p^B + \beta_m\sigma_и^R + \sigma_t^B =$$

$$= \frac{1}{0,813}(28,2+1,65-1,004\cdot 8,1-0,485) = 26,1 \text{ кгс/мм}^2 \approx 261 \text{ МПа}.$$

Допустимая скорость прогрева для этих напряжений равна (п.4.3):

$$V = \frac{a(1-\mu)}{\alpha E\Phi_2 s^2}\sigma_t = \frac{(1,1\cdot 10\cdot 60)\cdot(1-0,3)\cdot 26,1}{11\cdot 10^{-6}\cdot 2,14\cdot 10^5\cdot 0,165\cdot 60^2} = 86,5^{\circ}\text{C/мин}.$$

В качестве допустимой скорости прогрева для расчетной точки принимается меньшее значение, т.е.

$$V = 23,5^{\circ}\text{C/мин}.$$

Рассчитанные таким образом допустимые температурные напряжения и скорости прогрева для гиба приведены в табл.I7,I8. Из-за близких значений размахов напряжений от давления и внешних нагрузок для внутренней и наружной поверхностей определяющими в рассматриваемом примере являются σ_t для внутренней поверхности, поэтому σ_t и V для наружной поверхности в табл.I7 и I8 не представлены.

Таблица I7

Расчетные точки	Минимальное значение σ_t, МПа (кгс/мм^2)	Сочетание, соответствующее минимальному значению σ_t	Допустимая скорость прогрева, ^oC/мин
g_1	I8I,2(I8,I2)	$в - g_1$	23,50
g_2	I67,0(I6,70)	$в - g_2$	20,50
g_3	I5I,9(I5,I9)	$в - g_3$	I5,79
g_4	I64,5(I6,45)	$в - g_4$	I5,2I
g_5	I63,0(I6,30)	$г - g_5$	I3,20

Таблица I8

Расчетные точки	Минимальное значение σ_t, МПа (кгс/мм^2)	Сочетание, соответствующее минимальному значению σ_t	Допустимая скорость прогрева, ^oC/мм
g_1	I50,3(I5,03)	$в - g_1$	I8,49
g_2	I5I,9(I5,I9)	$в - g_2$	I5,79
g_3	I64,5(I6,45)	$в - g_3$	I5,2I
g_4	I63,0(I6,30)	$г - g_4$	I3,20

Список использованной литературы

I. Водно-химические режимы и надежность металла энергоблоков мощностью 500 и 800 МВт. М.: Энергоиздат, 1981.

2. Котлы стационарные паровые и водогрейные и трубопроводы пара и горячей воды. Нормы расчета на прочность. ОСТ 108.031.02-75.

3. Нахалов В.А., Брагина В.И., Слободчикова Н.И. Изменение формы сечения при ползучести изогнутых труб, нагруженных внутренним давлением. - Проблемы прочности, 1977, № 3.

4. Нахалов В.А. Расчетные оценки длительной прочности изогнутых труб, нагруженных внутренним давлением. - Теплоэнергетика, 1978, № 8.

5. Махутов Н.А. Концентрация напряжений и деформаций в упругопластической области деталей. - Машиноведение, 1971, № 6.

6. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. "Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность". М.: Машиностроение, 1975.

7. Нормы американского общества инженеров-механиков. М.: Центральный НИИ информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике, 1974.

8. Ищенко И.И., Зеленский В.Г., Погребняк А.Д., Сорокин Л.С. и др. Сопротивление усталости жаропрочных сталей 12Х1МФ, 15Х1М1Ф и 1Х18Н12Т при нормальной и повышенных температурах. - Проблемы прочности, 1976, № 10.

9. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977.

10. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. М.: Металлургия, 1973.

11. Марочник стали и сплавов. М.: ЦНИИТмаш, 1971.

12. РТМ 108.021.103-76. Турбины паровые стационарные. Расчет на малоцикловую усталость деталей паровых стационарных турбин.

13. РТМ 24.038.11-72. Расчет прочности трубопроводов для нестационарных температурных режимов.

14. Вигак В.М., Фальковский С.В., Горешник А.Д., Мащенко Б.В. Допустимые температурные напряжения и скорости прогрева (расхолаживания) паропроводов. М.: Энергия, 1975.

Ответственный редактор Н.К.Демурова
Литературный редактор М.Г.Полоновская
Технический редактор Н.Т.Леонтьева
Корректор Л.Ф.Петрухина

Л 85201	Подписано к печати 08.02.83	Формат 60x84 1/16
Печ.л. 5,25	(усл.печ.л.4,88) Уч.-изд.л.4,9	Тираж 1400 экз.
Заказ № 37/83	Издат. № 188/81	Цена 74 коп.

Производственная служба передового опыта и информации Союзтехэнерго
105023, Москва, Семеновский пер., д. 15

Участок оперативной полиграфии СПО Союзтехэнерго
117292,Москва,ул.Ивана Бабушкина,д.23,корп.2

gost.e-ecolog.ru