

МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ

АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРОЙНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

© 2022 г. **Е. Р. Плоткин^а**, **Т. С. Конторович^{а, *}**

^а*Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт,
ул. Автозаводская, д. 14, Москва, 115280 Россия*

**e-mail: kontorovich_ts@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 21.02.2022 г.

Принята к публикации 24.02.2022 г.

Концентрация температурных напряжений является одним из основных факторов, приводящих к снижению термической прочности в условиях циклического нагружения. Она характеризуется коэффициентом концентрации напряжений K_t , значение которого может быть определено аналитическими или численными методами, а также экспериментально. В современных нормативных документах указываются различные значения коэффициента концентрации температурных напряжений. Представлены результаты исследований, выполненных в рамках работ по обоснованию термической и циклической прочности. Проведено их сравнение с данными действующих нормативных документов на примере типовых выходных коллекторов пароперегревателей котлов-утилизаторов современных парогазовых установок (ПГУ). Получены формулы, позволяющие рассчитать коэффициент концентрации в тройниковом соединении по известным соотношениям размеров и параметрам эксплуатационного режима и обосновать режимы эксплуатации котлов-утилизаторов. Показано, что учет ряда факторов, определяющих интенсивность теплообмена в тройниковых соединениях, приводит к снижению коэффициентов концентрации относительно принятого в настоящее время в некоторых нормативных документах значения, равного 2.0, для всех режимов теплообмена и соотношений размеров тройниковых соединений. Снижение значений коэффициента концентрации, заложенного в расчет при конструировании детали, дает возможность уменьшить расход металла, облегчить конструкцию, сэкономить средства на ее изготовление.

Ключевые слова: коэффициент концентрации температурных напряжений, тройниковое соединение, выходные коллекторы пароперегревателей, котел-утилизатор, термическая прочность, геометрические размеры, параметры эксплуатационного режима

DOI: 10.56304/S0040363622080069

Концентрация напряжений вызывает повышение местных напряжений в областях резких изменений формы упругого тела, а также в зонах контакта деталей [1, 2]. Это явление характеризуется теоретическим коэффициентом концентрации напряжений, представляющим собой отношение максимального напряжения в области концентратора к номинальному напряжению, вычисленному в предположении его отсутствия. Определение коэффициента концентрации производится аналитическими или численными методами (например, методом конечных элементов) и экспериментально (для механических напряжений – с помощью методов фотоупругости, для температурных напряжений – методами электро- и гидромоделирования). Современные конечно-элементные комплексы позволяют с высокой точностью определять коэффициенты концентрации для концентраторов весьма малых размеров.

Анализу коэффициентов концентрации механических напряжений посвящено большое число теоретических и экспериментальных ра-

Таблица 1. Коэффициенты концентрации температурных напряжений

Типоразмер, мм		Источник	
основной цилиндр	штуцер	[5]	ВТИ
465.0 × 22	38 × 3.0	1.736	1.405
426.0 × 34	38 × 3.0	1.707	1.425
325.0 × 25	108 × 12.5	1.266	1.205
273.0 × 20	38 × 3.0	1.586	1.450
406.4 × 51	38 × 3.0	1.683	1.435
273.0 × 30	28 × 4.0	1.682	1.530
426.0 × 36	38 × 3.5	1.710	1.425
219.0 × 20	108 × 10.0	1.063	1.100

Примечание. В [3, 4] приведено значение $K_t = 2.0$.

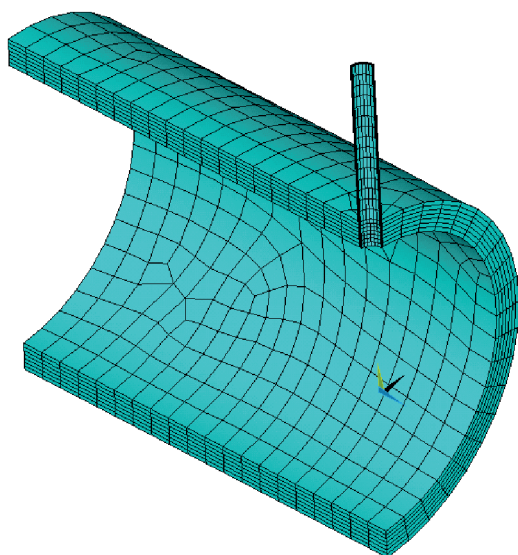


Рис. 1. Расчетная модель взаимного пересечения цилиндров разных диаметров

бот [1, 2]. Гораздо меньше внимания в литературе уделяется коэффициентам концентрации температурных напряжений. В то же время при проведении расчета на малоцикловую термическую усталость одним из главных вопросов является обоснованный выбор теоретического коэффициента концентрации температурных напряжений. Далее приведены результаты численного анализа коэффициентов концентрации в широко распространенных конструкциях, представляющих собой взаимное пересечение двух полых цилиндров разных диаметров. К таким конструкциям относятся коллекторы, тройники, всевозможные патрубки и т.д.

В нормативных документах и других литературных источниках представлены различные эмпирические значения и расчетные формулы для оценки коэффициента концентрации температурных напряжений. В [3] предлагается принимать коэффициент концентрации окружных и осевых напряжений в соответствии с температурным перепадом по толщине стенки для цилиндрических и сферических деталей $K_t = 2.0$. В [4] рекомендуется принимать K_t равным 2.0 для цилиндрических деталей и 1.5 для сферических, а в [5] приводится для расчета K_t формула, учитывающая средние диаметры корпуса d_{ms} и присоединяемого элемента d_{mb} , а также коэффициенты теплоотдачи воды и пара:

$$K_t = \left\langle \left[2 - \frac{\alpha + 2700}{\alpha + 1700} Z + \frac{\alpha}{\alpha + 1700} [\exp(-7Z) - 1] \right]^2 + 0.81Z^2 \right\rangle^{1/2},$$

где $Z = d_{mb}/d_{ms}$; α – коэффициент теплоотдачи; для пара он составляет $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, для воды $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Результаты расчета по этой формуле для различных коллекторов, применяемых в отечественных парогазовых установках, приведены в табл. 1.

Тот факт, что концентрация температурных напряжений в отверстиях коллекторов и тройниковых соединений может быть существенно ниже, чем рекомендуемое отечественными нормативными документами значение, показали проведенные во Всероссийском теплотехническом институте (ВТИ) расчетно-теоретические исследования патрубков барабанов энергетических котлов [6]. Они были выполнены на моделях, представляющих собой соединение двух труб разных диаметров, которые являются типовыми для патрубков барабанов котлов, коллекторов и тройниковых соединений (рис. 1). В [6] изложены краевые условия и методика расчета K_t тройников при $d/D = 0.80, 0.23$ и 0.49 (здесь d, D – внутренний диаметр патрубка и основной трубы).

Впоследствии эти исследования были продолжены в широком диапазоне значений d/D при различных режимах прогрева. Толщины стенок присоединяемых труб изменялись пропорционально их диаметрам, что характерно для паропроводов, так как основные параметры среды (давление и температура) одинаковы для патрубка и основной конструкции. Рассматривали два типовых режима прогрева: мгновенное изменение температуры среды t на $\Delta t = 100^\circ\text{C}$ – тепловой удар и длительное повышение температуры среды с постоянной скоростью $dt/dt = \text{const}$ (здесь τ – время) – квазистационарный режим. Все расчеты выполняли при различных значениях коэффициента теплоотдачи α от греющей среды к внутренней поверхности паропровода и патрубка. Значения α варьировались в диапазоне $300\text{--}1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, характерном для всех возможных эксплуатационных режимов, включая начальные этапы пуска котла-утилизатора ПГУ.

В реальной (Т-образной) конструкции соединения паропроводов коэффициенты концентрации окружных K_θ и осевых K_z температурных напряжений различны. Их максимальные значения достигаются на линии пересечения внутренних поверхностей основной трубы и патрубка (см. рис. 1). При анализе полученных результатов было выявлено небольшое различие значений коэффициентов концентрации при тепловом ударе и квазистационарном прогреве. Выбранные режимы являются крайними случаями (мгновенный скачок или плавный рост температуры среды), в действительности коэффициент концентрации напряжений рассматривают в интервале между ними.

Значения коэффициентов концентрации существенно зависят от интенсивности теплообме-

на, характеризующейся критерием Био Bi . Они близки к 2.0 при низких значениях критерия Bi и быстро снижаются при его увеличении. При интенсивном теплообмене ($Bi \geq 10$) значения K_θ и K_z не превышают 1.5. В области относительно невысокой интенсивности теплообмена ($Bi < 2$), где коэффициент концентрации возрастает, сами значения номинальных температурных напряжений, на которые надо умножить коэффициент концентрации, существенно ниже.

Было оценено влияние d/D для патрубка барабана котла на концентрацию температурных напряжений. На рис. 2 показана зависимость среднего арифметического значения коэффициентов концентрации при тепловом ударе и квазистационарном режиме от d/D . Даже при очень малых значениях критерия Bi ($Bi = 1$) значения K_θ и K_z снижаются от 2.0 при $d/D \approx 0.1$ до 1.35–1.55 при $d/D = 0.5$.

Полученные результаты позволили довольно уверенно экстраполировать функции $K_\theta, K_z = f(d/D)$ на другое соотношение диаметров вплоть до $d/D = 1.0$ (равнопроходный тройник).

Зависимость коэффициентов концентрации осевых и окружных температурных напряжений от относительного диаметра имеет полиномиальный характер:

$$K_z, K_\theta = \sum_{i=0}^n A_i \left(\frac{d}{D}\right)^i,$$

где A_i – коэффициент полинома; i – порядок (степень) члена полинома; для разных расчетных вариантов $n = 2-5$.

Значения коэффициентов полиномов при различных критериях Bi приведены в табл. 2.

При средних и больших значениях коэффициента теплоотдачи ($Bi \geq 3$) и $d/D > 0.4$ значения коэффициентов концентрации температурных напряжений, как окружных, так и осевых, практически не превышают 1.4.

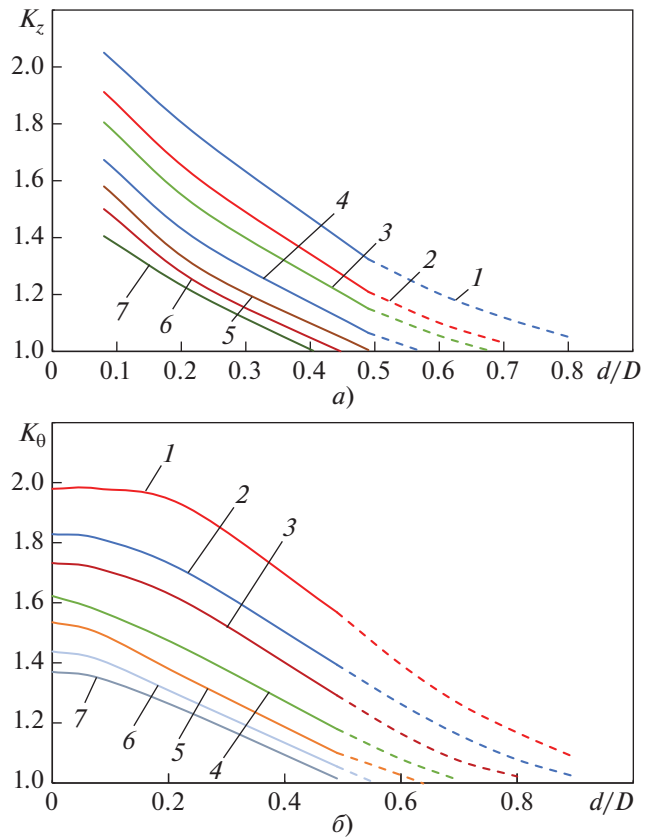


Рис. 2. Зависимость среднего арифметического значения коэффициентов концентрации температурных напряжений в осевом (а) и окружном (б) направлениях от d/D . Bi : 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 5; 5 – 7; 6 – 10; 7 – 15

ВЫВОДЫ

1. Коэффициент концентрации температурных напряжений тройниковых соединений определяется соотношением внутренних диаметров патрубка и основной трубы и зависит от интенсивно-

Таблица 2. Коэффициенты полиномов, описывающих зависимость $K_\theta, K_z = f(d/D)$ для Т-образных соединений

Коэффициент концентрации	i	Критерий Bi						
		1	2	3	5	7	10	15
K_z	4	-2.3103	–	–	–	–	–	–
	3	4.3309	–	-0.7405	-0.9955	–	–	–
	2	-1.5060	1.3864	2.2713	2.5031	2.0419	1.6823	0.7411
	1	-1.8250	-2.5033	-2.6804	-2.6253	-2.5663	-2.2882	-1.6297
	0	2.2035	2.1031	2.0053	1.8675	1.7720	1.6723	1.5306
K_θ	5	-8.8912	–	–	–	–	–	–
	4	19.9350	-0.9085	–	–	-6.0695	-7.8010	–
	3	-12.9530	3.3966	2.2923	1.3734	9.8668	10.8120	3.6314
	2	0.8785	-3.3908	-2.9201	-1.5036	-4.9676	-5.0173	-0.32272
	1	0.0076	0.0654	-0.0191	-0.4974	-0.1086	-0.0013	-0.0151
	0	1.9795	1.8286	1.7324	1.6227	1.5352	1.4380	1.37

сти теплообмена греющей (охлаждающей) среды с поверхностью металла, скорости изменения температуры среды и направления потока тепла.

2. Приводимые в большинстве нормативных документов значения коэффициента концентрации температурных напряжений, равные 2.0, являются максимальными и относятся к условиям теплообмена с низкими коэффициентами теплоотдачи, когда сами значения номинальных напряжений невелики. При средних и высоких коэффициентах теплоотдачи значения коэффициентов концентрации в осевом и окружном направлениях не превышают 1.4 при соотношении внутренних диаметров патрубка и основной трубы более 0.4.

3. Единственным нормативным документом, в котором приводятся значения коэффициентов концентрации температурных напряжений, меньшие 2, является европейский стандарт DIN EN 12952-3-2012 “Water-tube boilers and auxiliary installations. Part 3: Design and calculation for pressure parts of the boiler”, в котором не учитываются влияние режима прогрева и разница зна-

чений коэффициентов концентрации в осевом и окружном направлениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нейбер Г.** Концентрация напряжений. М.; Л.: Гостехиздат, 1947.
2. **Петерсон Р.** Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчета конструктивных элементов на прочность. М.: Мир, 1977.
3. **CS 27.040** Technische Regeln für Dampfkessel TRD 301 Anlage 1 Berechnung auf Wechselbeanspruchung durch schwelenden Innendruck bzw. durch kombinierte Innendruck und Temperaturänderungen. Köln: Heymanns, 1975.
4. **РД 10-249-98.** Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. М.: Госгортехнадзор России, 2004.
5. **DS/EN 12952-3.** Water-tube boilers and auxiliary installations. Part 3: Design and calculation for pressure parts of the boiler. Dansk: Standardiseringsrad, 2012.
6. **Плоткин Е.Р., Зингер М.Н.** Концентрация температурных напряжений в патрубках барабанов энергетических котлов // Теплоэнергетика. 1997. № 2. С. 69–73.

Analysis of the Thermal Stress Concentration Coefficients in Tee Joints

E. R. Plotkin^a and T. S. Kontorovich^{a, *}

^a All-Russia Thermal Engineering Research Institute, Moscow, 115280 Russia

*e-mail: kontorovich_ts@mail.ru

Abstract—The concentration of thermal stresses is one of the main factors leading to a decrease in thermal strength under cyclic loading conditions. It is characterized by the stress concentration factor K_t , the value of which can be determined by analytical or numerical methods as well as experimentally. In modern regulatory documents, various values of the thermal stress concentration coefficient are indicated. The results of studies carried out as part of the work on the justification of thermal and cyclic strength are presented. Their comparison with the data of current regulatory documents is given on the example of typical outlet collectors of superheaters for waste heat boilers of modern combined cycle gas turbines (CCGT). Formulas have been obtained that make it possible to calculate the concentration coefficient in a tee connection according to the known size ratios and parameters of the operating mode and to substantiate the operation modes of waste heat boilers. It is shown that taking into account a number of factors that determine the intensity of heat transfer in tee joints leads to a decrease in the concentration coefficients relative to the value of 2.0 currently accepted in some regulatory documents for all heat-transfer modes and ratios of the tee joints' dimensions. Reducing the values of the concentration factor included in the calculation when designing a part makes it possible to reduce metal consumption, lighten the design, and save money on its manufacture.

Keywords: thermal stress concentration factor, tee connection, superheater outlet manifolds, waste heat boiler, thermal strength, geometric dimensions, operating mode parameters