УДК 621

# ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОТЛОВ КРАСНОДАРСКОЙ ТЭЦ

# DURABILITY OF BOILER ELEMENTS IN KRASNODAR THERMAL POWER PLANT

**Пахомов Роман Анатольевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры
теплоэнергетики и теплотехники,
Кубанский государственный
технологический университет
rapakhomoff@mail.ru

**Андрейко Наталья Геннадьевна**
кандидат технических наук, доцент кафедры
теплоэнергетики и теплотехники,
Кубанский государственный
технологический университет

**Самородов Александр Валерьевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры
электротехники и электрических машин,
Кубанский государственный
технологический университет

**Середа Полина Витальевна**
кандидат филологических наук, доцент кафедры
научно-технического перевода,
Кубанский государственный
технологический университет

**Аннотация.** В статье приведена методика оценки долговечности элементов котлоагрегатов на примере котлов Краснодарской ТЭЦ.

Переход испарительного участка прямоточного парогенератора к перегревательному характеризуется наиболее сложными процессами гидродинамики и теплообмена. В этой зоне происходит изменение характера потока – переход от двухфазного состояния к однофазному. При этом структура двухфазного потока (по причине неустойчивости гидродинамики) претерпевает изменения: поток может иметь разную структуру.

Для расчета используются результаты экспериментальных исследований температурного режима входного участка пароперегревательного канала (ППК) с предвключенным необогреваемым участком при наличии малой влажности в насыщенном паре на входе $y_0$ = 1,3 % при давлении P = 6,9 МПа, удельных массовых расходах: ρw = 1150 кг/м$^2$с и плотности теплового потока q = 0,49 МВт/м$^2$. Движение пара в вертикально расположенном рабочем участке – восходящее. Эксперименты проводились на прямоточном пароводяном стенде, питание которого водой и паром осуществлялось от парогенератора высокого давления.

Особое влияние на долговечность конструкции при колебаниях температуры оказывает коррозия.

Самый надежный метод определения долговечности при пульсациях температур – ресурсные испытания в натурных условиях. Однако, применительно к элементам энергооборудования, этот метод практически непригоден, так как при большой стоимости испытаний их результатов пришлось бы ждать несколько лет. В настоящее время используются расчетные оценки ресурса с помощью той или иной модели или проводятся отдельные эксперименты, чаще всего носящие иллюстративный характер, при которых пульсации температур обычно создаются искусственным путем.

**Pakhomov Roman Anatolyevich**
Candidate of technical sciences,
Associate professor power system
and heating engineers,
Kuban state technological university
rapakhomoff@mail.ru

**Andreyko Natalya Gennadyevna**
Candidate of technical sciences,
associate professor power system
and heating engineers,
Kuban state technological university

**Samorodov Alexander Valeryevich**
Candidate of technical sciences,
associate professor electrical equipment
and electrical machines,
Kuban state technological university

**Sereda Polina Vitalyevna**
Candidate of philology,
Associate professor scientific
and technical translation,
Kuban state technological university

**Annotation**. The article contains methodology analysis of elements' durability of boiler units, evidence from Krasnodar thermal power plant (TPP).

The transition of the evaporation section of the direct-flow steam generator to the super heater is characterized by the most complex processes of hydrodynamics and heat transfer. In this zone there is a change in the nature of the flow – the transition from a two-phase state to a single-phase one. In this case, the structure of the two-phase flow (due to hydrodynamics instability) undergoes some changes: the flow can have a different structure.

For the calculation, we use the results of experimental studies of the temperature regime of the inlet section of the steam super heat channel (SSHC) with the pre-activated unheated area with low humidity in the saturated vapor at the inlet of $y_0$ = 1,3 % at a pressure of P = 6.9 MPa, specific mass flow rates are: ρw = 1150 kg / m$^2$s and the heat flux density is q = 0.49 MW / m$^2$. The movement of steam in a vertically located working area is upward. The experiments were carried out on a direct-flow steam-water stand, whose power which supplied by water and steam from a high-pressure steam generator.

Corrosion has a particular effect on the durability of the structure with temperature fluctuations.

The most reliable method to determine longevity under temperature pulsations is resource testing in field conditions. However, with regard to the elements of power equipment, this method is practically unsuitable, since at a high cost of testing their results, we would have to wait for several years. Currently, estimations of the resource are used with a particular model; or individual experiments are conducted, most often they have illustrative nature, where temperature pulsations are usually created artificially.

**Ключевые слова:** котлоагрегаты, котлы, котельные установки, долговечность, пароперегреватели, двухфазные потоки, выносливость, пульсации температур.

**Keywords:** boiler units, boilers, boiler installations, durability, steam boilers, two-phase flows, stability, pulsation of temperatures

Зона перехода от испарительного участка прямоточного парогенератора к перегревательному характеризуется наиболее сложными процессами гидродинамики и теплообмена. В этой зоне происходит изменение характера потока – переход от двухфазного состояния к однофазному. При этом структура двухфазного потока (по причине неустойчивости гидродинамики) претерпевает изменения: поток может иметь разную структуру – дисперсную, дисперсно-пленочную и др.

В данном параграфе изложена методика расчета нестационарных температур, термических напряжений и долговечности теплопередающей стенки применительно к условиям экспериментов. Кроме того, решается обратная задача – определяется неравновесные локальные значения коэффициентов теплоотдачи. Последнее, позволяет получить некоторые дополнительные представления о механизмах гидродинамики и теплообмена на входных пароперегревательных участках. Решение прямой задачи может быть использовано для расчета подобных процессов в пароперегревателях энергетических парогенераторов.

Для расчета используются результаты экспериментальных исследований температурного режима входного участка пароперегревательного канала (ППК) с предвключенным необогреваемым участком при наличии малой влажности в насыщенном паре на входе $y_0$ = 1,3 % при давлении P = 6,9 МПа, удельных массовых расходах: ρw = 1150 кг/м$^2$с и плотности теплового потока q = 0,49 МВт/м$^2$. Движение пара в вертикально расположенном рабочем участке – восходящее. Эксперименты проводились на прямоточном пароводяном стенде, питание которого водой и паром осуществлялось от парогенератора высокого давления.

Рабочий участок был выполнен из трубы (нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, диаметром 15×1 мм). Он представлял собой сборку из предвключенного необогреваемого участка (длиной 2,5 м), на котором происходила гидродинамическая стабилизация потока пара, и равномерно обогреваемого участка ППК (длиной 0,15 м). Обогрев производился переменным током промышленной частоты, пропускаемым по стенке трубы.

На входе предвключенного участка устанавливается толщиномер для определения толщины жидкой пленки и регистрации режима ее течения по стенке канала. Для измерения температур стенки обогреваемого участка к его наружной поверхности вдоль образующей приваривались пять хромель-капелевых термопар на расстоянии 21, 33, 35, 46 и 70 мм от входа. При указанных параметрах влажного пара ($y_0$; $\sigma_w$ ; P; q) осциллограф фиксировал периодические низко частотные пульсации температур входного участка ППК.

Представленные пульсации являются следствием образования на необогреваемой поверхности предвключенного участка тонкой ламинарно-волновой жидкой пленки и ее натекания на обогреваемую поверхность канала. При этом, в связи с образованием на поверхности «сухих» пятен между гребнями волн и последующим их смачиванием происходит чередование режимов теплоотдачи. Кроме температурных пульсаций, в зоне высыхания пленок происходит хлорирование внутренней поверхности, что также уменьшает ресурс ППК.

Для определения причины преждевременного повреждения пароперегревательных каналов из аустенитной стали определим напряжения и долговечность при пульсациях температур стенки.

Обычно пульсации температур в энергооборудовании имеют сравнительно небольшую амплитуду и высокую частоту, при которой число циклов теплосмен за время службы соизмеримо с базой обычных испытаний на усталость или превышает эту базу. В этих условиях можно считать процесс изотерическим и не делать различия между термоусталостью и изотермической усталостью [6,].

Как и при механической усталости, на долговечности скажутся размеры элементов, наличие концентраторов напряжений, качество обработки поверхности, температура, коррозия и прочие технологические факторы.

Особенно большое влияние на долговечность конструкции при колебаниях температуры оказывает коррозия, так как при этом на поверхности образуется мелкая сетка трещин, которые повреждают наружный слой металла и являются концентраторами напряжений.

Естественно, что совместное действие переменных напряжений и коррозии приводит к значительно более быстрому разрушению металла, чем раздельное их действие, так как эти процессы усиливают друг друга. Усталость такого рода выделена в самостоятельное понятие, называемое коррозионной усталостью.

Установлена связь между локальными пульсациями температур и процессом язвенной коррозии. Эксперименты показали неустойчивость оксидной пленки при колебаниях температуры ± 50 К и фазовом изменении среды. Сделан вывод, что коррозия вызывается теплое менами, приводящими к разрушению оксидной пленки. При снижении амплитуды колебания температуры до 25–30 К коррозию удается предотвратить.

К основным факторам, определяющим коррозионную усталость, относят: активность коррозионной среды, уровень действующих циклических напряжений; прочность и коррозийная стойкость металла; число циклов в единицу времени.

Безусловно самый надежный метод определения долговечности при пульсациях температур- ресурсные испытания в натурных условиях. Однако применительно к элементам энергооборудования, рассчитанного на длительную эксплуатацию, этот метод практически непригоден, так как при большой стоимости таких испытаний их результатов пришлось бы ждать несколько лет. Поэтому в настоящее время в основном используются расчетные оценки ресурса с помощью той или иной модели или проводятся отдельные эксперименты, чаще всего носящие иллюстративный характер, при которых пульсации температур обычно создаются искусственным путем.

Для оценки долговечности при пульсациях температур необходимо располагать установленными характеристиками материала и данными о пульсациях температурных напряжений. Воспользуемся показателями первой термопары – кривая 1. Выбор кривой 1 для оценки долговечности обусловлен наличием у нее максимальных амплитуды и частоты пульсаций температуры по сравнению с другими кривыми. Очевидно, ресурс для первой кривой наименьший и оценка долговечности, таким образом, будет произведена по самому опасному температурному режиму.

По полученным параметрам пульсаций напряжений на входных участках пароперегревателей Краснодарской ТЭЦ для оценки долговечности определим интенсивность пульсаций напряжений:

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{\Delta\sigma^2}{2}}, \qquad (1)$$

где $\Delta\sigma$- размах колебаний напряжений.

Для котла ТП-15:

$$\Delta\sigma = \frac{8{,}1-(-7)}{2} = 7{,}55\ МПа,$$

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{7{,}55^2}{2}} = 5{,}33\ МПа.$$

Для котла ТП-9:

$$\Delta\sigma = \frac{14{,}4-(-12{,}5)}{2} = 13{,}5\ МПа,$$

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{13{,}5^2}{2}} = 9{,}5\ МПа.$$

Для котла ПК-19:

$$\Delta\sigma = \frac{10{,}3-(-9{,}0)}{2} = 9{,}7\ МПа,$$

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{9{,}7^2}{2}} = 6{,}9\ МПа.$$

Интенсивность пульсаций температур

$$S_{\square} = \sqrt{\frac{\Delta T}{2}}, \qquad (2)$$

где $\Delta T$- размах колебаний температур.

Для котла ТП-15:

$$\Delta T = \frac{327{,}9-318{,}3}{2} = 4{,}8\ ^\circ C$$

$$S_T = \sqrt{\frac{4{,}8^2}{2}} = 3{,}4\ МПа$$

Для котла ТП-9:

$$\Delta T = \frac{326{,}7-316{,}0}{2} = 5{,}35\ ^\circ C$$

$$S_T = \sqrt{\frac{5{,}35^2}{2}} = 3{,}8\ МПа$$

Для котла ПК-19:

$$\Delta T = \frac{331{,}1 - 310{,}8}{2} = 10{,}15\ ^\circ C$$

$$S_T = \sqrt{\frac{10{,}15^2}{2}} = 7{,}2\ МПа$$

Эффективный период $t_{CT}$ = 5,2 $c$ для всех котлов.

Напряжение от давления, $\sigma_\theta$ МПа

$$\sigma_\theta = \frac{P \cdot r_B^2 \left(1 + \frac{r_H^2}{r^2}\right)}{r_H^2 - r_B^2}, \qquad (3)$$

где $P$ – давление, МПа; $r = \frac{r_B + r_H}{2}$; $r_B$ – внутренний радиус трубки, мм; $r_H$ – наружный радиус трубки, мм.

Напряжения $\sigma_Z$ и $\sigma_\tau$, МПа

$$\sigma_z = \frac{P \cdot r_B^2}{r_H^2 - r_B^2}, \qquad (4)$$

$$\sigma_\tau = \frac{P \cdot r_B^2 \left(1 - \frac{r_H^2}{r^2}\right)}{r_H^2 - r_B^2}. \qquad (5)$$

Для котла ТП-15: Ø 32 × 3,5; $P$ = 10 МПа; $d_H$ = 32 мм; $r_H$ = 16 мм; $d_B$ = 25 мм; $r_B$ = 12,5 мм; $r$ = 14,25 мм,

$$\sigma_\theta = \frac{10 \cdot 12{,}5^2 \left(1 + \frac{16^2}{14{,}25^2}\right)}{16^2 - 12{,}5^2} = 35{,}41\ МПа,$$

$$\sigma_z = \frac{10 \cdot 12{,}5^2}{16^2 - 12{,}5^2} = 15{,}66\ Мпа,$$

$$\sigma_\tau = \frac{10 \cdot 12{,}5^2 \left(1 - \frac{16^2}{14{,}25^2}\right)}{16^2 - 12{,}5^2} = -4{,}08\ МПа.$$

Для котла ТП-9: Ø 38 × 4,5; $P$ = 10 МПа; $d_H$ = 38 мм, $r_H$ = 19 мм, $d_B$ = 29 мм, $r_B$ = 14,5 мм, $r$ = 16,75 мм,

$$\sigma_\theta = \frac{10 \cdot 14{,}5^2 \left(1 + \frac{19^2}{16{,}75^2}\right)}{19^2 - 14{,}5^2} = 31{,}89\ МПа,$$

$$\sigma_z = \frac{10 \cdot 14{,}5^2}{19^2 - 14{,}5^2} = 13{,}95\ МПа,$$

$$\sigma_\tau = \frac{10 \cdot 14{,}5^2 \left(1 - \frac{19^2}{14{,}25^2}\right)}{19^2 - 14{,}5^2} = -4{,}0\ МПа.$$

Для котла ПК-19: Ø 32 × 3,0; $P$ = 9,5 МПа; $d_H$ = 32 мм, $r_H$ = 16 мм, $d_B$ = 29 мм, $r_B$ = 14,5 мм, $r$ = 15,25 мм,

$$\sigma_\theta = \frac{9{,}5 \cdot 14{,}5^2 \left(1 + \frac{16^2}{15{,}25^2}\right)}{16^2 - 14{,}5^2} = 91{,}7\ МПа,$$

$$\sigma_z = \frac{9{,}5 \cdot 14{,}5^2}{16^2 - 14{,}5^2} = 43{,}6\ МПа,$$

$$\sigma_\tau = \frac{9{,}5 \cdot 14{,}5^2 \left(1 - \frac{16^2}{15{,}25^2}\right)}{16^2 - 14{,}5^2} = -4{,}4\ МПа.$$

Напряжения от стационарного перепада температур $\sigma_\theta$, МПа

$$\sigma_\theta = \sigma_\tau = \frac{\alpha \cdot E \cdot \Delta T}{1 - \nu}, \qquad (6)$$
$$\sigma_\tau = 0,$$

где $v$ – коэффициент Пуассона; $\alpha$ – коэффициент теплового расширения, $^\circ C^{-1}$; $E$ – модуль упругости, Па.

Для котла ТП-15: v =0,3; α =12·10$^{-6}$ $^0$C$^{-1}$; E =18·10$^6$ Па;

$$\sigma_\theta = \sigma_z = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 4{,}8}{1 - 0{,}3} = 148{,}1\ МПа\ .$$

Для котла ТП-9: v =0,3; α =14,8·10$^{-6}$ $^0$C$^{-1}$; E =17,7·10$^6$ Па;

$$\sigma_\theta = \sigma_z = \frac{14{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}77 \cdot 10^{-6} \cdot 5{,}35}{1 - 0{,}3} = 200{,}2\ МПа\ .$$

Для котла ПК-19: v =0,3; α =12·10$^{-6}$ $^0$C$^{-1}$; E =18·10$^6$ Па;

$$\sigma_\theta = \sigma_z = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 10{,}15}{1 - 0{,}3} = 313{,}2\ МПа\ .$$

Кривая усталости описывается уравнением

$$N = \begin{cases} N_1 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a}\right)^{m_1} & при \quad \sigma_a \geq \sigma_{-1}\ , \\ \infty & при \quad \sigma_a < \sigma_{-1} \end{cases} \qquad (7)$$

где $N$ - число циклов до разрушения; $N_1$, $m$ - параметры кривой усталости; $\sigma_{-1}$ - предел усталости материала.

В соответствии с (7) $N_1 = 2 \bullet 10^6$; $m_1 = 3$; $\sigma_{-1}$ = 98,1 МПа.
Из графика $\sigma = f(t)$ имеем:

- Приведенное среднее напряжение $\sigma_{ср}$ = 0,8 МПа.
- Для котла ТП-15 – $\sigma_a$ = 7,55 МПа.
- Для котла ТП-9 – $\sigma_a$ = 13,5 МПа.
- Для котла ПК-19 – $\sigma_a$= 9,7 МПа.

При этом [84] для материалов, кривая которых имеет истинный предел выносливости $\sigma_{-1}$ = 98,1 МПа при $\sigma_a < \sigma_{-1}$, разрушений не наблюдается и ресурс должен быть достаточно длительным $N \to \infty$.
Таким образом, изменение температуры стенки не приводит к усталостному разрушению.

**Литература:**

1. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, пароперегревателей, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. – М. : Металлургия, 2010 г.

2. Судаков А.В. Напряжения при пульсациях температур / А.В. Судаков, А.С. Трофимов. – М. : Атомиздат, 1980.

3. Трофимов А.С., Пахомов Р.А., Гапоненко А.М., Андрейко Н.Г. Долговечность пароперегревателей паровых котлов при пульсациях температур // Молодые ученые России – теплоэнергетике : Материалы межрегиональной конф. – Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ), 2001. – С. 152–154.

4. Трофимов А.С., Пахомов Р.А., Андрейко Н.Г., Дунаев В.И. Теплообмен при досыхании пленки конденсата на входном участке пароперегревателя : Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. – Рыбинск, 2003. – Т. 1. – С. 328–330.

5. Пахомов Р.А., Андрейко Н.Г., Шипулина А.А. Теплотехническая работоспособность теплоэнергетических установок // материалы 7 международной научной конференции «ТТС-15». ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. А.К. Серова. – Краснодар, 2015. – С. 268–273.

6. Трофимов А.С., Пахомов Р.А., Андрейко Н.Г., Судаков А.В. Пульсации температур и теплоотдача в пароперегревателях котлоагрегатов // 4 Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике. – Москва, 2003. С. – 762–763.

**References:**

1. Norms of calculation on durability of elements of reactors, boiler superheaters, vessels and pipelines of nuclear power plants, skilled and research nuclear reactors and installations. – M. : Metallurgy, 2010.

2. Sudakov A.V. Tension at pulsations of temperatures / A.V. Sudakov, A.S. Trofimov. – M. : Atomizdat, 1980.

3. Trofimov A.S., Pakhomov R.A., Gaponenko A.M., Andreyko N.G. Dolgovechnost of boiler superheaters of boilers at pulsations of temperatures // Young scientists of Russia – power system : materials interregional conference – Novocherkassk, YuRGTU (NPI), 2001. – P. 152–154.

4. Trofimov A.S., Pakhomov R.A., Andreyko N.G., Dunayev V.I. Heat exchange at a condensate film dosykhaniye on the entrance site of the boiler superheater : Problems of gas dynamics and a heatmass exchange in power stations. – Rybinsk, 2003 – T. 1. – P. 328–330.

5. Pakhomov R.A., Andreyko N.G., Shipulina A.A. Heattechnical operability of heat power installations // materials 7 of the international scientific TTS-15 conference. FGBOU VPO «The Kuban state technological university», Krasnodar highest military aviation college of pilots of A.K. Serov. – Krasnodar, 2015. – P. 268–273.

6. Trofimov A.S., Pakhomov R.A., Andreyko N.G., Sudakov A.V. Pulsations of temperatures and a thermolysis in boiler superheaters of package boilers // 4 All-Russian symposium on applied and industrial mathematics. – Moscow, 2003. – P. 762–763.