

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.22

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА ПГУ

АНКУДИНОВА М.С., ЛАРИН Е.А., САНДАЛОВА Л.А

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*

*Предложена вероятностная модель расчета показателей надежности котла-утилизатора парогазовых установок, выполненных по сложным схемам. В основу методики положен анализ термонапряженного состояния металла поверхностей нагрева и служебных характеристик материалов. Оценка безотказности проведена исходя из условия непревышения действующими напряжениями их предельных значений. Выявлено влияние конструктивных характеристик котла-утилизатора на его безотказность. Методические положения расчета показателей надежности котла-утилизатора ПГУ могут быть использованы при выборе рациональных схем и оптимизации параметров ПГУ.*

*Ключевые слова: парогазовая установка, котел-утилизатор, вероятностная модель, безотказность, аварийность, коэффициент запаса, коэффициент готовности.*

**Введение.** Системная эффективность бинарных парогазовых установок (ПГУ) определяется их термодинамической и топливной эффективностью при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии, показателями надежности и маневренности в соответствии с требованиями энергосистем. Термодинамическое совершенствование циклов ПГУ связано с повышением температуры газа перед газовой турбиной (до 1600–1700°С), начальных параметров пара (вплоть до суперсверхкритических), приближением изобары отвода теплоты в газотурбинном цикле к изобаре подвода теплоты в паротурбинном цикле [1, 2]. Последнее обеспечивается применением котлов-утилизаторов (КУ) с двумя и тремя уровнями давления генерируемого пара. Повышение термодинамической эффективности циклов ПГУ приводит к усложнению тепловых схем установок и обуславливает снижение надежности работы ПГУ в системах теплоэнергоснабжения.

На рис. 1 показаны принципиальная тепловая схема теплофикационной ПГУ с тремя уровнями давления генерируемого пара и  $TQ$ -диаграмма КУ, выполненного по различным схемам. Опыт эксплуатации существующих ПГУ [2, 5] показал, что одним из наиболее уязвимых, с точки зрения безотказности, элементов установки является

© М.С. Анкудинова, Е.А. Ларин, Л.А. Сандалова

*Проблемы энергетики, 2016, № 3-4*

КУ. Это связано со специфическими условиями его эксплуатации (КУ работает в условиях повышенных температур газа и давлений пара, частых пусков и остановов и др.), особенностями генерации пара, в частности, в испарительных поверхностях нагрева, а также его конструктивными особенностями. Все это требует разработки методов расчета показателей надежности КУ и ПГУ в целом.

**Методика исследования.** Управление надежностью при проектировании КУ с целью оптимизации конструктивных, технологических, схемных и эксплуатационных решений требует разработки моделей и методов расчета единичных и комплексных показателей надежности (ПН) его элементов, в основу которых положено математическое описание и сравнение действующих напряжений с их предельными значениями. Широко применяемые детерминированные методы расчета ПН элементов КУ [5, 7], основанные на расчете абсолютных или относительных запасов прочности, не учитывают ряда реальных эксплуатационных факторов. В действительных условиях эксплуатации значения служебных характеристик металла (предел длительной прочности, предел усталости и др.) и действующих (растягивающих, изгибных, кручения, термических и др.) напряжений являются случайными величинами [3, 9]. Поэтому расчет ПН элементов КУ: пароперегревателя высокого, среднего и низкого давления (ППВД, ППСД, ППНД); испарителя высокого, среднего и низкого давления (ИВД, ИСД, ИНД); экономайзера высокого и среднего давления (ЭВД, ЭСД) котла-утилизатора; газового подогревателя конденсата (ГПК); водоводяного теплообменника (ВВТО); конденсатора пара уплотнений (КПУ); эжектора уплотнений (ЭЖ); охладителя конденсата (ОК) – должен базироваться на основе вероятностных методов, позволяющих учесть статистическое рассеяние характеристик прочности и нагруженности с использованием теории случайных величин и случайных функций.

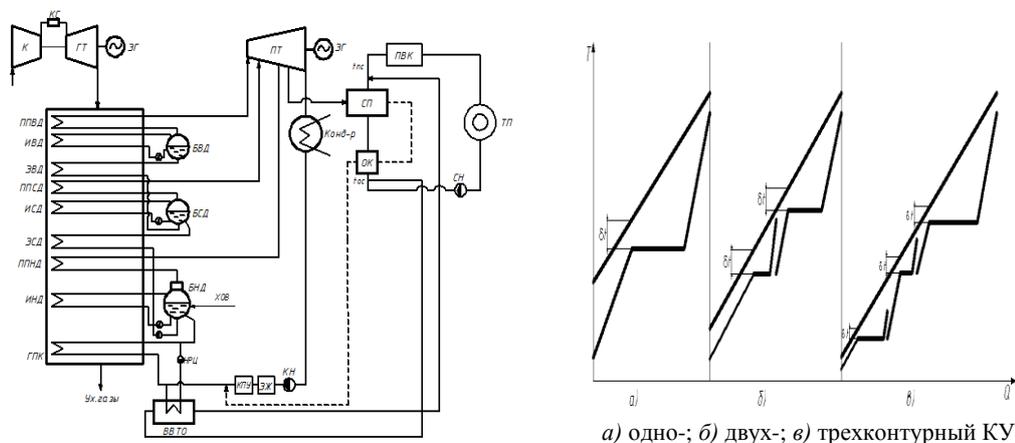


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема теплофикационной ПГУ с трехконтурным КУ и  $TQ$ -диаграммы процесса генерации пара в одно-, двух- и трехконтурном КУ

Надежность КУ парогазовых установок определяется:

- термонапряженным состоянием трубного пучка, температурный режим которого зависит от параметров теплоносителя, конструктивных особенностей КУ, конструкционных материалов, режимов эксплуатации и ряда других факторов;
- в испарительной зоне КУ возникают пульсации температур, вызванные особенностями генерации пара и нестационарностью расходов, давлений и температур теплоносителей. Одним из наиболее опасных, с точки зрения разрушения, является зона кризиса теплообмена КУ на участке, где степень сухости влажного пара

составляет около 0,8. Причиной пульсаций температуры стенки труб КУ является изменение локальных коэффициентов теплоотдачи в зоне кризиса теплообмена из-за высыхания микроплёнки жидкости на внутренней образующей труб испарительной части. Пульсации температур вызывают соответствующие пульсации термических напряжений, которые, суммируясь со стационарными напряжениями, снижают надежность КУ.

В соответствии с феноменологическим подходом к расчету надежности КУ [3] в основу вероятностной математической модели расчета безотказности элементов КУ положено следующее:

- КУ делится на зоны, каждая из которых вносит свой вклад в вероятность отказа. При этом экономайзерная зона содержит четыре участка, испарительная имеет участки развитого кипения и ухудшенного теплообмена, пароперегревательная зона разделена на два участка;

- действующие напряжения являются случайными величинами, разброс значений которых относительно математического ожидания определяется глобальными и локальными факторами. Глобальные неопределённости характерны для всех зон КУ. Локальные неопределённости статистически независимы, поэтому для получения общего закона распределения случайной величины напряжений используются свёртки дифференциальных функций распределения;

- служебные характеристики применяемых материалов являются случайными величинами, распределенными по какому-либо вероятностному закону;

- оценка безотказности проводится из условия определения вероятности превышения действующих напряжений над допустимыми значениями на каждом расчётном участке.

Под безотказностью следует понимать вероятность превышения величиной нагружения  $X(t) = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_j, t\}$  величины предела прочности

$Y(t) = \{y_1, \dots, y_i, \dots, y_j, t\}$ , то есть попадания случайной функции работоспособности

(ФР)  $Z(t) = X(t) - Y(t)$  в область отрицательных значений. Значения аргументов функции

$X(t)$  и  $Y(t)$  в общем случае определяются их номинальными значениями  $x_i^H$  и  $y_j^H$ . Если

в КУ выделено  $m(m \in 1, \hat{m})$  зон, а безотказность каждой из них характеризуется  $n(n \in 1, \hat{n})$  ФР, то условие безотказности запишется в виде

$$Z_{n,m}(t) = \{\min[Y_{nk}(t) - X_{nk}(t)]\}_m > 0, m \in 1, \hat{m}; n \in 1, \hat{n}, \quad (1)$$

где  $k$  – количество анализируемых участков выделенных зон КУ.

Таким образом, функция работоспособности  $Z_{n,m}(t)$  является случайной функцией, колеблющейся около некоторого случайного стационарного значения  $Z_{n,m}^{cm}(t)$  с математическим ожиданием  $M(Z_{n,m}^{cm}(t))$  и дисперсией  $D_Z$ , определяемым по формулам:

$$M(Z_{n,m}^{cm}(t)) = M(X_{n,m}(t)) - M(Y_{n,m}(t)), \quad (2)$$

где  $M(X_{n,m}(t))$ ,  $M(Y_{n,m}(t))$  – соответственно математические ожидания величин нагружения и прочности в момент времени  $t$ ;

$$D_Z = S_Z^2 = (S_Z^I)^2 + (S_Z^{\Gamma})^2, \quad (3)$$

где  $S_Z^I$ ,  $S_Z^{\Gamma}$  – средние квадратические отклонения ФР, определяемые [3, 6] по формуле

$$S_Z^{Л(\Gamma)} = \sqrt{\sum_{i=1}^i \left(\frac{\partial Z_{n,m}(t)}{\partial x_i}\right)^2 [S_i^{Л(\Gamma)}]^2 + \sum_{j=1}^j \left(\frac{\partial Z_{n,m}(t)}{\partial y_j}\right)^2 [S_j^{Л(\Gamma)}]^2}, \quad (4)$$

где  $S_i^{Л(\Gamma)}, S_j^{Л(\Gamma)}$  – средние квадратические отклонения аргументов  $x_i$  и  $y_j$  от их номинальных значений  $x_j^H$  и  $y_j^H$ , которые определяются коэффициентами вариации.

Случайные колебания ФР  $Z_{n,m}(t)$  около  $Z_{n,m}^{cm}(t)$  определяются стационарными случайными функциями изменения расхода  $\partial G(t)$ , давления  $\partial P(t)$ , температуры  $\partial T(t)$  и описываются нормальным законом распределения [7]:

$$F\left\{\frac{Z_{n,m}(t)}{Z_{n,m}^{cm}(t)}\right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \tilde{S}_z} \exp\left\{-\frac{(Z_{n,m}(t) - Z_{n,m}^{cm}(t))^2}{2\tilde{S}_z^2}\right\}, \quad (5)$$

где  $\tilde{S}_z^2 = (\tilde{S}_z^{Л})^2 + (\tilde{S}_z^{\Gamma})^2$ ,  $\tilde{S}_z^{Л}$ ,  $\tilde{S}_z^{\Gamma}$  – средние квадратические отклонения ФР  $Z_{n,m}(t)$ , рассчитываемые аналогично (4) [3, 8].

В общем случае, когда несколько ФР определяют безотказность, то есть при  $\hat{n} > 1$ , вероятность безотказной работы запишется в виде

$$P(t) = P\{Z_{n,m}(t) > 0\}_m, m \in 1, \hat{m}. \quad (6)$$

Если ФР  $Z_{n,m}(t)$  независимы, то

$$P(t) = \prod_{m=1}^{\hat{m}} \prod_{n=1}^{\hat{n}} P_{nm}\{Z_{n,m}(t) > 0\}. \quad (7)$$

Величину  $P_{nm}\{Z_{n,m}(t) > 0\}$  определим по формуле [3, 8]

$$P_{nm}\{Z_{n,m}(t) > 0\} = P\{Z_{n,m}^{cm}(t) > 0\} \cdot P_{nm}(t) = P\{Z_{n,m}^{cm}(t) > 0\} \exp\{-v_{n,m}t\}, \quad (8)$$

где величина  $P\{Z_{n,m}^{cm}(t) > 0\}$  характеризует вероятность того, что случайная величина действующего напряжения не превысит допустимых значений за период времени  $t$ , а величина  $P_{nm}(t) = \exp\{-v_{n,m}t\}$  соответствует вероятности отсутствия выброса случайной ФР  $Z_{n,m}(t)$  в отрицательную область значений в течение периода времени  $t$ . Средняя частота выброса ФР  $Z_{n,m}(t)$  в область  $Z_{n,m}(t) < 0$ , в соответствии с [8], равна

$$v_{n,m} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \tilde{S}_z} \cdot S_{nm} \exp\left\{-\frac{[Z_{n,m}(t)]^2}{2\tilde{S}_z^2}\right\}, \quad (9)$$

где  $S_{nm}$  – среднее квадратическое отклонение скорости изменения ФР  $Z_{n,m}(t)$ , определяемое по автокорреляционной функции случайного процесса  $Z_{n,m}(t)$ .

Для расчёта первого сомножителя в формуле (8) представим стационарные напряжения на любом выделенном участке КУ случайной величиной с математическим ожиданием  $M(\sigma)$  и дисперсией  $S_\sigma^2$ . Величина  $M(\sigma)$  определяется перепадом давлений теплоносителей и температур на стенке и рассчитывается [3, 8] по формуле

$$M(\sigma) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_\Gamma - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\Gamma)^2}, \quad (10)$$

где составляющие напряжений от стационарного перепада температур определяются как

$$\sigma_{\Gamma}^1 = 0; \sigma_{\theta}^1 = \sigma_z^1 = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{q r_1}{\lambda} \ln \delta \left( \frac{1}{1-\delta^{-2}} - \frac{1}{2 \ln \delta} \right), \quad (11)$$

а составляющие напряжений, обусловленные давлением теплоносителей, рассчитываются по формулам:

$$\sigma_{\Gamma}'' = -P_1; \sigma_{\theta}'' = \frac{\delta^2 + 1}{\delta^2 - 1} P_1 - \frac{2\delta}{r_1(\delta^2 - 1)} P_2, \quad (12)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $q$  – тепловой поток;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\delta = r_2 / r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_1$  – внешний и внутренний диаметр трубки участка КУ;  $P_1$ ,  $P_2$  – давления теплоносителей.

Дисперсия стационарных напряжений  $S_{\sigma}^2$  определяется коэффициентом вариации  $v_{\sigma} = S_{\sigma} / M(\sigma)$ , значение которого находится в пределах 0,05...0,15 [3, 6].

Вероятность того, что для  $m$ -го участка КУ (опуская индекс  $m$ ) действующие напряжения  $\sigma(t)$  превысят допустимые  $\bar{\sigma}(t)$ , то есть  $Z(t) \geq 0$ , определится как [8]

$$F[\sigma(t) > \bar{\sigma}(t)] = \iint f(\sigma, \bar{\sigma}, t) d\sigma d\bar{\sigma}, \quad (13)$$

где  $f(\sigma, \bar{\sigma}, t)$  – совместная дифференциальная функция распределения вероятностей приведённых напряжений и длительной прочности.

Используя условие работоспособности  $\xi(t) = \sigma(t) - \bar{\sigma}(t) < 0$  для определения областей интегрирования (13), получим

$$P\{\sigma(t) < \bar{\sigma}(t)\} = 1 - F[\xi(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\xi + \bar{\sigma}} f(\sigma, \bar{\sigma}, t) d\sigma d\bar{\sigma}, \quad (14)$$

В случае, если величины  $\sigma$  и  $\bar{\sigma}$  распределены по нормальным законам, решение (14) запишется в виде

$$P\{\sigma < \bar{\sigma}, t\} = 0,5 - \Phi \left[ \frac{M(\sigma(t)) - M(\bar{\sigma}(t))}{\sqrt{S_{\sigma}^2(t) + S_{\bar{\sigma}}^2(t)}} \right], \quad (15)$$

где  $\Phi[\beta]$  – табулированная функция Лапласа;  $M(\sigma(t))$ ,  $M(\bar{\sigma}(t))$ ,  $S_{\sigma}^2(t)$ ,  $S_{\bar{\sigma}}^2(t)$  – соответственно математические ожидания и дисперсии действующих стационарных и предельных напряжений в момент времени  $t$ .

Расчетно-теоретическими исследованиями установлено влияние сочетаний законов распределения случайных величин действующих напряжений и их предельных значений на вероятность отказа (рис. 2). При значениях коэффициентов запаса 1,7–1,8 и более (т.е. на «хвостах распределений» – малых значений вероятностей отказа) значения безотказности при различных сочетаниях законов распределений достаточно близки. При этом наиболее консервативная оценка безотказности соответствует сочетанию нормальных законов распределения.

С использованием разработанных методических положений проведена оценка влияния величины  $K_{\text{зап}}$  и дисперсий случайных величин действующих и предельных напряжений на величину вероятности отказа элемента.

Пользуясь квантилем функции нормального распределения  $u_p$  и коэффициентом запаса, рассчитываемым как  $K_{\text{зап}} = \bar{\sigma}/\sigma$ , получим [3,6]

$$u_p = (1 - K_{\text{зап}}) \left[ (K_{\text{зап}} v_{\sigma} + v_{\bar{\sigma}})^2 + 2K_{\text{зап}} v_{\sigma} v_{\bar{\sigma}} \right], \quad (16)$$

где  $v_{\sigma}$ ,  $v_{\bar{\sigma}}$  – соответственно, коэффициенты вариации действующих напряжений и допустимых значений.

На рис. 3 показано изменение вероятности отказа  $q=(1-P)$  элемента, например, выходного пакета пароперегревателя КУ, в зависимости от величины коэффициента запаса  $K_{\text{зап}}$  и дисперсии действующих напряжений и их предельных значений.

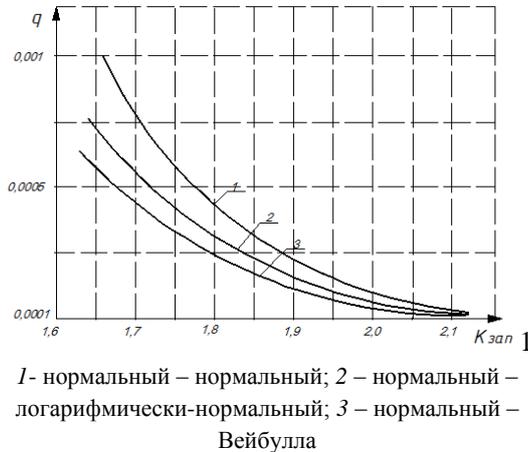


Рис. 2. Влияние коэффициента запаса на вероятность отказа для различных сочетаний законов распределения случайных величин действующих и их предельных значений при  $v=0,1$

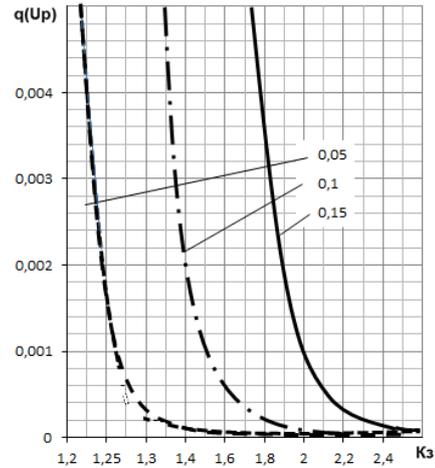


Рис. 3. Влияние коэффициента запаса  $K_{\text{зап}}$  на вероятность отказа элемента

Из рис. 3 следует, что, например, при значении  $K_{\text{зап}} = 1,8$  увеличение величины коэффициента вариации  $v_{\sigma} = S_{\sigma} / M(\sigma)$  от 0,05 до 0,15 приводит к росту величины  $q$  на порядок. Это свидетельствует о необходимости тщательного обоснования величины  $v_{\sigma}$ .

Наряду со стационарными напряжениями трубный пучок испарительной зоны КУ испытывает переменные температурные напряжения [10], обусловленные пульсациями температур. Наибольший размах температурных пульсаций достигается в зоне кризиса кипения (степень сухости влажного пара около 0,8). Максимальное значение температурных пульсаций не превышает значения  $\Delta t_{\text{max}} = t_{\Gamma} - t_s$ , где  $t_{\Gamma}$  – температура греющей среды (продуктов сгорания после газовой турбины ПГУ) в соответствующей зоне КУ;  $t_s$  – температура насыщения. Размах температурных пульсаций определяется условиями теплопередачи и рассчитывается по формуле

$$\Delta t_{\Pi} = \frac{\Delta t_{\text{max}} (\alpha_2^* - \alpha_2) (R_1 + R_{\text{CT}})}{1 + (\alpha_2^* + \alpha_2) (R_1 + R_{\text{CT}}) + \alpha_2^* \alpha_2 (R_1 + R_{\text{CT}})^2}, \quad (17)$$

где  $\alpha_2^*$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи при ухудшенном теплообмене и режиме развитого кипения;  $R_1$ ,  $R_{ст}$  – термические сопротивления теплоотдачи от газа к стенке и стенки.

Так как величина  $\Delta t_{II} < \Delta t_{max}$ , то амплитуда температурных напряжений  $\sigma_a < \sigma_a^{max}$ , значения которых [3, 10] определяются как

$$\sigma_a = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\Delta t_{II}}{2}; \quad \sigma_{max} = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\Delta t_{max}}{2}. \quad (18)$$

Учитывая, что  $0 < \sigma_a < \sigma_a^{max}$ , можно считать, что случайная величина  $\sigma_a$  распределена по усечённому слева закону Рэля [3, 8]:

$$f(\sigma_a) = \frac{\varepsilon \sigma_a}{S_{\sigma_a}^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_a}{S_{\sigma_a}}\right)^2\right], \quad (19)$$

где  $\varepsilon = [1 - \exp(-\sigma_{a,max}^2 / 2S_{\sigma_a}^2)] \sigma_{a,max}$  – параметр усечения, определяемый из условия

нормировки 
$$\int_0^{\sigma_{a,max}} f(\sigma_a) d\sigma_a = 1.$$

Анализ температурных напряжений в испарительной зоне КУ показал, что максимальное значение размаха температурных пульсаций при противотоке значительно выше, чем при прямотоке, что приводит к снижению вероятности безотказной работы рассматриваемой зоны КУ. Поэтому в испарительных поверхностях нагрева КУ целесообразно применять прямоточное движение теплоносителей.

При работе металла труб КУ в условиях циклического изменения действующих температурных напряжений, воздействия коррозии и высоких температур воспользуемся наиболее общим выражением кривой усталости в виде [3,7]

$$N = \begin{cases} N_1(\sigma_{-1}/\sigma_{\Sigma})^{m_1} & \text{при } \sigma_{\Sigma} \geq \sigma_{-1}; \\ N_1(\sigma_{-1}/\sigma_{\Sigma})^{m_2} & \text{при } \sigma_{\Sigma} < \sigma_{-1}, \end{cases} \quad (20)$$

где  $\sigma_{\Sigma}$  – эквивалентная амплитуда напряжений, приведённая к симметричному циклу, вычисляемая по формуле  $\sigma_{\Sigma} = \sigma_a + \psi \bar{\sigma}$ ;  $\psi$  – коэффициент влияния асимметрии цикла на эквивалентную амплитуду напряжений,  $\psi = 0,03 \dots 0,3$  [3,7];  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости;  $N_1$  – база испытаний;  $m_1$ ,  $m_2$  – постоянные показатели степени.

Расчёт на усталость проводится исходя из сравнения эквивалентной амплитуды  $\sigma_{\Sigma}$ , приведенной к симметричному циклу, с пределом выносливости  $\sigma_{-1}$  или путём сравнения рабочих амплитуд напряжений  $\sigma_a$  с предельными значениями. Воспользуемся вторым подходом. При этом предельная амплитуда напряжений определится как  $\sigma_{ад} = \sigma_{-1} + \psi \bar{\sigma}$ . Приняв величины  $\sigma_{-1}$  и  $\bar{\sigma}$  случайными и распределёнными по нормальным законам, параметры распределения предельной амплитуды напряжений определяются как

$$M(\sigma_{ад}) = M(\sigma_{-1}) + \psi M(\bar{\sigma}); \quad S_{\sigma_{ад}} = [S_{\sigma_{-1}}^2 - \psi^2 S_{\bar{\sigma}}^2], \quad (21)$$

где  $M(\sigma_{-1})$ ,  $M(\bar{\sigma})$ ,  $S_{\sigma_{-1}}^2$ ,  $S_{\bar{\sigma}}^2$  – соответственно математические ожидания и дисперсии соответствующих случайных величин.

Расчёт вероятности безотказной работы при циклическом изменении температур и напряжений в зоне кризиса теплообмена испарительной части КУ сводится к определению вероятности непревышения амплитуды температурных напряжений  $\sigma_a$  допустимых значений  $\sigma_{ад}$ . Для получения этой вероятности проинтегрируем плотность вероятности совместной функции распределения случайных величин  $\sigma_a$  и  $\sigma_{ад}$ , по областям их изменения, определяемым неравенствами  $-\infty < \sigma_{ад} < \sigma_{a\max}$  и  $\sigma_{ад} < \sigma_a < \sigma_{a\max}$ :

$$P\{\sigma_a < \sigma_{ад}\} = \int_{-\infty}^{\sigma_{a\max}} f(\sigma_{ад}) \left[ \int_{\sigma_{ад}}^{\sigma_{a\max}} f(\sigma_a) d\sigma_a \right] d\sigma_{ад}. \quad (22)$$

Подставив (21) в (22), принимая законы распределения  $\sigma_{ад}$  и  $\sigma_a$  нормальными, и выполнив интегрирование, после несложных преобразований получим выражение для расчёта вероятности безотказной работы в виде

$$P(\sigma_a < \sigma_{ад}) = \varepsilon \left\{ \exp\left[-0,5 \frac{M(\sigma_{ад})^2 \cdot \delta}{S_{\sigma_{ад}}^2 + S_{\sigma_a}^2} (1 - \delta)\right] S_{\sigma_a} \times \right. \\ \left. \times \Phi\left[\frac{M(\sigma_a) - \delta M(\sigma_{ад})}{S_{\sigma_{ад}} S_{\sigma_a}}\right] - \Phi\left[\frac{M(\sigma_{a\max}) - M(\sigma_{ад})}{S_{\sigma_a}}\right] \right\}, \quad (23)$$

где  $\delta = S_{\sigma_a}^2 / (S_{\sigma_a}^2 + S_{\sigma_{\gamma}}^2)$ .

Учитывая вклад каждой зоны КУ в общую безотказность, вероятность безотказной работы КУ определится как

$$P(t) = \prod_{m=1}^{\hat{m}} \{P(\sigma < \bar{\sigma}, t) P(\sigma_a < \sigma_{ад}, t)\}_m, \quad (24)$$

где  $m$  – количество выделенных зон в КУ.

Разработанный вероятностный подход к расчету безотказности КУ позволяет выявить влияние термодинамических параметров рабочих тел ПГУ и конструктивных характеристик КУ на его показатели надежности.

### Основные результаты

Работоспособность данной методики была апробирована на примере расчета безотказности горизонтального КУ ПГУ мощностью 110 МВт на базе ГТУ *PG6111FA* фирмы *GE* мощностью 77 МВт со следующими характеристиками: степень повышения давления в компрессоре 15,8; расход воздуха через компрессор 203,3 кг/с; температура продуктов сгорания после турбины 600°C. В качестве паровой турбины принята турбина типа Т-25/33-7,6/0,12 ОАО «Калужский турбинный завод» с параметрами свежего пара высокого давления 7,62 МПа и 531 °С. Для определения единичных и комплексных ПН КУ решена задача расчета его конструктивных и компоновочных характеристик с использованием разработанного программного комплекса [9]. При разработке математической модели расчета конструктивных характеристик КУ приняты оребренные поверхности нагрева с высотой ребра 22 мм, шагом ребер 2 мм, диаметром труб экономайзерной зоны 32 мм, испарительной и пароперегревательной

зон – 38 мм с толщиной стенки 3 мм. Экономайзер и испаритель выполнены из Ст.20, пароперегреватель – из стали 12Х1МФ. Результаты расчетов конструктивных характеристик КУ приведены в таблице.

Таблица

Результаты расчета одно-, двух- и трехконтурного горизонтального КУ

Элемент		Средний температурный напор, К	Коэффициент теплопередачи, Вт/м <sup>2</sup> ·К	Тепловая мощность, МВт	Площадь теплообменной поверхности, м <sup>2</sup>	Температурные напряжения (прямоток), МПа	Коэффициент запаса по длительной прочности	R(=2·10 <sup>5</sup> ), ч
<b>Трехконтурный КУ</b>								
ППВД	пр.	104,7	19,87	23,47	11 282	-	1,36	0,9839
	гиб						1,09	0,7481
ИВД	пр.	73,55	22,10	45,58	28 042	42,51	1,72	0,9998
	гиб						1,48	0,9967
ЭВД	пр.	19,63	18,90	9,89	26 679	-	1,47	0,9959
	гиб						1,46	0,9957
ППСД	пр.	11,51	12,37	0,103	724	-	5,85	0,9 <sup>6</sup>
	гиб						5,14	0,9 <sup>5</sup>
ИСД	пр.	19,27	21,74	2,19	5 228	9,84	3,68	0,9 <sup>5</sup>
	гиб						3,18	0,9 <sup>5</sup>
ЭСД	пр.	39,69	20,98	0,388	466		2,40	0,9 <sup>5</sup>
	гиб						2,07	0,9 <sup>5</sup>
ППНД	пр.	53,62	36,34	0,826	424	-	17,12	0,9 <sup>9</sup>
	гиб						15,05	0,9 <sup>9</sup>
ИНД	пр.	38,69	17,22	14,33	21 506	24,8	13,38	0,9 <sup>9</sup>
	гиб						11,56	0,9 <sup>9</sup>
ГПК	пр.	22,44	17,79	16,43	41 654	-	7,49	0,9 <sup>8</sup>
	гиб						6,47	0,9 <sup>8</sup>
Суммарная тепловая мощность и площадь теплообменной поверхности				113,21	136 005			
<b>Двухконтурный КУ</b>								
ППВД	пр.	104,65	19,87	23,5	11 299	-	1,36	0,9839
	гиб						1,09	0,7481
ИВД	пр.	73,5	23,50	45,65	26 406	39,73	1,72	0,9985
	гиб						1,48	0,9967
ЭВД	пр.	31,85	18,90	20,22	33 576	-	1,55	0,9985
	гиб						1,54	0,9984
ППНД	пр.	26,64	35,45	0,478	506	-	17,12	0,9 <sup>9</sup>
	гиб						15,05	0,9 <sup>9</sup>
ИНД	пр.	25,81	17,21	8,29	18 653	16,44	13,38	0,9 <sup>9</sup>
	гиб						11,56	0,9 <sup>9</sup>
ГПК	пр.	18,52	17,75	14,39	43 764	-	7,49	0,9 <sup>8</sup>
	гиб						6,47	0,9 <sup>8</sup>
Суммарная тепловая мощность и площадь теплообменной поверхности				112,53	134 204			

		Одноконтурный КУ						
ПЕ	пр.	106,34	19,87	22,25	10 530	-	1,36	0,9839
	гиб						1,09	0,7481
ИСП	пр.	74,91	23,50	42,61	24 206	40,09	1,47	0,9961
	гиб						1,27	0,9534
ГПК	пр.	27,37	18,90	27,82	53 773	-	6,92	0,9 <sup>8</sup>
	гиб						5,98	0,9 <sup>7</sup>
Суммарная тепловая мощность и площадь теплообменной поверхности				92,68	88 509			

Общая поверхность нагрева трехконтурного КУ представлена 4 типовыми модулями, состоящими из 20 и 18 рядов труб по ходу продуктов сгорания. Модуль 1 состоит из 6 рядов труб ППВД и 14 рядов труб ИВД; модуль 2 состоит из 10 рядов труб ЭВД, 2 рядов труб ППСД, 4 рядов труб ИСД и 2 рядов труб ЭСД; модуль 3 состоит из 2 рядов труб ППНД, 12 рядов труб ИНД и 4 рядов труб ГПК1/1 (ГПК делится на две части); модуль 4 включает в себя 18 рядов труб ГПК 1/2. У двухконтурного КУ поверхность нагрева также включает 4 типовых модуля по 20 и 18 рядов труб по ходу продуктов сгорания. Модуль 1 состоит из 6 рядов труб ППВД и 14 рядов труб ИВД; модуль 2 – из 18 рядов труб ЭВД; модуль 3 – из 2 рядов труб ППНД, 10 рядов труб ИНД и 6 рядов труб ГПК1/1; модуль 4 – из 18 рядов труб ГПК 1/2. Одноконтурный КУ состоит из 2 типовых модулей по 20 и 18 рядов труб по ходу продуктов сгорания. Модуль 1 включает 6 рядов труб ПП и 14 рядов труб ИСП; модуль 2 – 18 рядов труб ЭК. Число параллельных труб в каждом ряду составляет 55.

Разработанные методические положения и результаты конструктивного расчета КУ позволили рассчитать коэффициенты готовности поверхностей нагрева и КУ в целом с учетом действующих напряжений и служебных характеристик материалов. Влияние среднего времени восстановления котла-утилизатора в одно-, двух- и трехконтурных ПГУ на его коэффициент готовности показано на рис. 4.

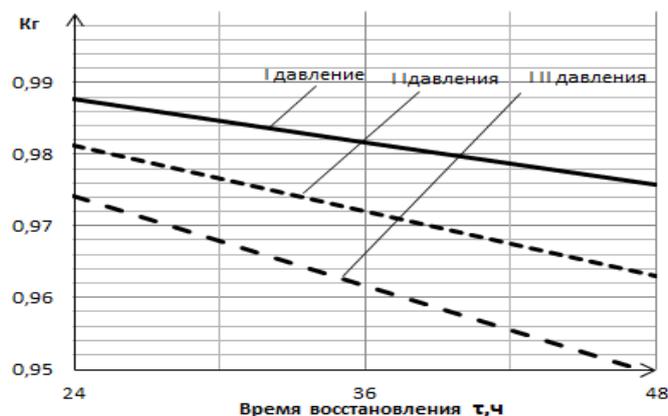


Рис. 4. Зависимость  $K_r$  КУ от времени восстановления

Полученные значения коэффициентов готовности использованы при определении сравнительной эффективности различных схем теплофикационных ПГУ в системах теплоэнергоснабжения [4].

## Заключение

1. Разработаны вероятностная модель и методика расчета безотказности котлов-утилизаторов ПГУ, основанные на вероятностном представлении действующих напряжений и их предельных значений и позволяющая рассчитать комплексные показатели надежности КУ и ПГУ в целом.

2. Установлено определяющее влияние конструктивных характеристик теплообменных поверхностей нагрева и компоновочных решений КУ на их единичные и комплексные показатели надежности. Показано, что применение схем ПГУ с трехконтурным КУ приводит к повышению коэффициента аварийности блока на 0,035–0,051 по сравнению со схемой с одноконтурным КУ. Более рациональной является схема ПГУ с прямоточной схемой движения теплоносителей в испарительной зоне котла-утилизатора.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по НИР №1579 в рамках государственного задания.*

## Summary

***Stochastic calculation model of heat recovery steam generator (HRSG) reliability measures value determination are described in the article. Analysis of metal thermo-stress state of heating surface and analysis of material properties are underlying of method. Failure-free operation is estimated by the non-exceedance condition of working stress over the limit value. Influence of design characteristic of HRSG on failure-free operation is explored in the article. The suggested method is available for parameter optimization of combined cycle gas turbine (CCGT) power plants in Power Supply System and for selecting configuration of CCGT.***

***Key words: combined cycle gas turbine power plant, heat recovery steam generator, stochastic model, reliability measures, failure-free operation, accident rate, assurance coefficient, availability function.***

## Литература

1. Combined Cycle heat recovery optimization / A. Ragaland, W. Stenzel // Proceeding of 2000 International Joint Power Generation Conference, July 23-26 // Miami Beach, Florida. 2000. pp.3–9.
2. Comparison of the combined cycle efficiencies with different heat recovery steam generators / Institute of Fluid-Flow Machinery PAS, Fiszera 14, 80-952 Gdansk, Poland // Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery, 2005. No. 111. pp. 5–16.
3. Анкудинова М.С. Математическая модель и методика расчета безотказности парогенераторов отопительных парогазовых установок / М.С. Анкудинова, Е.А. Ларин, Л.А. Сандалова // Вестник СГТУ. 2012. № 2 (66). С. 152–157.
4. Анкудинова М.С. Сравнительная системная тепловая и топливная эффективность отопительных ПГУ / М.С. Анкудинова, Е.А. Ларин, Л.А. Сандалова // Труды Академэнерго. 2015. № 1. С. 47–56.
5. Богачев А.Ф. Особенности эксплуатации и повреждаемость котлов-утилизаторов бинарных парогазовых установок / Богачев А.Ф., Радин Ю.А., Герасименко О.Б. М.: Энергоатомиздат, 2008. 244 с.
6. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем / В.Г. Китушин. М.: Высшая школа, 1984. 256 с.
7. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени / В.П. Когаев. М.: Машиностроение, 1977. 232с.
8. Теория вероятностей: Учеб. для вузов / Е.С. Вентцель. 10-е изд., стер. М.: Высш.шк., 2006. 575 с.: ил.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014660962. Расчет и выбор котла-утилизатора газотрубного / Дологотовский И.В., Анкудинова М.С. Заявка № 2014617519; Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 20.10.2014.

10. Судаков А.В. Ресурс энергооборудования при пульсациях температур / А.В. Судаков // Надежность и безопасность энергетики. 2008. №2.

*Поступила в редакцию*

*20 февраля 2016 г.*

*Анкудинова Мария Сергеевна* – ассистент Саратовского государственного технического университета (СГТУ) имени Гагарина Ю.А. Тел. 8(8452) 998747; 8(927)1415164. E-mail: Ankudinova1608@gmail.com.

*Ларин Евгений Александрович* – канд. техн. наук, профессор, доцент Саратовского государственного технического университета (СГТУ) имени Гагарина Ю.А. Тел. 8(8452) 998747. E-mail: larin@sstu.ru.

*Сандалова Лидия Александровна* – канд. техн. наук, доцент Саратовского государственного технического университета (СГТУ) имени Гагарина Ю.А. Тел. 8(8452) 998747. E-mail: sand62@yandex.ru.