

**Куприянов А.В., Ламнауэр Н.Ю. (УИПА, г.Харьков, Украина)**

Тел.: +38 (057) 733-78-28; E-mail: [a\\_kupriyanov@bk.ru](mailto:a_kupriyanov@bk.ru)

**Аннотация.** Предложена система контроля, направленная на получение деталей с близкими к оптимальному размерами. Годность размера имеет числовое значение, которое уменьшается от максимального - единицы, по мере отдаления действительного размера от оптимального. Предложен и проверен математический аппарат для аналитического построения функции убыли годности размеров. Показано, как функция плотности распределения годности характеризует технологию изготовления с точки зрения качества.

**Ключевые слова:** качество, размер, контроль, технология.

## 1. Введение

В машиностроении используется допусковый контроль годности размеров. Он подразумевает, что размеры, находящиеся в определенных пределах, называемых допуском, считаются одинаково годными, и их качество не различается. Это плохо по двум причинам. Во-первых, это не соответствует условиям эксплуатации, при которых существует некоторое наилучшее значение размера, которое будем называть оптимальным размером. Во-вторых, это не стимулирует производство изготавливать детали с возможно более узким диапазоном значений действительного размера. В существующей системе единственный путь улучшения качества – это уменьшить допуск размера. Такой кардинальный шаг не всегда оправдан, поскольку систематические и случайные погрешности изготовления не позволяют беспредельно уменьшать допуск.

Предлагается система контроля, в которой размеры имеют не дискретное: 0 или 1, а непрерывное значение годности, уменьшающееся по мере отклонения от оптимального размера. При этом, в зависимости от диапазона значений размера, детали могут быть разделены на сорта, имеющие разное значение годности размеров и разное значение продажной цены. Оплата труда рабочих может быть также дифференцирована, в зависимости от доли изделий каждого сорта. Это позволит стимулировать производство непрерывно улучшать качество, а также расширить сбыт продукции за счет дифференцированного подхода к покупателям с разными финансовыми возможностями.

Использование функции годности размеров и функции плотности распределения годности размеров предложено в [1]. В [2] был показан подход к расчету размерных цепей с гарантированным значением годности замыкающего звена. Однако, в качестве функции годности использовалось сочетание простых функций – парабол и прямой, обобщенного решения не было получено. Кроме того, функции плотности распределения годности строились численными методами, что затрудняет использование предлагаемого подхода широким кругом технологов.

Цель исследования состоит в теоретическом обосновании и проверке формул, позволяющих в общем виде аналитически строить функции убыли годности размеров и плотности распределения годности размеров.

## 2. Основное содержание и результаты работы

### 2.1. Свойства функции убыли годности размеров

Для количественной оценки цены отклонения действительного размера  $x$  от оптимального  $ko$  предлагается использовать функцию убыли годности размеров  $K(x)$ , которая нормирует величину годности размеров на всей числовой оси:

$$K(x) = \begin{cases} 1 - \left( \frac{x - ko}{ei - ko} \right)^{\frac{1}{\beta}}, & x \leq ko, \\ 1 - \left( \frac{x - ko}{es - ko} \right)^{\frac{1}{\beta}}, & x \geq ko, \end{cases} \quad (1)$$

где  $ei$  и  $es$  - предельно допустимые значения размеров с неотрицательной годностью,  $\beta$  - показатель формы убыли годности размеров при отклонении от оптимального размера.

Функция  $K(x)$  имеет следующие свойства:

1.  $K(ko) = 1$ .
2.  $K(ei) = K(es) = 0$ , где  $ei$  и  $es$  могут быть границы стандартного поля допуска.
3. В пределах допустимых значений изменяется в диапазоне  $[0, 1]$ , так, что одному значению функции соответствует два значения аргумента находящихся по разные стороны от  $ko$ .
4. Она отрицательна за пределами допустимых значений.

Чем дальше находится действительный размер от оптимального, в котором значение равно единице, тем меньше годность. Вычитание второго слагаемого

(например,  $\left( \frac{x - ko}{ei - ko} \right)^{\frac{1}{\beta}}$  для левой половины функции) из единицы уменьшает значение функции, от чего функция убыли годности размеров и получила свое название.

Влияние показателя формы убыли годности размеров  $\beta$  на функцию убыли годности размеров проиллюстрируем на примере размера  $\emptyset 90 F8( +0,09_{+0,036} )$ . Имеем соответственно  $ei = 90,036$ ,  $es = 90,09$ . Оптимальный размер пусть будет несколько смещенным относительно середины поля допуска и равен  $ko = 90,055$  мм. Графики функции убыли годности размеров показаны на рис. 1 для случаев  $\beta_1 = 2$ ,  $\beta_2 = 1$ ,  $\beta_3 = 0,5$  и  $\beta_4 = 0,05$ .

Для  $\beta > 1$  даже небольшое отклонение от оптимального размера дает значительное уменьшение годности, а функция убыли годности вогнута. Для  $\beta = 1$  она линейна. Для  $\beta < 1$  функция убыли годности размеров выпукла. При  $\beta \rightarrow 0$  имеем традиционный допусковый контроль, при котором в пределах поля допуска  $[ei, es]$  годность размера  $K(x) = 1$ , за его пределами отрицательна.

Таким образом, при уменьшении  $\beta$  уменьшается цена отклонения от оптимального размера. Практическое значение имеет диапазон  $0 \leq \beta \leq 1$ . При  $0 \leq \beta < 0,25$  функция характеризует известный технологический прием: использование технологического запаса точности, при котором диапазон размеров с оптимальностью  $K(x) = 1$  сужается от допустимых значений  $[ei, es]$  к желательным значениям  $[ki, ks]$  (рис. 1).

Функция убыли годности размеров с заданным  $\beta$  может использоваться для организации оплаты труда по принципу отклонений действительных размеров от оптимального. В этом случае измеряются действительные размеры, и рабочему полагается оплата за каждую изготовленную деталь, пропорциональная значению функции убыли годности  $K(x)$ . При  $K(x) < 0$  оплата отрицательна, т.е. рабочий штрафуется. Этот подход может быть признан целесообразным для ответственных

деталей, ведь при тщательной настройке оборудования рабочие, как правило, могут получать размеры в суженном интервале внутри поля допуска.

Использование функции убыли годности размеров  $K(x)$  позволяет применить подход деления деталей на сорта по критерию близости действительных размеров к оптимальному. В качестве примера на рис. 1 показано разделение размеров детали на два сорта. К сорту I со значением годности  $K > 0,7$  относятся детали с размерами от  $x_{h1}$  до  $x_{g1}$ . К сорту II со значением годности  $0 < K < 0,7$  относятся детали с другими размерами в пределах допуска  $[ei, es]$ . При увеличении выбранного граничного значения годности  $K$  диапазон размеров сорта I  $[x_{h1}, x_{g1}]$  сужается, соответственно увеличивая диапазоны размеров деталей сорта II. Размеры можно делить и на большее количество сортов, но большое их количество нецелесообразно. По-видимому, для практических случаев достаточно использовать 2 – 3 сорта.

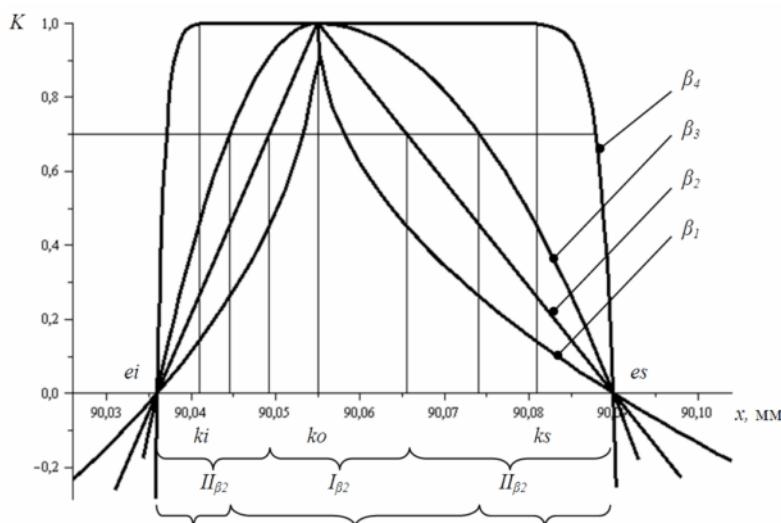


Рис. 1. Функция убыли годности для различных показателей формы  $\beta$

Таблица 1. Предельные значения размеров первого сорта

	$\beta$	$x_{h1}$ , мм	$x_{g1}$ , мм
1	2	90,053	90,058
2	1	90,049	90,066
3	0,5	90,045	90,074
4	0,05	90,037	90,088

то получим функцию, которая характеризует плотность распределения вероятности полученного размера с определенным значением годности. Будем называть эту функцию - функцией плотности распределения годности размеров. Каждое из сочетаний функции убыли годности размеров и функция плотности распределения размеров дает свой вид функция плотности распределения годности размеров.

Эта функция может быть построена методом статистического моделирования [1]. Для практики имеет большое значение получение ее в аналитическом виде. В общем случае эта функция плотности получается как сумма произведений [4]:

При одинаковом значении годности  $K$  диапазон значений размеров определенного сорта сокращается с уменьшением показателя  $\beta$ . Для вышеприведенного примера и  $K = 0,7$  предельные значения размеров деталей первого сорта приведены в таблице 1, на рис. 1 изображены границы сортов для  $\beta_2$  и  $\beta_3$ .

## 2.2. Функция плотности распределения годности размеров

Функции плотности размеров  $f(x)$  деталей достаточно хорошо изучены [3]. В машиностроении размеры могут иметь распределение нормальное, равной вероятности, равнобедренного треугольника, эксцентрикита, а также их композиции.

Если спроектировать функцию плотности распределения размеров  $f(x)$  на функцию убыли годности размеров  $y = K(x)$ ,

$$g(y) = \sum_{i=1}^n f(\Psi_i(K)) \left| \Psi_i'(K) \right|, \quad (2)$$

где  $\Psi_i(K)$  - обратные функции для данного  $y$  со столькими слагаемыми  $n$ , сколько значений (при данном  $y$ ) имеет обратная функция.

Получим функцию плотности распределения годности размеров для случая, когда плотность распределения размеров подчиняется нормальному закону, где среднеарифметическое значение размеров  $a$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (3)$$

Функция плотности распределения годности размеров для случая, когда функция плотности распределения размеров нормальна (3), а функция годности (1), имеет вид:

$$g(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left\{ \left| \beta (ko - ei) (1-y)^{\beta-1} \right| e^{-\frac{(ko - (ko - ei)(1-y)^{\beta-1} - a)^2}{2\sigma^2}} + \right. \\ \left. + \left| \beta (ko - es) (1-y)^{\beta-1} \right| e^{-\frac{(ko - (ko - es)(1-y)^{\beta-1} - a)^2}{2\sigma^2}} \right\}, \quad (4)$$

при ( $-\infty < y \leq 1$ ).

### 2.3. Применение функции плотности распределения годности размеров

Исследуем поведение функции плотности распределение годности  $g$  на примере из второго раздела статьи. Имеем соответственно допуск Ø90F8,  $ei = 90,036$ ,  $es = 90,09$ . Оптимальный размер  $ko = 90,055$  мм. Графики функции плотности распределение годности размеров построим для четырех величин показателя скорости убыли годности размеров:  $\beta_1 = 2$ ,  $\beta_2 = 1$ ,  $\beta_3 = 0,5$  и  $\beta_4 = 0,05$ . Распределение размеров принято нормальным с параметрами  $a$  и  $\sigma$ . По оси абсцисс откладываются значения годности, по оси ординат – плотность распределения годности размеров.

Рис. 2 а) иллюстрирует графики плотности распределения годности размеров для классического случая, когда центр кривой нормального распределения совпадает с оптимальным размером  $a = 90,055$  мм, разброс размеров в пределах  $6\sigma$  равен полулю допуска, при этом среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 0,009$  мм. Понятно, что в этом случае количество деталей с размерами близкими к оптимальному максимально, и уменьшается по мере удаления от центра кривой распределения, достигая практически нулевых значений на границах поля допуска.

Анализ графиков показывает, что не все значения показателя формы функции убыли годности размеров дают физически обоснованную функцию плотности распределения годности. Так, при  $\beta_1 = 2$  функция  $g$  имеет максимум при  $K(x) = 0,55$ , что нереально. При  $\beta_4 = 0,05$  максимум функции  $g$  реальный, но она уменьшается слишком быстро, достигая нулевых значения при  $K(x) = 0,75$ , что не соответствует действительному распределению значению размеров. Для  $\beta_2 = 1$  и  $\beta_3 = 0,5$  графики функции  $g$  физически реальные, имеют максимум  $K(x) = 1$ , достигают нулевых значений при  $K(x) = 0$ . За пределами положительной годности деталей практически нет.

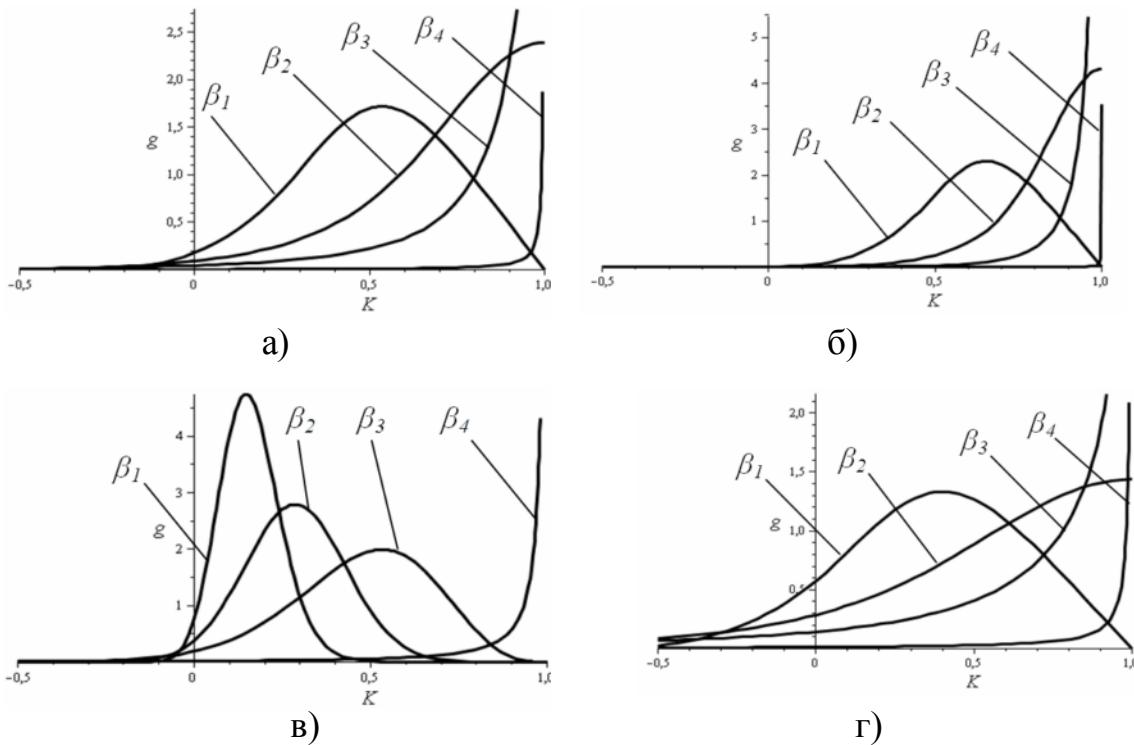


Рис. 2. Графики плотности распределения годности размеров

Рис. 2 б) иллюстрирует распределение годности для случая изготовления со значительным технологическим запасом точности. Исходные данные: центр кривой распределения размеров такой, как и для рис. 2 а), среднеквадратическое отклонение уменьшено до  $\sigma = 0,005$  мм. Таким образом, получаемые размеры сгруппированы около оптимального, а деталей с размерами, близкими к границам поля допуска, нет. Замечания по поводу значений  $\beta$  справедливы и для этих исходных данных.

Рис. 2 в) и 2 г) построены для исходных данных, характеризующих технологию, при которой имеются детали с отрицательной годностью, т.е. бракованные.

На рис. 2 в) центр кривой распределения размеров смещен относительно оптимального и равен  $a = 90,08$  мм, при этом среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 0,005$  мм. Подобные параметры распределения размеров деталей характерны для случая неправильной настройки станка, а точность изготовления достаточна. Анализ графиков показывает, что для  $\beta_4 = 0,05$  график функции  $g$  не изменил своего максимума, что неправильно. Для  $\beta_2 = 1$  и  $\beta_3 = 0,5$  графики функции  $g$  правильные, имеют максимумы в области  $K(x) \approx 0,5$ . Основная часть деталей имеют значения годности 0 - 0,8. Деталей с оптимальным размером практически нет, а в то же время значительная часть деталей имеет отрицательные значения годности, что свидетельствует о браке.

На рис. 2 г) центр кривой распределения размеров совпадает с оптимальным, но разброс размеров слишком велик, среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 0,015$  мм. Подобные параметры распределения размеров деталей характерны для случая недостаточной точности изготовления, при правильной настройке станка. Исходя из статистического смысла, функция плотности распределения годности должна иметь максимум в области значений  $g = 1$ , а часть деталей иметь отрицательную годность. С этими положениями хорошо согласовываются функции с показателем формы  $\beta_2 = 1$  и  $\beta_3 = 0,5$ . Функции, построенные для  $\beta_1 = 2$  и  $\beta_4 = 0,05$ , не позволяют оценивать технологию с точки зрения качества.

Таким образом, хотя функция убыли годности размеров  $K(x)$  может использоваться при любых значениях  $\beta$ , для анализа качества технологии изготовления с помощью функцией плотности распределения годности размеров диапазон значений  $\beta$  следует ограничивать значениями 0,3 – 1. При использовании  $\beta$  за пределами этого диапазона вид функции плотности распределения годности не позволяет определять качество технологического процесса.

Значение функции распределения годности размеров  $g$  в точке максимума отличается от полученных с помощью моделирования [1], причиной этому есть ограниченное число моделирующих значений, поэтому точка экстремума графика распределения годности меньше или больше. Более точные аналитические методы, которые и рассмотрены в данной статье.

### 3. Заключение

1. Предлагается система контроля, в которой действительные размеры имеют значение годности, непрерывно улучшающееся от  $-\infty$  до 1 по мере приближения к оптимальному размеру.
2. Система контроля более общая, чем существующая стандартная система допусков, и включает ее в виде частного случая.
3. Для количественной оценки годности предложена функция убыли годности, желательность близости действительных размеров к оптимальному задается показателем формы убыли годности размеров.
4. Задаваясь диапазоном значений годности, возможно разделять детали на сорта по критерию точности размеров.
5. Для оценки технологического процесса с точки зрения точности размеров предлагается функция плотности распределения годности размеров, которая представляет собой проекцию плотности распределения размера на функцию годности.
6. Выбран и проверен математический аппарат, позволяющий строить функцию плотности распределения годности размеров для случаев, когда плотность распределения подчиняется нормальному закону.
7. Для анализа качества технологии изготовления с помощью функцией плотности распределения годности размеров, значения показателей формы убыли годности размеров следует ограничивать диапазоном 0,3 – 1.
8. Предложенные аналитические зависимости проиллюстрированы примерами.

**Список литературы:** 1. Куприянов А.В. Контроль оптимальности размеров / А.В.Куприянов // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – №24 . – С. 9-15. 2. Куприянов А.В. Расчет размерных цепей с гарантированным значением годности замыкающего звена / А.В.Куприянов // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – №25. – С. 110-114. 3. Маталин А.А. Технология машиностроения. Учебник для машиностроительных ВУЗов / А.А. Маталин – Л: Машиностроение, 1985. – 496 с. 4. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика / В.С. Пугачев – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. - 496с.

### **DIMINUTION USABILITY FUNCTION OF DIMENSIONS**

*Kupriyanov A.V., Lamnauer N.J. (UEPA, Kharkov, Ukraine)*

**Abstract:** The control system built on the receipt of details with sizes near to optimum is offered. The usability of dimension has the numerical value decreasing from maximal - unity, as far as actual dimension locate from optimum one. A mathematical definition for function of usability of dimensions

*is offered and tested. It is shown, as frequency function of usability characterizes quality of technology.*

**Key words:** quality, dimension, control, technology.

### **ФУНКЦІЯ СПАДУ ГІДНОСТІ РОЗМІРІВ**

**Купріянов О.В., Ламнауер Н.Ю. (УПЛА, м. Харків, Україна)**

**Анотація:** Запропоновано систему контролю, що спрямована на отримання деталей з близькими до оптимального розмірами. Гідність розміру має числове значення, що змінюється від максимального - одиниці, у міру віддалення дійсного розміру від оптимального. Запропонованій і перевірений математичний апарат для аналітичної побудови функції спаду гідності розмірів. Показано, як функція щільності розподілу гідності характеризує технологію виготовлення з точки зору якості.

**Ключові слова:** якість, розмір, контроль, технологія.

Надійшла до редколегії 11.01.2011.

**УДК 621.036 (575.4)**

### **ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ГАЗА С ПОНИЖЕННЫМ ВЫХОДОМ ОКСИДОВ АЗОТА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ**

**Курбанов Х.К., Ягшимуратов А.Д. (ТПИ, г. Ашгабад, Туркменистан)**

*E-mail: [gozel-azak@mail.ru](mailto:gozel-azak@mail.ru)*

**Аннотация.** В статье изложены результаты поиска оптимальных режимов работы энергетической котельной установки по условиям снижения выбросов оксидов азота, надёжности и экономичности. Оптимальный режим с отключением одной горелки верхнего яруса по топливу без отключения её по воздуху, позволяющий снизить образование оксидов азота в топке на 40-45% без снижения экономичности котла, внедрён на котле и длительно (~1,2 года) проверен в эксплуатационных условиях. В результате проверки не отмечено ухудшения надёжности и экономичности котла.

**Ключевые слова:** котел, горелка, коэффициент избытка воздуха, оксиды азота.

#### **1. Введение**

Целью работы являлся поиск режимов работы энергетической котельной установки с пониженным в максимально возможной степени, по условиям надёжности и экономичности котла, выходом оксидов азота, отработка этих режимов и внедрение их в промышленную эксплуатацию.

В результате работы на котле отработан режим с одной отключённой горелкой верхнего яруса по топливу без отключения её по воздуху с пониженным на 40-45% выходом оксидов азота по сравнению с традиционным режимом работы котла.

Проверка внедрённой технологии подавления оксидов азота в условиях длительной (~1,2 года) промышленной эксплуатации не выявила отклонений по экономичности и надёжности работы котла от традиционного режима.

#### **2. Основное содержание и результаты работы**

Краткое описание содержания работы.

Экспериментальная часть работы состояла из двух этапов:

Первый этап включал в себя определение состояние энергетического котла, поиск и обработку режимов работы котла с пониженным образованием оксидов азота без заметного изменения надежности и экономичности.

Второй этап проверка состояния котла после его длительной (~1,2 года) промышленной эксплуатации в режиме с пониженным выходом оксидов азота.

Поиск режима работы котла с пониженным выходом оксидов азота.

Состояние котла и турбинного оборудования, влияющего на работу котла, характеризовать следующим:

1. В ремонте находилась часть подогревателей высокого давления, в связи с тем температура питательной воды составляла 190-195<sup>0</sup> (расчетная - 215<sup>0</sup>);
2. Присосы воздуха в топку и пароперегреватель на нагрузке 150т/ч составляли 15-18%;
3. По потокам пароперегревательного тракта имели место перекосы по температуре пара до первого впрыска (30<sup>0</sup>С) и за вторым впрыском (20-30<sup>0</sup>С);
4. Неэффективная работа пароохладителей (при одинаковом открытии указателей положения регуляторов впрысков потоков, расход воды на впрыск по потокам отличался в несколько раз), продувка форсунок впрыска не улучшила заметно ситуацию.

Учитывая, что эксплуатационный перегрев пара на выход из пароперегревателя котла не должен превышать 530<sup>0</sup>С (по условиям надежности паропроводов), вышеупомянутые факторы определили максимальную фактическую нагрузку котла (по условиям перегрева пара), на которой проведен поиск режима с пониженным выходом оксидов азота. Опыты проведены на паровой нагрузке котла ~ 150т/ч с избытком воздуха в режимном сечении (за перегревателем) 1,16-1,18. Температура питательной воды составляла ~ 195<sup>0</sup>С.

При поиске режима с пониженным выходом оксидов азота использовался метод снижения избытков воздуха в горелках без изменения общего расхода воздуха на котел, для чего опробовались различные схемы включения горелок по топливу и воздуху. Данная часть работы (поисковая), наиболее трудоемкая и длительная по времени и количеству поставленных опытов в статье не приводится, поскольку исследованные различные схемы включения горелок приводили к повышению температуры перегрева пара более 530<sup>0</sup>С при полной загрузке впрыска воды в пароохладители.

В результате опробования различных схем включения горелок, выявлена оптимальная схема работы горелок, позволяющая снизить образование оксидов азота на 40-45 % по сравнению традиционным режимом работы котла.

При этом ухудшения экономичности и надежности котла отмечено не было.

Традиционный режим работы котла

Традиционная схема включения горелок на номинальной и близкой к ней нагрузке, использующаяся в эксплуатации многие годы следующая:

природный газ подается в котел через четыре горелки нижнего яруса (№1-4), две центральные горелки второго яруса (№6,7) и две центральные горелки верхнего третьего яруса (№10,11). Подача воздуха ко всем работающим горелкам осуществляется равномерно. Воздушные шиберы на неработающие горелки закрыты.

Эта схема позволяет достичь эффективной работы топки (что было подтверждено в процессе поиска оптимальных режимов) и уменьшить конвективный теплообмен. В результате чего на нагрузке 150т/ч можно поддерживать температуру перегретого пара на уровне не более 530<sup>0</sup>С в условиях пониженной температуры питательной воды (в случае ремонта ПВД) и ограничения подачи воды в пароохладители. Эффективная работа топки при таком расположении работающих горелок достигается [3] за счет улучшения воспламенения топливно-воздушной смеси горелок первого (№1-4) и второго ярусов в результате движущегося вдоль фронтовой стены опускного вихря, захватывающегося факелы верхних горелок (№10,11).

В результате улучшения зажигания формируется короткий факел и достигается снижение температуры пара по сравнению с иным расположением восьми работающих горелок.

Поиск режима с пониженным выходом оксидов азота

Поиск режима с пониженным выходом оксидов азота осуществлялся по следующему алгоритму:

1. Выявление режима работы котла, при котором снижается расход воды на впрыски в пароохладители (при неизменной температуре перегретого пара).
2. Организация режима с пониженным выходом оксидов азота на основе выявленного в соответствии с п.1 режима.

Опробование различных схем включения горелок показало, что температура перегретого пара для многих из них превышает  $530^0\text{C}$  при полной загрузке (по указателю положения впрысков) пароохладителей. Эти режимы прекращались до их стабилизации и в работе не приводятся.

В результате опробования различных схем включения горелок была найдена комбинация, позволяющая получить резерв по расходу воды на впрыски перед традиционной схемой в количестве 10-15%. В этой схеме работают четыре горелки нижнего яруса (№1-4), две средних горелки второго яруса (№6,7) и одна горелка верхнего яруса (№10 или №11).

Переход к этой схеме от традиционной осуществляется закрытием газового вентиля и воздушного шибера на горелку верхнего яруса (№10 или 11).

На базе выявленного режима был организован режим с пониженным выходом оксидов азота, позволяющий снизить образование оксидов азота в топке на 40-45% без превышения температуры перегретого пара более  $530^0\text{C}$ . При этой схеме топливо в котел подается через 7 горелок: четыре горелки нижнего яруса (№1-4), две средние горелки второго яруса (№6,7) и одну горелку верхнего яруса (№11). Подача воздуха в котел осуществляется через 8 горелок: через работающие (№ 1-4, 6-7, 11) и неработающую (№10).

Таким образом, переход с традиционного режима работы котла на режим с пониженным выходом оксидов азота прост и быстро осуществим: необходимо прекратить подачу газа (закрыть кран перед горелкой) на одну из горелок верхнего яруса.

Приемлемым режимом по условиям перегрева пара также оказались режимы с традиционной схемой включения горелок, но с частично прикрытыми по топливу горелками (№6,7) или (№10,11) воздушные шибера которых открыты полностью.

В этих режимах оксидов азота меньше на  $\sim 17\%$ , чем в традиционных.

Сравнительный анализ различных схем включения горелок

В связи с тем, что ниже рассматривается пять схем включения горелок, название каждой из которых достаточно громоздко, то эти схемы классифицированы по номерам.

Схема №1 – традиционная;

Схема №2 – отключена горелка верхнего яруса №10 по топливу и воздуху;

Схема №3 - отключена горелка верхнего яруса №10 только по топливу;

Схема №4 – уменьшенный расход топлива на горелки №6,7;

Схема №5 - уменьшенный расход топлива на горелки №10,11.

Поставленные опыты (№1-12) при нагрузках котла 147-149 т/ч с температурой питательной воды  $190-195^0\text{C}$  и эксплуатационным избытком воздуха ( $\alpha_{\text{п}} = 1,15 - 1,18$ ) показатели, что концентрация оксидов азота в дымовых газах (приведенная к  $\alpha = 1,4$ ) здесь и далее для традиционной схемы (схема №1) и схемы №2 составила  $\sim 0,32 \text{ г/м}^3$ .

Переход к схеме №3 позволил уменьшить концентрацию оксидов азота до  $\sim 0,17 \text{ г/м}^3$  т.е. на  $\sim 47 \text{ г/м}^3$ . Концентрация оксидов азота при работе котла по схемам № 4 и 5 составила  $0,26\text{-}0,27 \text{ г/м}^3$ , что меньше, чем при традиционной схеме на 16-18%.

Переход от традиционной схемы к схемам №2-5 сопровождается увеличением давления газа перед горелками.

Давление воздуха возрастает только при работе котла по схеме №2, т.к. в результате закрытия воздушного шибера горелки №10 увеличивается сопротивление воздушного тракта. Таким образом, режим работы тягодутьевых машин примерно одинаково во всех схемах (кроме схемы 2), поскольку схема включения горелок по воздуху не изменяется.

Температура пара до первого впрыска (за холодным пакетом пароперегревателя) существенно ниже предельно-допустимой на  $60 \div 100^0\text{C}$ , при работе котла во всех схемах №1-5, но имеются перекосы температуры пара которые составляют для схем: №1- $35^0\text{C}$ , №2 -  $32^0\text{C}$ , №3 -  $38^0\text{C}$ , №4 и №5 -  $34^0\text{C}$ . Температурная развертка пара по потокам в большей степени, видимо, связана с гидравлической разверткой расхода пара по потокам, поскольку полное отключение горелки №10 (по топливу и воздуху), т.е. несимметричная схема включения горелок (схема №2) практически не изменила ситуации.

Расход конденсата на первый впрыск для различных схем составил: №1 - 10т/ч; №2 - 8,1т/ч; №3 - 10,7т/ч; №4,5 - 10,4 т/ч.

Приведенные температуры пара до первого впрыска и расходы воды на первый впрыск свидетельствуют о том, что наибольший теплообмен в топке котла имеет место при работе котла по схеме №2.

При отклонении температуры питательной воды от расчетной в сторону снижения и неэффективности системы впрысков это наиболее предпочтительный режим по условиям надежности и экономичности, однако, данный режим работы котла имеет наибольший уровень образования оксидов азота в топке.

Схема №3 (режим пониженного выхода оксидов азота) незначительно отличается от традиционного режима по условиям работы топки и пароперегревателя:

Температура до первого впрыска увеличивается на  $2 \text{ - } 3^0\text{C}$ ;

Температура развертка пара по потокам на  $2 \text{ - } 3^0\text{C}$ ;

Расход воды на первый впрыск возрастает на 0,7т/ч ( $\sim 7\%$ ).

Отключение горелки №10 по топливу с сохранением на нее прежнего расхода воздуха приводит к уменьшению избытка воздуха в работающих 7-ми горелках на 14%, что заметно отражается на уменьшении выхода оксидов азота. Несимметричность включения горелок по топливу по схеме №3, как видно, мало влияет на изменение режима работы котла, что, видно, объясняется удачной аэродинамикой факела в топке, способствующей турбулизации продуктов сгорания и воздуха. Схема №3 легко и быстро реализуется, для этого достаточно перекрыть газовый кран на одну горелку верхнего яруса.

Схемы №4 и 5 по условиям работы топки и пароперегревателя примерно соответствует схеме №3, однако, для их реализации необходимо предварительно произвести расчет изменений давлений газа перед горелками при последовательном прикрытии газовых кранов горелок №6,7 или №10,11 для обеспечения одинакового расхода газа на эти горелки.

Так при неизменном расходе топлива на котел (контроль по расходомеру газа) для обеспечения одинакового расхода газа на прикрываемые по топливу горелки (например, №6,7) необходимо, чтобы соблюдалось условие:

$$P_3 = P_2 \cdot \left( \frac{1 + \sqrt{\frac{P_3}{P_1}}}{2} \right)^2, \quad (1)$$

где:  $P_1$  - давление газа при традиционной схеме, кгс/см<sup>2</sup>;

$P_2$  - давление газа после частичного прикрытия крана первой горелки ( $P_2 > P_1$ ), кгс/см<sup>2</sup>;

$P_3$  - давление газа после частичного прикрытия крана второй горелки ( $P_3 > P_2$ ), кгс/см<sup>2</sup>;

Например, давление газа при традиционной схеме составляло  $P_1 = 0,255$  кгс/см<sup>2</sup>. Переход к схеме №4 осуществлялся следующим образом. Газовый кран на горелку №6 прикрывался до увеличения давления газа перед горелками  $P_2 = 0,264$  кгс/см<sup>2</sup> (с подрегулировкой расхода газа на котел), а затем кран горелки № 7 прикрывался до увеличения давления газа перед горелками  $P_3 = 0,274$  кгс/см<sup>2</sup>. Этот режим характеризуется уменьшением коэффициента избытка воздуха в горелках №1-4, 10-11 на ~ 4% против традиционного, поэтому снижение концентрации оксидов азота незначительно (~ 18%). Потому, что, перераспределив топливо по горелкам в большей степени, можно увеличить подавление оксидов азота, однако возникнут ограничения по условиям перегрева пара.

Температура пара до второго впрыска по потокам для всех схем включения горелок отличается незначительно (максимально 6<sup>0</sup>С) и меньше предельно допустимой в среднем на 14 ÷ 27<sup>0</sup>С. Расход воды на впрыск составляет 5,2 – 5,7 т/ч.

Температура уходящих газов для всех схем при одной и той же температуре питательной воды примерно одинаковая (изменение до 1<sup>0</sup>С) и в опытах составляла 120-125<sup>0</sup>С. Неизменность температуры уходящих газов и избытка воздуха в уходящих газах определяет одинаковую экономичность котла для всех схем включения горелок. КПД котла брутто в опытах в зависимости от температуры питательной воды и избытка воздуха в топке составлял 93,9-94,2%.

КПД котла нетто не определялся, однако, поскольку загрузка тягодутьевых машин для всех схем (кроме схемы №2) не изменялась то можно утверждать, что КПД котла нетто для режима с пониженным выходом оксидов азота не отличается от КПД котла с традиционным режимом в диапазоне эксплуатационных избытков воздуха в топке. Здесь необходимо отметить, что при работе котла с критическим избытком воздуха (что крайне редко), переход на режим пониженного выхода оксидов азота с традиционного потребует увеличения расхода воздуха в котел на ~ 2%, т.к. критический избыток воздуха в режиме с пониженным выходом оксидов азота на ~ 2% больше, чем при традиционном режиме. Критический коэффициент избытка воздуха при традиционном режиме (определялся с помощью индикаторных трубок на CO) составлял  $\alpha_{kp} = 1,11$ , а в режиме с пониженным выходом оксидов азота -  $\alpha_{kp} = 1,13$ .

Таким образом, наиболее предпочтительной схемой включения горелок по условиям снижения выбросов оксидов азота, надежности и экономичности котла является схема №3.

Эта схема включения горелок была поставлена в промышленную эксплуатацию (~ 1,2 года), которая показала, что режим работы котла с пониженным выходом оксидов азота не ухудшает надежность котла (состояние горелок, пароперегревателя и др.) по сравнению с традиционным режимом.

Экологическая и экономическая эффективность работы

Экологическая эффективность работы определяется снижением ущерба окружающей среде, а экономическая снижением ущерба народному хозяйству от сокращения выбросов оксидов азота в атмосферу.

Внедрение режима работы котла с пониженным выходом оксидов азота позволяет уменьшить выбросы оксидов азота на ~ 125т/год для одного котла.

### 3. Заключение

#### Выводы и предложения

1. Переход с традиционного режима работы котла на режим пониженного выхода оксидов азота осуществляется путем отключения одной горелки верхнего яруса по газу без отключения ее по воздуху.
2. Переход на режим пониженного выхода оксидов азота прост по технологии и быстро осуществим по времени.
3. Концентрация оксидов азота в дымовых газах в режиме с отключенной по топливу горелкой верхнего яруса на 40-45% меньше, чем при традиционном режиме.
4. Экономичность работы котла в режиме пониженного выхода оксидов азота не ухудшается в диапазоне эксплуатационных избытоков воздуха.
5. Обеспечивается надежная работа горелочных устройств, температура пара за ступенями пароперегревателя не превышает расчетной (данные завода изготовителя) в режиме с пониженным выходом оксидов азота.
6. Внедрение режима с пониженным выходом оксидов азота целесообразно на всех котлах ГРЭС.

**Список литературы:** 1. «Методические указания по определению содержанию оксидов азота в дымовых газах котла (экспресс методы)». - М., СПО, 2003. 2. «Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)». - М., Энергия, 2001. 3. Внуков А.К. «Экспериментальные работы на парогенераторах». - М., Энергия, 1971.

#### **SEARCHING FOR OF TECHNOLOGIES OF THE INCINERATION OF THE GAS WITH LOWERED BY OUTPUT OXIDES NITROGEN ON ENERGY BOILER INSTALLATION**

**Kurbanov H.K., Yagshimuradov A.D. (TPI, Ashgabat, Turkmenistan)**

**Abstract:** Results of searching for optimum state of working energy boiler installation are stated in article under the provisions of reductions surge oxides of the nitrogen, reliability and economy. The optimum mode with unhooking of one burner of the upper tier on fuel without unhooking it on air, allowing reduce formation an oxides nitrogen in firebox on 40-45% without reduction of the economy boiler, is introduced on boilers and long (~1,2 year) is checked in service conditions. As a result of check is not noted deteriorations reliability and economy boiler.

**Key words:** boiler, burner, coefficient of the excess of the air, oxideses of the nitrogen.

#### **ENERGETIK GAZAN DESGALAR TOPLUMYNDÀ AZODYŇ OKSIDINIŇ AZ ÇYKMAGY BILEN TAPAWUTLANYŇ GAZY YAKMAGYŇ TEHNOLOGIÝASYNY IŞLÄP TAÝARLAMAK**

**Kurbanow H.K., Ýagsymyradow A.D. (TPI, Aşgabat ş., Türkmenistan)**

**Abstract:** Makalada gazan desgalar toplumynda azodyň oksidiniň az çykmagy bilen tapawutlanýan, ygtybarly we ykdysady tayýdan peýdaly gazy ýakmagyň tehnologiyasyny gözleg işleriniň netijeleri getirilen. Gazan desgasynyň ýokarky ýarusynyň gorelkasynyň ýangyjyny öçürip howasyny bolsa öçürmän işletmek gazan desgasynyň ykdysady görkezijilerini peseltmän ojaktaky azodyň oksidiniň emele gelmegini 40-45% göterim azaltýar. Şu usul gazan desgasında ornaşdyrylyp uzak wagtyň dowamynnda (~1,2 ýyl) iş tejribesinde synagdan geçdi. Barlaglaryň netijesinde gazan desgasynyň ygtybarlyygynyň we ykdysady görkezijileriniň peselmegi ýüze çykmady.

**Esasy sözler:** gazan desgasy, gorelka, howanyň artykmaçlyk koeffisienti, azodyň oksidleri.

Надійшла до редколегії 25.01.2011.