

# Энергетика

УДК 681.5

## ОБ ОГРАНИЧЕНИЯХ В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГАЗОВОГО АЗОТИРОВАНИЯ

**Т.А. Бенгина**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрены вопросы постановки задач управления процессом газового азотирования. Проведено исследование системных связей, обеспечивающих основную цель этого вида химико-термической обработки – улучшение эксплуатационных характеристик обрабатываемых изделий. Установлены недопустимые области в пространстве состояний. Сформулированы ограничения по концентрациям азота в фазах, по температуре поверхности нагреваемого тела, по термонапряжениям, по мощности нагрева и по предельным значениям азотных потенциалов атмосферы.*

**Ключевые слова:** *газовое азотирование, теплоперенос, многофазная диффузия, оптимальное управление, объекты с распределенными параметрами, концентрация, нагрев.*

Азотирование – один из видов химико-термической (ХТО) обработки материалов, при котором происходит диффузионное насыщение азотом поверхностного слоя изделия. Обрабатываемая деталь при определенной температуре выдерживается в активной газовой среде, при этом на поверхности изделия происходит взаимодействие между металлом и насыщающей средой. Концентрация диффундирующего элемента меняется по глубине металла, появляются фазы:  $\alpha'$  – фаза – азотистый мартенсит;  $\gamma'$  – фаза – твердый раствор на основе нитрида железа  $Fe_4N$ ;  $\varepsilon$  – фаза – твердый раствор на основе нитрида железа  $Fe_3N_8$ , и, как следствие, изменяются свойства обрабатываемого изделия.

Определяющее влияние на формирование диффузионных слоев и их структуру оказывают параметры газовой среды, температура процесса, степень и качество легирования стали, эти связи чрезвычайно сложны и многообразны. Существенную роль при постановке задачи управления азотированием играют ограничения в области пространства состояний объекта управления.

Наиболее значимое воздействие на показатели качества обрабатываемого изделия оказывает распределение концентрации азота по глубине слоя [4, 5].

Размеры детали несравнимо велики по сравнению с толщиной азотированного слоя, поэтому математическую модель процесса можно с высокой степенью точности считать одномерной.

Процесс диффузии азота в нагретую деталь в ходе ее азотирования может быть описан краевой задачей:

---

*Татьяна Алексеевна Бенгина (к.т.н.), доцент кафедры «Высшая математика и прикладная информатика».*

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_i \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x_i} \right), \quad \tau > 0, \quad 0 < x < R, \quad (1)$$

где  $D_i$  – коэффициент диффузии азота в  $i$ -той фазе;  $C(x, \tau)$  – концентрация азота во внутренней точке  $x$  в момент времени  $\tau$ .

Начальное распределение концентрации  $C_0(x)$  и начальное положение межфазных границ  $\xi_{i0}(x)$ :

$$C(x, 0) = C_0(x); \quad (2)$$

$$\xi_i(x, \tau)|_{\tau=0} = \xi_{i0}(x). \quad (3)$$

Перенос азота из атмосферы на поверхность детали:

$$-D_i \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=R} = \beta_i (\Pi_N^0 - \Pi_N^i), \quad (4)$$

где  $\beta_i$  – коэффициент массопереноса для  $i$ -той фазы;  $\Pi_N^0 = \frac{P_{NH_3}}{P_{H_2}}$  – азотный потенциал печной атмосферы;  $P_{NH_3}, P_{H_2}$  – парциальные давления аммиака и водорода соответственно;  $\Pi_N^i$  – равновесный азотный потенциал соответствующей фазы.

Граничное условие на левой границе:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0. \quad (5)$$

Условия на границах раздела фаз:

$$C(x_i, \tau) \Big|_{x_i=\xi_{i-0}} = C_i^-; \quad (6)$$

$$C(x_i, \tau) \Big|_{x_i=\xi_{i+0}} = C_i^+.$$

Закон движения межфазной границы отражает условие баланса вещества на границе:

$$j_i \frac{\partial \xi_i}{\partial \tau} = D_i \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{\xi_{i+0}} - D_{i-1} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{\xi_{i-0}}, \quad (7)$$

где  $j_i = C_i^- - C_i^+$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $N$  – общее число областей, разделенных фазовыми переходами [1, 2].

Повышение твердости азотированного слоя связано с выделением в твердых растворах дисперсионных нитридов легирующих элементов. Для описания роста нитридов используется модель, предложенная в работе [3]. Предполагается, что они имеют сферическую форму и случайно расположены в матрице. При этих допущениях рост нитридов для относительной концентрации азота

$$\theta_N = \frac{C_0 - C_{cp}(\tau)}{C_0 - C_{NE}}$$

описывается уравнением

$$\frac{d\theta_N}{d\tau} = (K_N N_V^{2/3} D) \theta_N^{1/3} (1 - \theta_N),$$

где  $K_N$  определяется выражением

$$K_N = \left[ 48\pi^2 \frac{C_0 - C_{NE}}{C_{N\beta}} \right]^{\frac{1}{3}},$$

$C_0$  – исходная концентрация азота в твердом растворе;  $C_{cp}(\tau)$  – средняя концентрация азота в момент времени  $\tau$ ;  $C_{NE}$  – концентрация азота на границе «нитрид – твердый раствор»;  $D$  – коэффициент диффузии азота;  $N_V$  – количество нитридов в твердом растворе;  $C_{N\beta}$  – концентрация азота в нитриде.

Необходимо также учесть, что на границах между фазами устанавливаются резкие перепады концентраций азота, соответствующие разностям его предельных растворимостей в соседних фазах  $C_{\max}^{\alpha}, C_{\min}^{\gamma'}, C_{\max}^{\gamma'}, C_{\min}^{\alpha}$  в зависимости от абсолютной температуры детали  $T$ :

$$\begin{aligned} C_{\max}^{\alpha} &= \exp\left(-\frac{4975}{T} + 3\right) \frac{1}{n_{li\alpha}}; \\ C_{\min}^{\gamma'} &= 5,77; \quad C_{\max}^{\gamma'} = 5,88; \\ C_{\min}^{\varepsilon} &= (3,01 + 0,0179T - 0,154 \cdot 10^{-4} T^2) \frac{1}{n_{li\varepsilon}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $n_{lij}$  – коэффициент легирования, зависящий от химического состава стали,  $i = \alpha, \gamma, \varepsilon$ .

Повышение усталостной прочности при азотировании связано с возникновением в процессе поверхностного упрочнения остаточных напряжений, являющихся результатом объемных изменений в поверхностном слое [9]. Максимальная величина сжимающих напряжений фиксируется в зоне высокоазотированных нитридных фаз и на границах поверхностной нитридной зоны с диффузионным подслоем (на глубине 20 мкм). Несмотря на небольшое абсолютное значение, суммарная область действия остаточных напряжений характеризуется зоной существования нитридов. Именно эти напряжения вносят основной вклад в повышение сопротивления азотированной стали усталостному разрушению.

Таким образом, от концентрации азота зависят распределение, размеры и состав упрочненного слоя и, как следствие, эксплуатационные характеристики – твердость, износостойкость, коррозионная стойкость. Учитывая скачкообразный характер образования новых фаз (1–8), необходимо отметить эту особенность при постановке задачи управления, введя соответствующие безусловные ограничения по концентрациям азота в фазах.

Соблюдение требуемого температурного режима при азотировании обусловлено несколькими причинами.

Интенсивность диффузии азота внутрь детали определяется коэффициентами диффузии  $D^i(T), i = \alpha, \gamma, \varepsilon$  в каждой фазе, а они зависят от температуры процесса  $T$  и коэффициента легирования  $n_{li}^i$  [5]:

$$D^{\alpha} = 6,6 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{18600}{RT}\right) n_{li}^{\alpha}; \quad D^{\gamma} = 8,404 \cdot 10^{-6} \frac{C^{\gamma'}}{5,9 - C^{\gamma'}} n_{li}^{\gamma} \exp\left(-\frac{23036}{RT}\right);$$

$$D^{\varepsilon} = 0,2277 \exp\left(-\frac{35259}{RT}\right) n_L^{\varepsilon}.$$

При превышении температуры относительно требуемой происходит укрупнение зерна и, как следствие, ухудшение механических свойств детали. Выбор температуры процесса азотирования для изделий из конструкционных сталей определяется требованиями к толщине и твердости слоя. Для получения высокой твердости при небольшой толщине слоя рекомендуется применять относительно низкую температуру  $T = 500-520^{\circ}\text{C}$ , при требовании больших толщин слоя и меньшей твердости применяется более высокая температура ( $560-580^{\circ}\text{C}$ ). Для получения больших толщин слоя и высокой твердости применяют двухступенчатый температурный режим: 1-я ступень –  $500-520^{\circ}\text{C}$  ( $\sim 1/3 \dots 1/4$  от времени всего процесса), 2-я ступень –  $540-560^{\circ}\text{C}$  [9].

Недопустимо отклонение от температурного режима и в ходе закалки или отпуска азотированной детали, так как существенно ухудшается качество обработки [4, 6, 7], происходит отклонение режима азотирования от расчетного, что, в свою очередь, влечет за собой отклонение результирующего распределения  $C$  от заданного  $C^*$ .

В силу вышеизложенного в пространстве состояний следует выделить недопустимые области, попадание в которые приведет к недопустимому ухудшению технико-экономических показателей процесса. Такие области образуются следующими ограничениями.

1. Ограничения по концентрации азота в фазах. Это безусловные ограничения, вызванные предельной растворимостью азота в соответствующих фазах, связанные с механизмом образования новой фазы:

$$C_i^{\min}(x, \tau) \leq C_i(x, \tau) \leq C_i^{\max}(x, \tau), \quad i = \alpha, \beta, \gamma, \quad (9)$$

где  $C_i$  – концентрация азота в  $i$ -той фазе;  $C_i^{\max}$  – максимально возможная концентрация азота в  $i$ -той фазе;  $C_i^{\min}$  – минимально возможная концентрация азота в  $i$ -той фазе.

2. Ограничение по температуре поверхности нагреваемого тела

$$T_{\min} \leq T(x, \tau)|_{x=1} \leq T_{\max}. \quad (10)$$

$T_{\min}$  – минимальная температура азотирования, технологически допустимая для проведения процесса.

Это ограничение необходимо соблюдать не столько для того, чтобы не оплавить поверхность, так как чаще всего температура азотирования ( $500-560^{\circ}\text{C}$ ) значительно ниже температуры плавления, сколько в связи с тем, что повышение температуры выше допустимой повышает хрупкость за счет увеличения зоны сложных нитридов. Кроме того, температурные изменения коэффициента диффузии приводят к недопустимым изменениям размера фаз, а значит, и к изменению свойств упрочняемого слоя.

3. Ограничение по термонапряжениям. Термонапряжения в ходе интенсивного нагрева деталей ограничиваются допустимым по трещинообразованию перепадом температуры между поверхностью детали  $T(1, \tau)$  и средней температу-

рой  $\bar{T}(\tau) = \int_0^1 T(x, \tau) dx$  [7, 9]:

$$|\bar{T}(\tau) - T(1, \tau)| < \gamma_{\max}. \quad (11)$$

Кроме того, недопустимый уровень напряжений вызывается процессом диффузии азота в сталь с образованием многофазной структуры, если нарушается температурный режим и диффузионный регламент. Это определяется существенно различными коэффициентами линейного расширения и плотности  $\alpha, \gamma$  и  $\varepsilon$  фаз [6,8].

Рассмотрим ограничения в пространстве управлений.

1. Ограничения теплового потока на поверхность детали, связанные с ограниченной мощностью нагрева:

$$q_{\min} \leq q(\tau) \leq q_{\max}. \quad (12)$$

Эти ограничения энергетического ресурса управления определяются мощностью электрических нагревателей печи в случае использования электропечи или предельными возможностями радиационных нагревателей по техническим ограничениям горелки или расходу газа в случае использования газовой радиационной печи.

2. Ограничения на предельный азотный потенциал атмосферы:

$$\Pi_{\min} \leq \Pi_C \leq \Pi_{\max}. \quad (13)$$

Определяются техническими возможностями установки, например предельной степенью диссоциации ацетилена [1, 4].

Проблема автоматического, а особенно оптимального управления процессом газового азотирования к настоящему времени не может считаться решенной в полной мере. Проведенные теоретические исследования в этом направлении наметили перспективу решения данной задачи [1, 4, 6, 7]. Использование обоснованных ограничений (9–13) в задаче оптимизации азотирования позволяет ставить и решать задачи автоматического и оптимального управления этим процессом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бенгина Т.А. Оптимизация технологического процесса газового азотирования: Дис. ... канд. техн. наук. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 155 с.
2. Коган Я.Д., Булгач А.А. Моделирование на ЭВМ кинетики диффузионного насыщения при газовом азотировании // МиТОМ. – 1984. – № 1. – С. 10–19.
3. Коган Я.Д., Булгач А.А. Расчет упрочнения металлов дисперсными нитридами по механизму Мотта-Набарро и Орована // Повышение надежности и долговечности машин и инструмента методами химико-термической обработки: Сборник. – М.: МАДИ, 1981. – С. 12–21.
4. Лахтин Ю.М. Регулирование фазового состава и содержания азота в нитридном слое при азотировании стали 38Х2МЮА // МиТОМ. – 1996. – № 1. – С. 5–11.
5. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Булгач А.А. Азотирование в машиностроении // Сб. научных трудов МАДИ. – 1986. – С. 42–49.
6. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Александров В.А. Новые системы контроля процесса азотирования // МиТОМ. – 1978. – № 4. – С. 47–51.
7. Лившиц М.Ю. Теория и алгоритмы оптимального управления термодиффузионными процессами технологической теплофизики по системным критериям качества: Дис. ... д-ра техн. наук. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2001. – 425 с.
8. Хоросайлов В.Г., Гюмеханданов Е.Л. Химико-термическая обработка стали. – Л.: ЛПИ, 1980. – 78 с.
9. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Ю.А. Скаков, А.Н. Иванов, Л.Н. Расторгуев. – М.: Металлургия, 1982. – 631 с.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2016 г.

## ON RESTRICTIONS IN THE PROBLEM OF OPTIMUM CONTROL PROCESS OF GAS NITRIDING

***T.A. Bengina***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The aspects of statement the management problems of gas nitriding process are considered. Research of the system communications providing the main purpose of this type of chemical heat treatment namely the improvement of operational characteristics of the processed products is conducted. Inadmissible areas in space of states are established. Restrictions on concentration of nitrogen in phases, on surface temperature of the heated body, on thermal stresses and on extreme values of nitric potentials of the atmosphere are formulated .*

***Keywords:*** *gas nitriding, heatmass transfer, multiphase diffusion, optimum control, objects with the distributed parameters, concentration, heating.*

УДК 66.041.6:662.951.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ПОТОКА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В СОПЛЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ГОРЕЛКИ ТИПА АГГ-М

*А.С. Печников, А.Е. Акимов*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: PetchnikovAS@mail.ru

*В последние годы новые, более эффективные и совершенные горелки и системы отопления внедряются в печах пиролиза углеводородного сырья. Большой вклад в это внесли и сотрудники кафедры МОНХП СамГТУ разработкой серии горелочных устройств типа АГГ. Для увеличения надежности работы горелок выполнены разработки по модернизации существующих горелок типа АГГ, благодаря чему почти в два раза увеличен ресурс их эксплуатации. Одновременно решена задача по достижению большей равномерности газозвушной смеси на выходе из сопла горелки, что показано стендовыми исследованиями модели модернизированной горелки типа АГГ-2М. Равномерность горения смеси на излучающих стенах топки позволяет выровнять температурные поля экранной поверхности нагрева трубчатых печей, увеличить ресурс работы змеевиков.*

**Ключевые слова:** горелка типа АГГ, модернизация конструкции, исследование аэродинамики проточной части сопла, равномерность истечения из сопла.

В нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности хорошо себя зарекомендовали горелки типа АГГ [1]. Конструкция этих горелок отработана экспериментально, многократно испытана [2, 3], создана методика их расчета, выпущены отраслевые технические условия на их изготовление. Благодаря хорошему деловому контакту разработчиков с заводом-изготовителем горелки доведены до максимальной унификации и технологичности изготовления.

Газовые горелки типа АГГ первой серии нашли широкое применение преимущественно в трубчатых печах высокотемпературного пиролиза установок ЭП-60 (горелки АГГ-1), Э-100, Э-200, ЭП-300, ЭП-450 (горелки типа АГГ-2), печах каталитического пиролиза (горелки АГГ-3 и АГГ-4) и печах пиролиза дихлорэтана (горелки типа АГГ-4). Эти горелки обладают рядом преимуществ [4] перед применяемыми инжекционными горелками импортного и отечественного производства, что обусловило их приоритет при выборе и оснащении топливных систем трубчатых печей.

Однако в условиях периодической работы горелок в пиролизных печах и недостаточного контроля за работой горелок в период пуска и начала эксплуатации узким местом, определяющим надежность работы горелки АГГ в целом, явилось сальниковое уплотнение топливной камеры горелки.

Для увеличения надежности работы горелок АГГ в эксплуатационный период нами были проведены дополнительные теоретические исследования по со-

---

*Александр Сергеевич Печников (к.т.н.), доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».*

*Андрей Евгеньевич Акимов, аспирант.*

вершенствованию конструкции с проверкой технических решений на экспериментальных стендах. На основании результатов этих исследований в конструкцию горелки типа АГГ были внесены соответствующие изменения:

– изменена конструкция завихрителя (вместо двухзаходной полуспирали Архимеда теперь это четырехзаходный через 90 градусов червяк с углом наклона нарезаемых каналов в  $15\div 20$  градусов);

– увеличено число топливных каналов;

– конструктивно изменен узел уплотнения топливной камеры горелки (при помощи паронитовой или медной прокладки);

– оптимизированы геометрические размеры проточной части горелки.

Завихритель новой конструкции выполнен в виде полого цилиндра с проточкой под распределительную топливную камеру и с нарезкой топливных каналов по наружной образующей по винтовой линии.

Горелки, модернизированные таким образом, образуют новую серию горелочных устройств типа АГГ-М. Схематично горелка представлена на рис. 1.

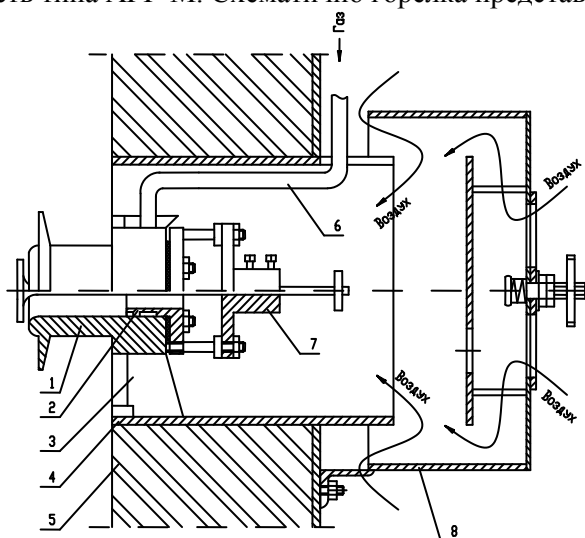


Рис. 1. Модернизированная горелка типа АГГ-М:

1 – горелка; 2 – завихритель топливного газа; 3 – центрирующие опорные ребра; 4 – закладная воздушная труба; 5 – кладка печи; 6 – газоподводящая трубка; 7 – устройство регулирования подачи первичного воздуха; 8 – глушитель шума – регулятор инжекции воздуха

После отработки конструктивных размеров новой серии горелочных устройств типа АГГ-М на изотермических стендах были проведены исследования по изучению равномерности выходного газозвдушенного потока, настилающегося на кладку излучающих стен. Исследования проводились на аэродинамическом стенде и по методике, изложенной в работе [5]. Измерения скоростных полей в проточной части сопла модели модернизированной горелки проводились в трех сечениях по длине сопла и в 16 точках по диаметру сопла.

Исследуемые сечения находились на расстоянии от выходных каналов завихрителей, соответствующем 0,7, 1,2 и 1,55 диаметрам сопла (для горелки АГГ-2М), и дополнительно на срезе сопла горелки (для горелки типа АГГ-2). Схема точек измерений для модели горелки АГГ-М представлена на рис. 2.



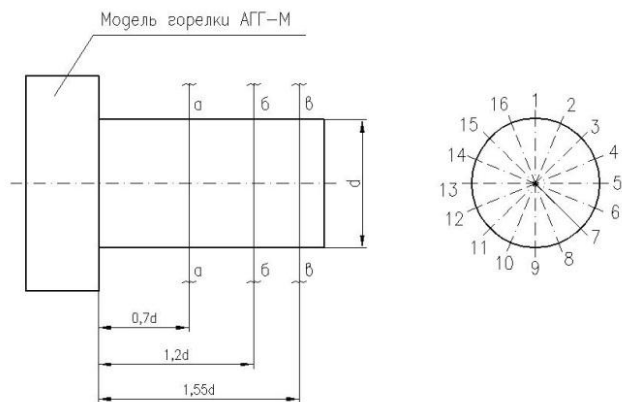


Рис. 2. Схема точек измерения скоростного напора в проточной части горелки АГГ-М:  
*а-а, б-б, в-в* – исследуемые сечения проточной части модели горелки;  
 1÷16 – точки замера тангенциальной и радиальной составляющих скорости потока  
 в указанных сечениях

Результаты исследований горелок типа АГГ-2 и АГГ-2М (при расходе компримируемого воздуха, близком к номинальному) представлены на рис. 3, где графически показано угловое распределение относительной тангенциальной составляющей скорости вихревого газозвушного потока по сечениям сопла исследованных моделей горелок.

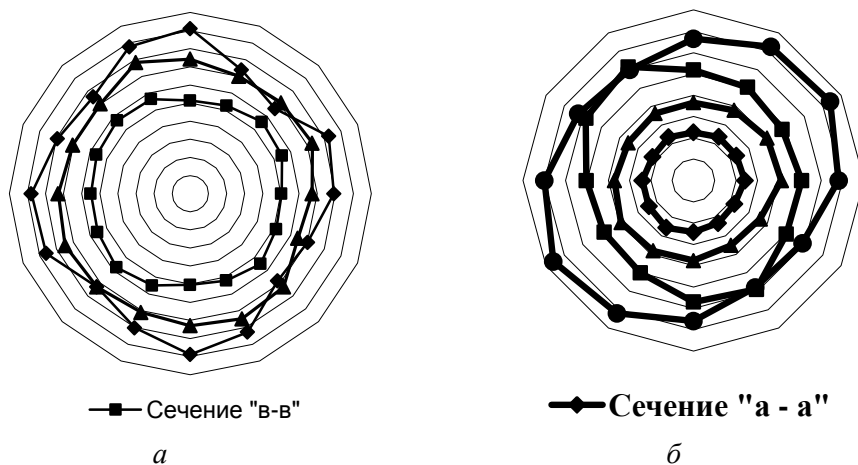


Рис. 3. Угловое распределение тангенциальной составляющей скорости вихревого потока в сопле горелки АГГ-2М (*а*) и горелки АГГ (*б*) при производительности, близкой к номинальной [5]

Характер представленной картины показывает, что распределение тангенциальной составляющей скорости газового потока по периметру камеры смешения в каждом из сечений имеет вид неравномерной окружности с выраженными отклонениями от диаметра, что соответствует числу выходных каналов завихрителя. По мере удаления от завихрителя эти отклонения уменьшаются, и на расстоянии 1,55 диаметра сопла от выходных каналов завихрителя показатель неравномерности для горелки АГГ-2 составляет 12,7 %, а для модернизированной горелки АГГ-2М – 7,6 %.

Для модернизированных горелок типа АГГ-М достигнута большая равномерность выходного потока газозвушной смеси, что благоприятно сказывается на равномерности температурного поля излучающей поверхности, на которую настиляется горящая смесь.

Таким образом, кроме повышения надежности работы горелок АГГ-М в эксплуатационный период, достигнутого за счет модернизации конструкции, обеспечено также улучшение теплотехнических показателей горелки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарихин В.В. Газовые горелки типа АГГ для систем сжигания топлива в трубчатых печах / В.В. Шарихин, Т.Н. Мухина, А.С. Печников, В.В. Степанчук // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1998. – № 1. – С. 32–35.
2. Печников А.С. Определение коэффициента инжекции, регулируемых и установочных размеров горелок типа АГГ // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 207–210.
3. Печников А.С., Григорян Л.Г. Исследование процесса истечения газа через горелки типа АГГ // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4 (40). – С. 181–185.
4. Шарихин В.В. Повышение эффективности топливных систем трубчатых печей / В.В. Шарихин, Т.Н. Мухина, А.С. Печников, В.В. Степанчук, А.В. Шарихин // Нефтепереработка и нефтехимия. – М.: ЦНИИЭнефтехим, 2002. – № 4. – С. 15–17.
5. Печников А.С., Григорян Л.Г. Исследование аэродинамики проточной части горелки типа АГГ // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 174–179.

*Статья поступила в редакцию 11 марта 2016 г.*

## RESEARCH OF VORTICAL GAS-AIR STREAM IN NOZZLE OF MODERNIZED AGG-M BURNER

*A.S. Petchnikov, A.E. Akimov*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*Over the last years new, more effective AGG-type burners on pyrolyze furnaces were introduced. Some of the burners were developed in Samara State Technical University. In order to increase the reliability of the AGG-type burners they were modernized. As a result the burner service life was increased twice. Also a regularity of gas-air mixture at exit of nozzle was increased. This result was confirmed by experimental researches. The regularity of the mixture burning on the radiating walls allows to equalize the heating surface temperature and increase the pipe coils service life.*

**Keywords:** *AGG-type burner, burner construction modernization, aerodynamics of nozzle flowing part research, regularity of nozzle stream.*

---

*Aleksandr S. Petchnikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Andrey E. Akimov, Postgraduate Student.*