УДК 519: 666.972:519.6

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СТАДИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ ПРИ ПОСТОЯННЫХ ТЕМПЕРАТУРЕ И ДАВЛЕНИИ

[1]Сазонова Т.В., [2]Суликова В.А.

[1]Кумертауский филиал ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Кумертау, e-mail: SazonowaTV@kfosu.edu.ru;

[2]ВО «Оренбургский государственный университет», Оренбург

Предложены конструкция и модель управления строительным автоклавом на стадии изотермической выдержки при постоянном давлении, в котором для снижения доли брака в шлакоблоках стабилизация температуры 190 ± 1 °С при тепловлажностной обработке осуществляется шестимерным нечетким регулятором с компенсатором взаимного влияния контуров регулирования в виде дополнительной системы продукционных правил, обеспечивающей снижение объема бракованных шлакоблоков и экономию энергии. Разработан алгоритм регулирования температуры на стадии изотермической выдержки при постоянном давлении с учетом предложенной схемы подачи пара в шести точках автоклава. Получены характеристики «Вход-выход» для всех шести регуляторов температуры автоклава: в автономном и многосвязном режимах работы контуров, позволяющие сводить к минимуму их влияние на исследуемый контур, а также учитывать влияние остальных контуров многомерного нечеткого регулятора с интервальной неопределенностью.

Ключевые слова: автоклав, многомерный регулятор, нечеткая логика, компенсация взаимного влияния

THE CREATION OF THE MODELLING MANAGEMENT OF HEATMOIST PROCESSING' OBJECTS OF CONSTRUCTION MATERIALS AT THE STAGE OF THE ISOTHERMAL ENDURANCE AT CONSTANTS

[1]Sazonova T.V., [2]Sulikova V.A.

[1]Orenburg State University, Kumertau branch, Kumertau, e-mail: SazonowaTV@kfosu.edu.ru;

[2]Orenburg State University, Orenburg

A design and model management of the construction of autoclave at isothermal soaking at a constant pressure, in which the proportion' reduction of marriages in a cinder block temperature stabilization 190 ± 10°C with heat and humidity treatment is carried out a six-dimensional fuzzy controller with a compensator of mutual influence of control loops in the form of an additional system of production rules, providing decrease in the volume of defective blocks and energy savings. Temperature control algorithm is designed for isothermal holding step at constant pressure based on the proposed supply circuit steam autoclave at six points. Obtained the characteristics of «Input-Output» for all six of the autoclave temperature controller: offline and multiply modes contours, allowing to minimize its impact on the monitoring circuit, as well as take into account the influence of the remaining contours of multidimensional fuzzy controller with the interval uncertainty.

Keywords: autoclave, multidimensional regulator, fuzzy logic, compensation of mutual influence

Для производства строительных материалов в автоклавах применяется тепловлажностная обработка. Анализ результатов экспериментальных исследований процесса производства шлакоблоков из золошлаковых материалов теплоэлектроцентралей (в том числе ТЭЦ г. Кумертау), использующих для топлива бурые угли, показывает [6], что существующие технологические аппараты и схемы не позволяют получить готовую продукцию необходимого качества. Этому препятствуют следующие основные причины: широкий диапазон изменения состава в золошлаковых материалов оксидов железа (3–27) % [1], следствием чего является случайный разброс оптимальной продолжительности стадий подъема и снижения давления и температуры в автоклаве, а также изотермической выдержки при постоянном давлении для технологических циклов автоклава; в существующих автоклавах насыщенный пар подается по одной трубе, что не позволяет равномерно нагреть весь объем автоклава и, как следствие, – увеличивается объем брака в составе готовых шлакоблоков. В существующих технологических регламентах на производство шлакоблоков приемлемое время изотермической выдержки при постоянных значениях давления и температуры в автоклаве являются постоянными, среднестатистическими параметрами, не учитывающими изменяющийся от партии к партии химический состав сырья. Как правило, их значение является завышенным, что ведет к снижению производительности автоклава, качества шлакоблоков и к перерасходу энергоресурсов.

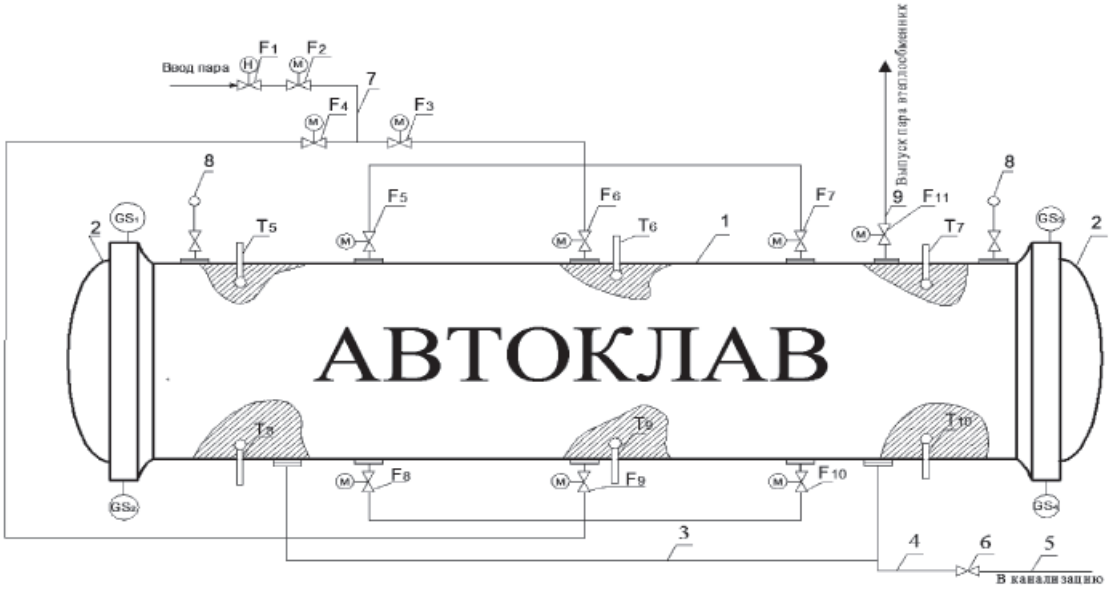

Рис. 1. Схематическая конструкция автоклава для производства шлакоблоков из золошлаков

Стадия изотермической выдержки наступает после достижения в автоклаве [5] (рис. 1) температуры 190 °С, закрытия вентилей $F_5...F_{10}$ и подачи сигнала на вход таймера длительности изотермической выдержки. Для придания шлакоблокам необходимой прочности на этой стадии в течение 8 часов с погрешностью ± 1 °С в автоклаве следует поддерживать температуру 190 °С и давление 1,2 МПа. В сущности, регулирование в данном случае сводится к компенсации потерь тепла автоклава за счет подачи дополнительных объемов пара через вентили $F_5...F_{10}$ в случае снижения показаний датчиков температуры $T_5...T_{10}$ ниже 190 °С. Поэтому регуляторы, установленные на автоклаве, должны без перерегулирования только повышать температуру, которая понижается из-за естественного рассеивания тепловой энергии.

Укрупненная логическая схема алгоритма регулирования температуры на стадии изотермической выдержки при постоянном давлении представлена на рис. 2. Из неё следует, что регуляторы для вентилей $F_5...F_{10}$ включаются в работу при условии снижения температуры в автоклаве ниже 190 °С (операторы условного перехода (T_5 < 190 °С)...(T_{10} < 190 °С)). По истечении 8 часов срабатывает таймер ($TP_{вых}$ = 8 ч), что свидетельствует об окончании стадии изотермической выдержки при постоянном давлении. В соответствии с логической схемой алгоритма регулирования вентили $F_5...F_{10}$ закрываются ($F_5...F_{10}$ = 0).

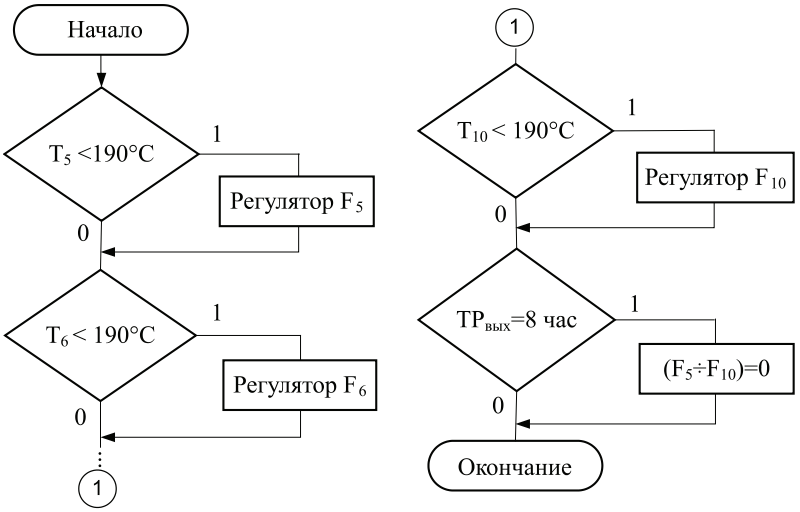

Рис. 2. Укрупненная логическая схема алгоритма регулирования температуры на стадии изотермической выдержки при постоянном давлении

Поскольку физические процессы в автоклаве не имеют достоверных и адекватных математических моделей (на сегодня информация о них представлена в виде уникального опыта экспертов предметной области), то в качестве регуляторов температуры в системе управления автоклавом выбраны нечеткие логические регуляторы с интервальной неопределенностью (НРсИН). Хотя имели место случаи использования для автоклавов классических ПИД и типовых нечетких регуляторов [2, 4], но эффективность оказалось низкой главным образом по следующим причинам:

– по регулированию температуры автоклав является многосвязным объектом управления с шестью взаимосвязанными регулируемыми параметрами, однако при использовании ПИД и типовых нечетких регуляторов упомянутая взаимосвязь не учитывается, что снижает показатели качества регулирования;

– многомерные регуляторы на основе ПИД и типовых нечетких регуляторов при широком диапазоне регулирования и неадекватной математической модели объекта управления обладают большой погрешностью и низким быстродействием, что затрудняет создание компенсаторов взаимного влияния контуров регулирования с необходимой точностью.

Краеугольным принципом использования многомерных НРсИН (МНРсИН) является интерпретация входных и выходных переменных, а также функций компенсации взаимовлияния контуров регулирования совокупностью четких термов, т.е. термов с прямоугольной формой функции принадлежности [3]. Поэтому на рис. 3, а представлена интерпретация регулируемого параметра T_5 совокупностью из 18 четких термов T_{59-}, T_{58-}, ..., T_{51-}, T_{51+}, T_{52+}, ..., T_{58+}, T_{59+}, у которых передний фронт описывается жестким, а задний – мягким неравенствами (например, 190 °C < T_{51+} ≤ 191 °C и т.д.). Причем у термов T_{59-}, T_{58-}, ..., T_{51-}, T_{51+}, T_{52+}, ..., T_{56+}, T_{57+} ширина равна 1 °C, а у термов T_{58+}, T_{59+} – в 2 раза больше. Интерпретация остальных регулируемых параметров T_6, T_7, T_8, T_9 и T_{10} аналогична.

На рис. 3, б представлена интерпретация регулирующего параметра F_5 совокупностью из девяти четких термов F_{51}... F_{59} шириной 3 % от полного открытия вентиля. Аналитическое выражение её терм-множества имеет следующий вид:

$$T_5(F_5) = \sum_{i=1}^{9} F_{5i} \cdot ((i-1)\cdot 3 \le F_5 < i\cdot 3), \quad (1)$$

где i – номер четкого терма.

Интерпретация регулирующих параметров F_6–F_{10} совокупностью четких термов аналогична. Только на рис. 3 и в выражении (1) вместо цифры 5 используются цифры 6–10.

Графическая форма представления универсальных терм-множеств для регулирующих параметров F_6, F_8, F_9 и F_{10} представлена на рис. 4, а их аналитические выражения имеют следующий вид:

$$T_6(F_6) = \sum_{i=1}^{9} F_{6i} \cdot ((i-1)\cdot 2 \le F_6 < i\cdot 2);$$

$$T_8(F_8) = \sum_{i=1}^{9} F_{8i} \cdot ((i-1)\cdot 5 \le F_8 < i\cdot 5);$$

$$T_9(F_9) = \sum_{i=1}^{9} F_{9i} \cdot ((i-1)\cdot 4 \le F_9 < i\cdot 4). \quad (2)$$

Знак суммы в выражениях (2) означает совокупность четких термов. Графическая и аналитическая формы универсальных терм-множеств регулирующего параметра F_{10} такие же, как и у параметра F_8. Только на рис. 4 и в выражении (2) цифру 8 следует заменить цифрой 10.

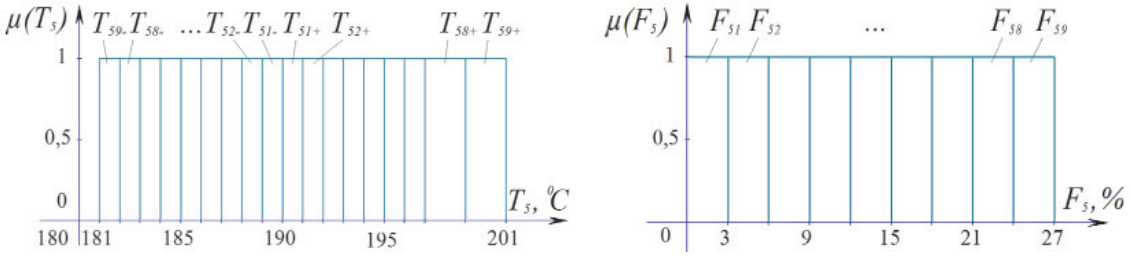

Рис. 3. Интерпретация регулируемого параметра T_5 (а) и регулирующего параметра F_5 (б) совокупностью четких термов

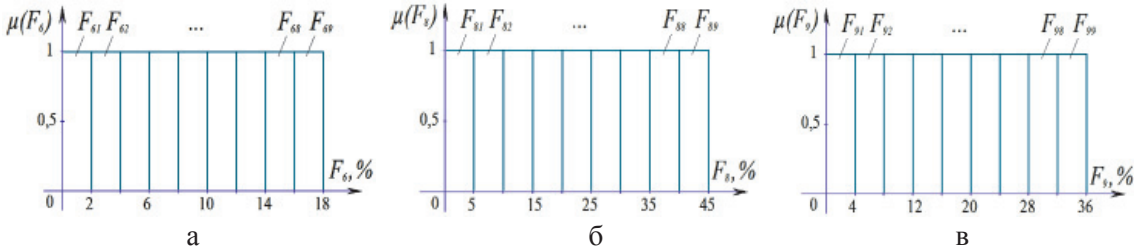

Рис. 4. Интерпретация регулирующих параметров $F_6...F_9$ совокупностью четких термов

Как известно [2, 4], преимуществом НРсИН перед ПИД и типовыми нечеткими регуляторами при автоматизации сложных, нелинейных и многосвязных объектов управления высокого порядка, представленных вербальной моделью, является низкая погрешность и высокое быстродействие. Эти характеристики позволяют построить МНРсИН с хорошей компенсацией взаимного влияния контуров регулирования.

Таким образом, предложен алгоритм изотермической выдержки при постоянном давлении, в котором для снижения доли брака в шлакоблоках стабилизация температуры 190 ± 1 °С при тепловлажностной обработке осуществляется шестимерным нечетким регулятором с компенсатором взаимного влияния контуров регулирования в виде дополнительной системы продукционных правил.

Исходные данные для разработки такого компенсатора предлагается получить из эксперимента по снятию для каждого контура регулирования МНРсИН двух характеристик «Вход-выход»: в автономном и многосвязном режимах работы контуров. Применительно к регуляторам температуры автоклава автономный режим означает следующее: при наступлении стадии изотермической выдержки с постоянным давлением температуру 190 °С поддерживает только один из шести регуляторов. Вентили остальных регуляторов закрыты. Тем самым сведено к минимуму их влияние на исследуемый контур. В случае многосвязного режима штатно работают все регуляторы. Поэтому полученная в таких условиях характеристика «Вход-выход» рассматриваемого регулятора будет учитывать влияние остальных контуров МНРсИН.

В соответствии с изложенным планом эксперимента были получены характеристики «Вход-выход» для всех шести регуляторов температуры автоклава. Например, на рис. 5 изображены характеристики «Вход-выход» $T_{5а} = f(F_5)$ для автономного, а $T_{5м} = f(F_5)$ – для многосвязного режимов работы регулятора, относящиеся к вентилю F_5. Их разность по оси ординат представлена функцией влияния всех остальных контуров регулирования на контур T_5: $T_{5в} = T_{5м} - T_{5а}$.

Физический смысл кривых для «своих» контуров регулирования аналогичен. Следует отметить, что исходя из конструкции автоклава характеристики «Вход-выход» регулятора T_7 такие же, как и у регулятора T_5. Такое же совпадение и по тем же соображениям имеет место и для регуляторов T_8 и T_{10}.

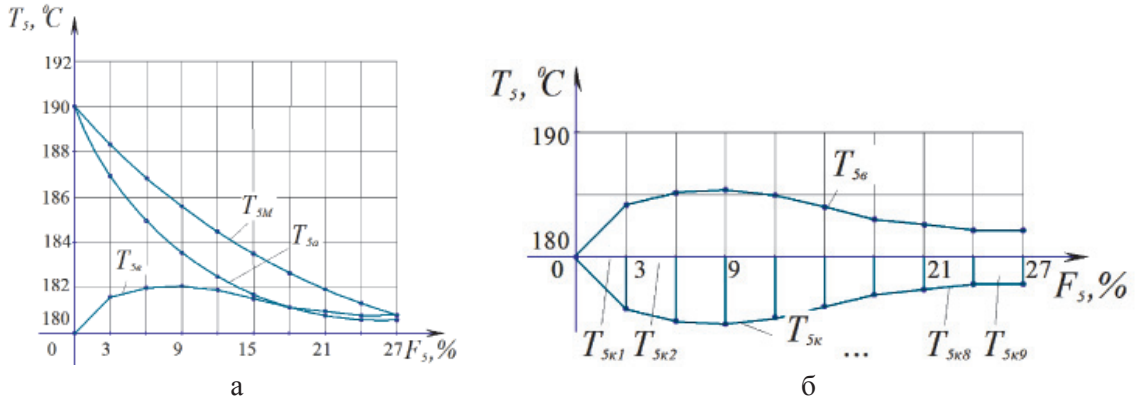

Рис. 5. Характеристики «Вход-выход» регулятора T_5 в автономном ($T_{5а}$), многосвязном ($T_{5м}$) режимах и функция влияния $T_{5в} = T_{5м} - T_{5а}$ (а) и интерпретация компенсационной функции $T_{5к}$ совокупностью четких термов $T_{5к1}...T_{5к9}$ (б)

При синтезе многомерных регуляторов, в том числе МНРсИН, центральной задачей, напрямую связанной с повышением показателей качества регулирования, является разработка компенсаторов взаимного влияния контуров регулирования. Для её решения предлагается использовать функции влияния $T_{5в}...T_{10в}$ регуляторов температуры автоклава.

Идея компенсации состоит в генерации в операционной среде каждого контура регулирования, программно реализованного МНРсИН, функции, являющейся зеркальным отображением функций $T_{5в}...T_{10в}$ относительно оси абсцисс. Полученные таким образом новые функции интерпретируются совокупностью четких термов, которые используются для построения компенсационной системы продукционных правил.

На рис. 5, б изображены компенсационные функции $T_{5к}...T_{10к}$, построенные в результате зеркализации функций влияния $T_{5в}...T_{10в}$ соответственно относительно оси абсцисс. Для программной реализации функции $T_{5к}...T_{10к}$ представлены совокупностью из девяти четких термов. Например, функция $T_{5к}$, полученная зеркализацией функции $T_{5в}$ относительно оси абсцисс, заменяется термами $T_{5к1}...T_{5к9}$ шириной 3 %, покрывающими диапазон изменения регулирующего параметра F_5, равный 27 %. Остальные компенсационные функции, строятся аналогичным образом и имеют аналогичные параметры. Компенсационные функции для $F_{7к}$ и $F_{10к}$ идентичны функциям $F_{5к}$ и $F_{8к}$ соответственно.

Компенсационным функциям $T_{5к}...T_{10к}$ соответствуют следующие аналитические выражения универсальных терм-множеств:

$$T_{5k} = \sum_{i=1}^{9} T_{5ki} \cdot ((i-1)\cdot 3 \le t_{5k} < i \cdot 3); \qquad (3)$$

$$T_{6k} = \sum_{i=1}^{9} T_{6ki} \cdot ((i-1)\cdot 2 \le t_{6k} < i \cdot 2);$$

$$T_{8k} = \sum_{i=1}^{9} T_{8ki} \cdot ((i-1)\cdot 5 \le t_{8k} < i \cdot 5);$$

$$T_{9k} = \sum_{i=1}^{9} T_{9ki} \cdot ((i-1)\cdot 4 \le t_{9k} < i \cdot 4),$$

где i – номер четкого терма.

Введение компенсационных функций изменило структуру программы, реализующей МНРсИН температуры в автоклаве. В такой программе для каждого контура регулирования наряду с регулирующими ($РСПП_{т5}...РСПП_{т10}$) присутствуют компенсирующие ($КСПП_{т5}...КСПП_{т10}$) системы продукционных правил.

Тем самым сводится к минимуму взаимное влияние контуров многомерного нечеткого регулятора с интервальной неопределенностью и происходит повышение показателей качества регулирования температуры в автоклаве на стадии изотермической выдержки с постоянным давлением.

Замена регулирующих ($F_5...F_{10}$) и регулируемых ($T_5...T_{10}$) параметров автоклава совокупностью четких термов позволяет построить систему продукционных правил для шестиконтурного нечеткого регулятора. Для контура с регулируемым параметром T_5 такая система имеет следующую структуру:

$$\begin{cases} \text{Если} \quad T_5 = T_{51+} v T_{52+} v ... v T_{58+} v T_{59+}, \quad \text{то } F_5 = 0; \\ \text{Если} \quad T_5 = T_{51-}, \quad \text{то } F_5 = F_{51} v T_{5k1}; \\ ..... \\ ..... \\ ..... \\ \text{Если} \quad T_5 = T_{58-}, \quad \text{то } F_5 = F_{58} v T_{5k8}; \\ \text{Если} \quad T_5 = T_{59-}, \quad \text{то } F_5 = F_{59} v T_{5k9}. \end{cases} \qquad (4)$$

Из (4) следует, что значение параметра T_5 поддерживается на уровне 190 °С с погрешностью ± 1 °С (рис. 2, а), а для компенсации влияния других контуров регулирования на параметр T_5 в консеквентны продукционных правил введены четкие термы $T_{5к1}...T_{5к9}$. Системы продукционных правил, относящиеся к регулируемым параметрам $T_6...T_{10}$, имеют аналогичную структуру.

Таким образом, предложена модель управления автоклавом на основе регулятора температуры с интервальной неопределенностью, обеспечивающей снижение объема бракованных шлакоблоков и экономию энергии, которые вызваны более точной компенсацией взаимного влияния контуров регулирования для технологической стадии «Изотермическая выдержка при постоянном давлении».

Список литературы

1. Бюллетень Счетной палаты Российской Федерации № 7 (55) 2002 г. Материалы с официального сайта Счетной Палаты РФ Состояние угольной отрасли (аналитическая записка по результатам проверок) http://www.budgetrf.ru/Publications/Schpalata/2002/schpal2002bull07/schpal552002bull7-14.htm (дата обращения 18.02.2016).

2. Васильев В.И. Интеллектуальные системы управления с использованием нечёткой логики: учебное пособие / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов. – Уфа: УГАТУ, 1995. – 101 с.

3. Гузаиров М.Б. Управление технологическими процессами, реализованное на четких логических регуляторах / М.Б. Гузаиров, Е.А. Муравьева. – М.: Машиностроение, 2012. – 305 с.

4. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // СТА. – 2007. – № 1. – С. 86–97. – 2008. – № 1. – С. 86–99.

5. Сазонова Т.В. Пат. 118566 Российская Федерация, B 01 J 3/04. Автоклав / Сазонова Т.В., Муравьева Е.А., Яппаров Ф.К.; заявитель и патентообладатель правообладатель – ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет». – № 2012107087/05; заявл. 27.02.2012; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.

6. Сазонова Т.В. Производство шлакоблоков автоклавного твердения из золошлакоотходов теплоэлектростанций: материалы XV Академических чтений РААСН – международная научно-техническая конференция «Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии» / Т.В. Сазонова, Л.Ю. Полякова. – Казань: КазГАСУ, 2010. – С. 183–187.

References

1. Bjulleten Schetnoj palaty Rossijskoj Federacii no. 7 (55) 2002 g. Materialy s oficialnogo sajta Schetnoj Palaty RF Sostojanie ugolnoj otrasli (analiticheskaja zapiska po rezultatam proverok) http://www.budgetrf.ru/Publications/Schpalata/2002/schpal2002bull07/schpal552002bull7-14.htm (data obrashhenija 18.02.2016).

2. Vasilev V.I. Intellektualnye sistemy upravlenija s ispolzovaniem nechjotkoj logiki: uchebnoe posobie / V.I. Vasilev, B.G. Iljasov. Ufa: UGATU, 1995. 101 p.

3. Guzairov M.B. Upravlenie tehnologicheskimi processami, realizovannoe na chetkih logicheskih reguljatorah / M.B. Guzairov, E.A. Muraveva. M.: Mashinostroenie, 2012. 305 p.

4. Denisenko V.V. PID-reguljatory: voprosy realizacii // STA. 2007. no. 1. pp. 86–97. 2008. no. 1. pp. 86–99.

5. Sazonova T.V. Pat. 118566 Rossijskaja Federacija, B 01 J 3/04. Avtoklav / Sazonova T.V., Muraveva E.A., Japparov F.K.; zajavitel i patentoobladatel pravoobladatel FGBOU VPO «Orenburgskij gosudarstvennyj universitet». no. 2012107087/05; zajavl. 27.02.2012; opubl. 27.07.2012, Bjul. no. 21.

6. Sazonova T.V. Proizvodstvo shlakoblokov avtoklavnogo tverdenija iz zoloshlakoothodov teplojelektrostancij: materialy XV Akademicheskih chtenij RAASN mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Dostizhenija i problemy materialovedenija i modernizacii stroitelnoj industrii» / T.V. Sazonova, L.Ju. Poljakova. Kazan: KazGASU, 2010. pp. 183–187.