

УДК 66-933.6

**Р.В. Федюн (канд. техн. наук, доц.), Т.В. Табаленкова, В.А. Попов (канд. техн. наук, доц.)**  
ГБУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк  
кафедра автоматики и телекоммуникаций  
E-mail: frv76@list.ru, tabalenkova@mail.ru

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ ТЭС

*Выполнен анализ системы химической очистки воды как объекта автоматического управления. Поскольку процесс химической очистки воды представляет собой совокупность нескольких процессов, то система автоматического управления представлена двумя контурами управления технологическими параметрами. Главным регулируемым параметром является значение рН в осветлителе, дополнительным, который представлен в виде возмущения, температура питательной воды в теплообменнике. Разработаны математические модели предложенных контуров САУ химической очистки воды. Выбраны регуляторы и определены их настроечные параметры. Выполненное моделирование динамических процессов в САУ подтвердило эффективность предложенных законов управления.*

**Ключевые слова:** химическая очистка воды, рН-параметр, температура питательной воды, система автоматического управления, ПИД-регулятор, математическое моделирование.

### Общая постановка проблемы

В настоящее время вода широко используется в различных отраслях промышленности в качестве теплоносителя, в том числе и в тепловой энергетике, но она не может применяться в теплоэнергетических установках без предварительной обработки, поскольку современные тепловые электростанции (ТЭС) в энергетическом цикле используют воду высокого качества. Оборудование современных ТЭС эксплуатируется при высоких тепловых нагрузках, что требует жесткого ограничения толщины отложений на поверхностях нагрева по условиям температурного режима их металла в течение рабочей кампании. Качество обработки воды на ТЭС тесным образом связано с надежностью и экономичностью эксплуатации современного высокоинтенсивного котлотурбинного оборудования, с безопасностью энергетических установок.

### Постановка задач исследования

Для создания системы автоматического управления процессом химической очистки воды необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ особенностей процесса химической очистки воды с точки зрения автоматического управления;
- получить математическое описание объекта управления по каждому контуру;
- разработать необходимые алгоритмы управления в САУ химической очистки воды с учетом технологических требований и ограничений;
- выполнить моделирование динамических режимов в контурах разработанной САУ для проверки эффективности предложенных алгоритмов управления.

### Решение задач и результаты исследований

Система химической очистки воды состоит из нескольких взаимосвязанных процессов. Первым процессом является подогрев питательной воды. На этой стадии происходит нагрев исходной воды паром с коллектора собственных нужд ТЭС на подогревателе сырой воды (ПСВ) до температуры  $30 \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Исходная вода поступает в пароподогреватель, куда подается и пар. Поскольку температура, до которой необходимо нагреть исходную воду строго задана ( $30^{\circ}\text{C}$ ), то поступление пара будет осуществляться при постоянном давлении, а нагрев

происходит за счет изменения расхода пара. На выходе из пароподогревателя получаем воду с заданной температурой, которая поступает в осветлитель, где и происходит начальный этап очистки воды. Вода поступает через распределительное устройство в воздухоотделитель, оттуда по отводящей линии через регулирующее сопло направляется в смесительную часть нижнего конуса осветлителя. Сюда же подается известковое молоко и раствор коагулянта. Перемешивание воды и реагентов обеспечивается за счет тангенциального подвода воды в коническую часть корпуса. Технологическая схема объекта представлена на рисунке 1.

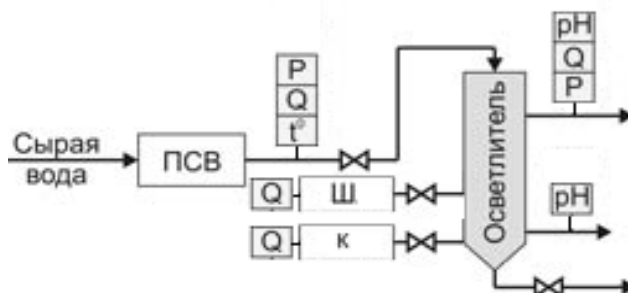


Рисунок 1 – Технологическая схема процесса химической очистки воды

Исходя из всего вышеприведенного, можно выделить два контура управления САУ:

- контур стабилизации температуры питательной воды в нагревательном теплообменнике;
- контур стабилизации рН-параметра в осветительном баке.

Первый контур, а именно стабилизация рН-параметра в осветительном баке, является основным (рис.2). Осветление воды состоит из двух процессов: известкования и коагуляции. Целью процесса коагуляции совмещенного с известкованием является получение на выходе воды с заданными показателями качества, значение рН которой будет соответствовать необходимому. Параметр рН необходимо поддерживать в диапазоне значений 10,1 – 10,2. Температура подогретой воды будет являться возмущением для данного процесса. Регулятор соотношения позволяет управлять, контролировать и изменять уровень рН. Изначально в осветлителе находится вода, нагретая до определенной температуры. Первым веществом подается кислота, расход которой определяется экспериментальным методом и колеблется в пределах от 0,25-0,75 мг-экв/л. Далее, в зависимости от расхода кислоты, будет определен расход щелочи. Расход кислоты ( $F_{\text{кис}}$ ) является ведущим потоком, а расход щелочи ( $F_{\text{щел}}$ ) – ведомым. Тогда основной технологической целью процессов коагуляции и известкования является получение очищенной воды с  $pH = 10,2$ , а целью управления будет стабилизация значения рН на выходе установки для процесса осветления воды (рис.2).

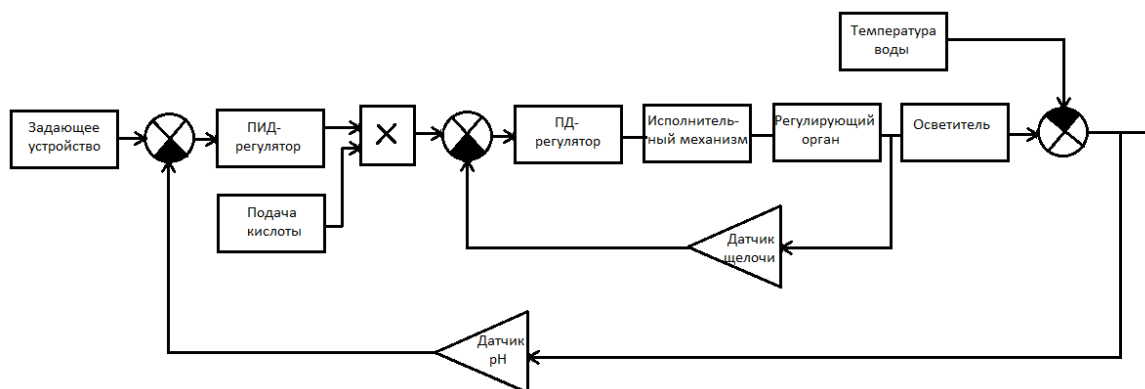


Рисунок 2 – Структурная схема САУ рН-параметром в осветлителе

Объект управления – осветлитель описывается дифференциальным уравнением первого порядка с запаздыванием [1,2], и поэтому его математическое описание имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1} e^{-p\tau}.$$

Для применяемого объекта эти значения равны:  $k = 0,02$ ,  $T = 25$  с,  $\tau = 9$  с [1,2].

Вентиль выполняет функции регулирующего органа. Примем, что подача щелочи, осуществляемая вентилем, пропорциональна углу ее открытия, изменяющегося от  $0^0$  до  $90^0$ . Это значит, что при максимальном открытии вентиля, равном  $90^0$ , подача щелочи в осветлитель максимальная и она равна 1920 мг-экв/час. Значит, вентиль может быть представлен пропорциональным звеном (усилителем), коэффициент усиления которого равен  $k = 1920/90 = 21,34$  (мг-экв/час)/(градус поворота).

Поскольку выходной величиной исполнительного механизма является угол поворота, а управляющей величиной является напряжение, которое приводит к вращению вала с частотой, пропорциональной напряжению якоря, то, учитывая, что угол поворота вала равен интегралу от частоты его вращения, можно представить двигатель постоянного тока блоком интегрирования. Этот блок интегрирует входную величину до тех пор, пока его выходной сигнал не достигнет граничных значений. Дальнейшее интегрирование осуществляется только тогда, когда сигнал становится таким, что изменение выходного сигнала направлено внутрь диапазона ограничения.

Датчик рН находится в главной обратной связи. Поскольку в блоке задающего устройства значение рН задается в единицах, то есть  $pH = 10,2$ , то при моделировании, для удобства восприятия результатов и задания уровней стабильного рН целесообразно задать значение усиления обратной связи, где находится датчик, равным единице. Естественно, при реализации САР этот момент учитывается, и усиление дополнительного усилителя обратной связи должно быть перенесено в усиление регулятора (путем перемножения). Тогда коэффициент преобразования будет равен  $k=20/10,2=1,96$  мА.

Датчик расхода щелочи представляется также пропорциональным звеном с коэффициентом усиления:  $k=20/1920=0,0104$  мА. Поскольку в данной системе необходимы два регулятора, то для внешнего контура управления выбран ПИД-регулятор, с передаточной функцией в следующей форме:

$$W_p(p) = k_{II} + \frac{k_{II}}{p} + T_d p.$$

На основе рекомендуемых значений [3,4] и путём экспериментального уточнения были получены настройки  $k_n = 2,8$ ;  $k_u = 0,1$ ;  $T_d = 2,8$ . Для внутреннего контура управления ПД-регулятор с передаточной функцией, которая представлена в следующем виде:

$$W_p(p) = k_{II} + T_d p.$$

Для данного регулятора получены настройки:  $k_p = 1$ ,  $T_d = 1$ .

Рассмотрим контур соответствующий возмущению, а именно стабилизацию температуры питательной воды. Основной регулируемой величиной подогревателя является температура питательной воды, которую требуется поддерживать на заданном уровне с высокой точностью.

Выполненный анализ процесса подогрева питательной вода позволил выделить управляющие, управляемые величины и возмущающие воздействия [5,6]. Управляющие воздействия: расход пара. Управляемые величины: температура питательной воды. Возмущающие воздействия: расход питательной воды.

Получим математическую модель САУ температуры в теплообменнике. На основании приведенной схемы объекта, исходя из поставленных задач, получена следующая структурная схема данного контура управления (рис. 3).

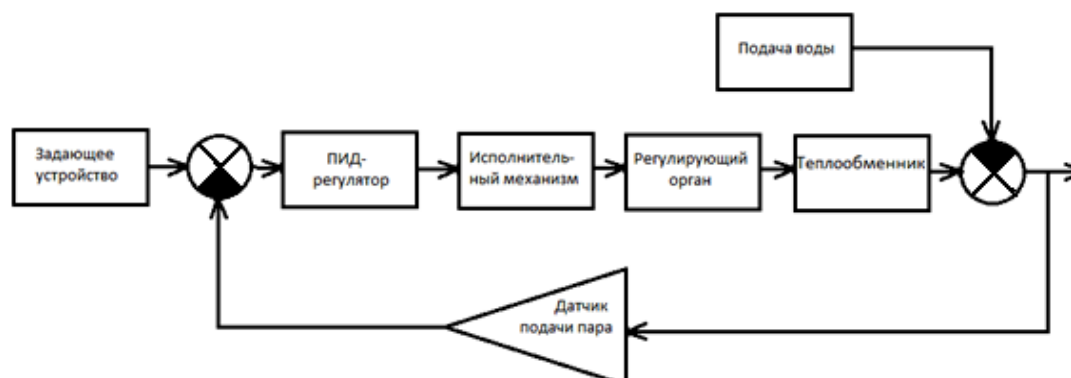


Рисунок 3 – Структурная схема САУ температуры в теплообменнике

Динамика объекта по каналу управления температурой жидкости на выходе описывается математической моделью в виде апериодического звена 1-го порядка с запаздыванием [6,7]:

$$W(p) = \frac{k_0}{T_0 p + 1} \cdot e^{-p\tau}.$$

Для применяемого объекта эти значения  $k_0 = 0,015$   $T_0 = 7,3$  с  $\tau = 2$  с [6,7].

Управляющее воздействие на пароподогреватель - изменение расхода пара реализуется при помощи регулирующего органа – регулирующей заслонки РЗ. По динамическим свойствам данный регулирующий орган можно описать реальным интегрирующим звеном [8,9]:

$$W_{pз}(p) = \frac{1}{T_{pз} p} \cdot \frac{k_{pз}}{T p + 1}.$$

Из технических характеристик регулирующей заслонки и ее электропривода определены параметры передаточной функции:  $T_{pз} = 1,1$  с;  $T = 1,4$  с;  $K_{pз} = 0,8$  кг/В·с. Для данного контура управления выбран ПД-регулятор с передаточной функцией в следующей форме:

$$W_p(p) = k_{п} + T_{д} p.$$

Для данного регулятора получены настройки:  $k_p = 13$ ,  $T_d = 80$  [3,4]. Используя данные значения, получена модель САУ химической очистки воды с предложенными алгоритмами управления (рис.4).

Результаты моделирования динамических процессов в САУ представлены на рисунках 5, 6, 7, 8. Анализ результатов моделирования показал удовлетворительное качество переходных процессов в рассмотренном контуре управления процессом химической очистки воды. Проведя отдельно моделирование возмущения (рисунок 5), а именно контура регулирования температуры в теплообменнике, можно сказать о качестве процесса нагрева. Время, за которое устанавливается значение, составляет 40 с; перерегулирование не превышает 5% и составляет 0,4%, установившееся значение соответствует требуемому, переведенному в электрический сигнал, а именно  $t = 20 \text{ мА} / 30^\circ \text{С} = 0,667 \text{ мА} / ^\circ \text{С}$ , а установившееся значение сигнала ошибки стремится к нулю.

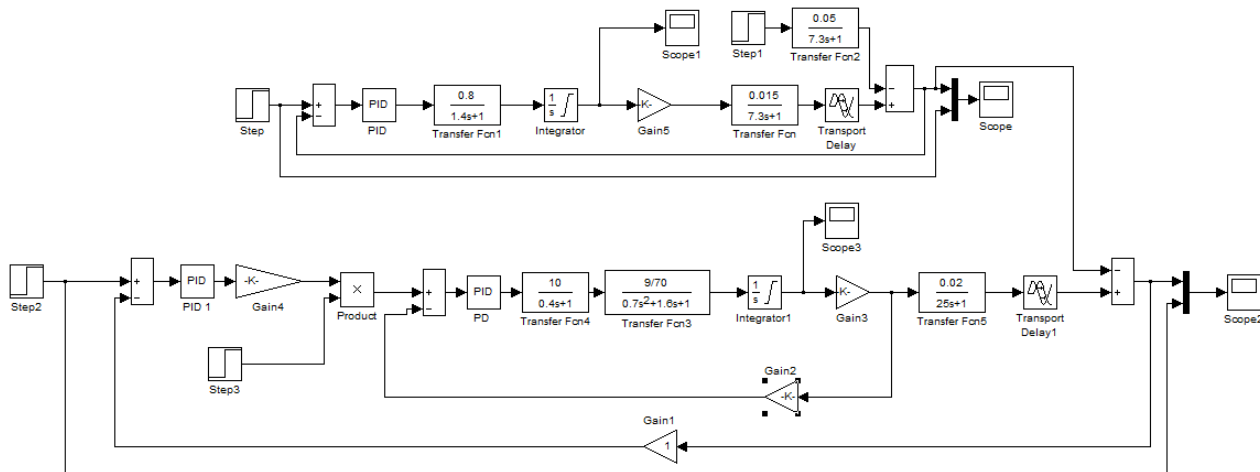


Рисунок 4 – Модель САУ процесса химической очистки воды при использовании выбранных законов регулирования

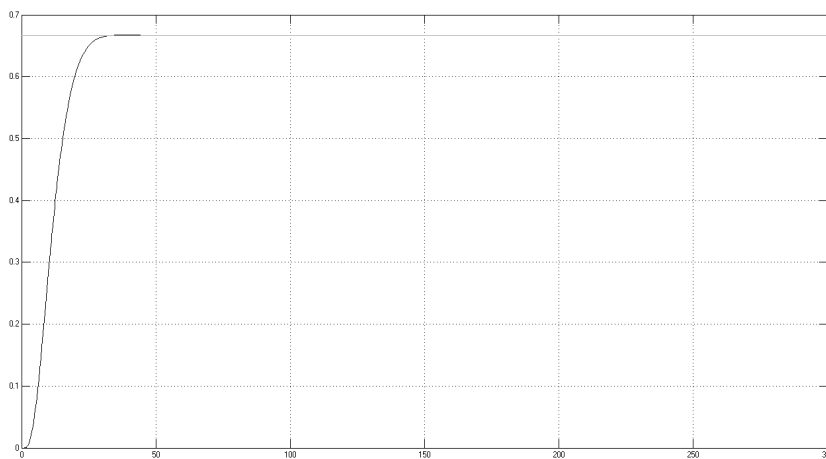


Рисунок 5 - Переходный процесс в САУ температуры с ПД-законом управления

Моделирование процесса осветления в целом так же показало положительный результат (рис. 6). Время, за которое устанавливается значение, составляет 100 с, что соответствует технологическому регламенту.

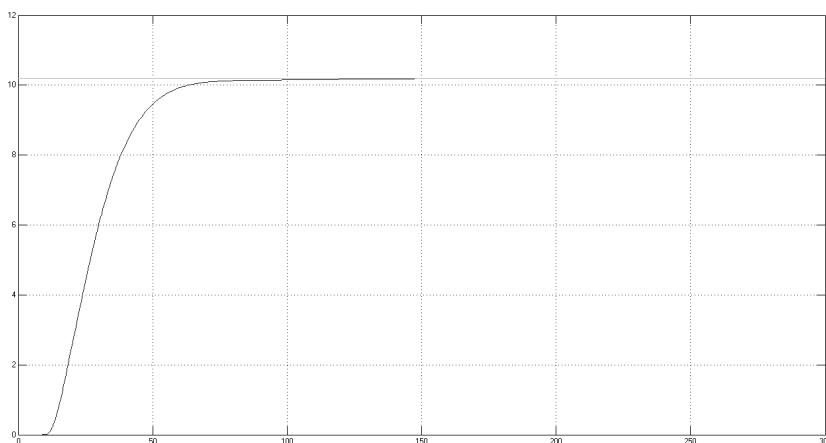


Рисунок 6 – Переходный процесс в САУ рН-параметра с ПИД и ПД-законом управления.

По переходной характеристике, представленной на рисунке 8, можно говорить о правильной и эффективной работе регулирующего органа, поскольку максимальный угол открытия вентиля составляет  $43^{\circ}$ . Как показывает практика, регулирующие органы не работают на максимальных углах, что составляет  $90^{\circ}$ .

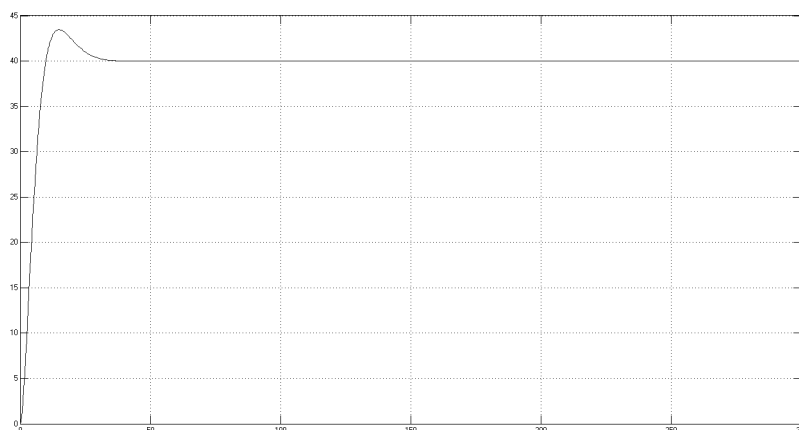


Рисунок 7 – Переходная характеристика, соответствующая положению регулирующего органа

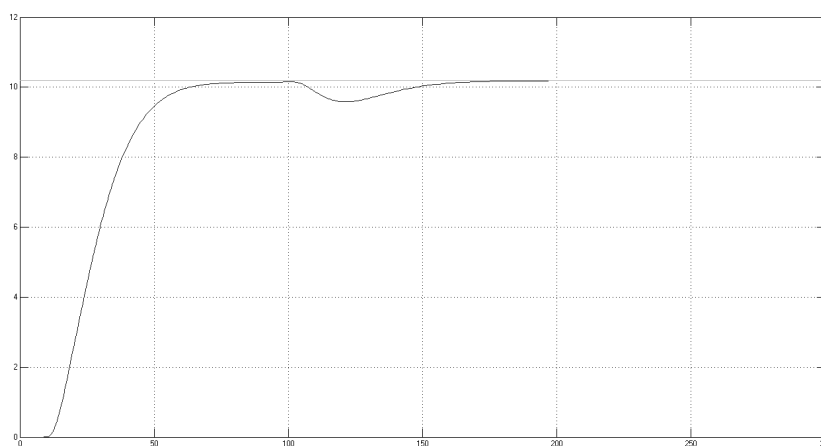


Рисунок 8 – Переходная характеристика САУ химической очистки воды с учетом возмущающих воздействий

Возмущающее воздействие приводит к небольшим допустимым отклонениям, которые восстанавливаются за допустимый промежуток времени, а именно 50 с, как показано на рисунке 9. Таким образом, предложенные законы регулирования с полученными настроечными параметрами подходят для САУ процесса химической очистки воды. Как видно из рисунка 9, значение выходной величины САУ точно соответствует требуемому уровню рН, процесс плавный, с достаточным быстродействием. Показатели качества САУ соответствуют требуемым.

#### **Выводы**

1. Выполненный анализ процесса химической очистки воды позволил представить его в виде совокупности взаимодействующих контуров управления.
2. Предложенные математические модели процесса химической очистки воды позволили исследовать динамические процессы в объекте управления, по результатам которых сделан вывод о необходимости синтеза новых алгоритмов управления.
3. Использование предложенных регуляторов с соответствующими настройками позволило устранить статическую ошибку, улучшить динамические показатели качества, что подтверждается результатами моделирования.

**Список использованной литературы**

1. Федюн Р.В., Попов В.А., Найденова Т.В. Принципы построения динамической модели процесса биохимической водоочистки. Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 20 (158).- Донецьк, ДВНЗ “ДонНТУ”, 2010. – с. 30 – 37.
2. Федюн Р.В., Найденова Т.В., Юрченко Р.В. Математична модель технологічного процесу біохімічного водоочищення. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск - 22(200) - Донецьк, ДонНТУ, 2012.- с. 48-55.
3. Dorf P., Bishop P. Современные системы управления.- М.: Лаборатория Базовых знаний.- 2002 - 832 с.
4. Лукас В.А. Теория управления техническими системами. Учебный курс для вузов. Екатеринбург: Издательство УГГГА, 2002.- 675 с.
5. Федюн Р.В., Абакумов А.Ю. Автоматическое управление теплоснабжением спортивного комплекса. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск - 1(24) - Донецьк, ДонНТУ, 2013. – с. 64-71.
6. Червинский В.В., Пазуха С.В. Математическая модель процессов теплообмена и дезинфекции воды в ваннах бассейнов. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск - 20(182) - Донецьк, ДонНТУ, 2011. - с. 74-81.
7. Турупалов В.В, Чернышев Н.Н., Прядко А.А. Математическое описание процесса теплообмена в противоточных теплообменных аппаратах. Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, Випуск 21 (183). - Донецьк, ДонНТУ, 2011. – с. 54 – 59.
8. Федюн Р.В., Попов В.О., Бунеев В.О. Автоматичне управління гідравлічними параметрами системи водопостачання. Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, Випуск 14 (129). - Донецьк, ДонНТУ, 2008. – с. 54 – 63.
9. Ефимов В.Т., Молчанов В.И., Ефимов А.В. Методы расчетов в автоматизации химико-технологических и теплоэнергетических процессов: Учебное пособие. Харьков, 1998.
10. Федюн Р.В., Абакумов А.Ю. Синтез САУ температурой в нагревательном теплообменнике системы теплоснабжения. «Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих.» Збірник наукових праць XIII науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 14-17 травня 2013 р. - Донецьк, ДонНТУ, 2013. – с.203-205.

**References**

1. Fedyun, R.V., Popov, V.A. and Naydyenova, T.V. (2010), “Principles of construction the dynamic model of the process a biochemical water treatment”, *Naukovi praci DonNTU. Serija: Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija*, Donetsk, DonNTU, vol. 20 (158), pp. 30 – 37.
2. Fedyun, R.V., Naydyenova, T.V. and Yurchenko, R.V. (2012), “A mathematical model of the process of biochemical water treatment”, *Naukovi praci DonNTU. Serija: Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija*, Donetsk, DonNTU, vol. 22 (200), pp. 48 – 55.
3. Dorf, R. and Bishop, R. (2002), “Sovremennye sistemy upravlenija”, Moscow, Laboratorija Bazovyh znanij.
4. Lukas, V.A. (2002), “Teorija upravlenija tehniceskimi sistemami”, Ekaterinburg, Izdatel'stvo UGGGA.
5. Fedyun, R.V. and Abakumov, A.Ju. (2013), “Automatic control system of heat supply in sport complex”, *Naukovi praci DonNTU. Serija: Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija*, Donetsk, DonNTU, vol. 1(24), pp. 64-71.

6. Chervinskij, V.V. and Pazuha, S.V. (2011), "Mathematical model of heat transfer and water disinfection baths pools", *Naukovi praci DonNTU. Serija: Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija*, Donetsk, DonNTU, vol. 20(182), pp. 74 – 81.
7. Turupalov, V.V., Chernyshev, N.N. and Prjadko, A.A. (2011), "Mathematical description of the heat transfer process in the countercurrent heat exchangers", *Naukovi praci DonNTU. Serija: Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija*, Donetsk, DonNTU, vol. 21(183), pp. 54 – 59.
8. Fedyun, R.V., Popov, V.A. and Buneev, V.A. (2008), "Automatic control by hydraulic parameters of the water supply system", *Naukovi praci DonNTU. Serija: Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija*, Donetsk, DonNTU, vol. 14 (129), pp. 54 – 63.
9. Efimov, V.T., Molchanov, V.I. and Efimov, A.V. (1998), "Metody raschetov v avtomatizacii himiko-tehnologicheskikh i teplojenergeticheskikh processov: Uchebnoe posobie", Har'kov.
10. Fedyun, R.V. and Abakumov, A.Ju. (2013), "ACS synthesis temperature in the heating system heat exchanger", *Zbirnik naukovih prac' XIII naukovo-tehnichnoi konferencii aspirantiv ta studentiv v m. Donec'ku, Avtomatyzacija tehnologichnyh ob'ektiv ta procesiv. Poshuk molodyh*, Donetsk, Ukraine, 14-17 May 2013, pp. 203-205.

Надійшла до редакції:  
31.03.2014р.

Рецензент:  
докт. техн. наук, проф. Ткаченко В.М.

**Р.В.Федюн, Т.В.Табаленкова, В.О.Попов**

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**

**Автоматизація процесу хімічного очищення води ТЕС.** Виконано аналіз системи хімічного очищення води як об'єкта автоматичного управління. Оскільки процес хімічного очищення води являє собою сукупність декількох процесів, то система автоматичного управління представлена двома контурами управління технологічними параметрами. Головним регульованим параметром є значення рН в освітлювачі, а побічним, який представлений у вигляді збурення, температура живильної води в теплообміннику. Розроблено математичні моделі запропонованих контурів САУ хімічного очищення води. Обрані регулятори та визначено їх параметри настройки. Виконане моделювання динамічних процесів в САУ підтвердило ефективність запропонованих законів управління.

**Ключові слова:** хімічне очищення води, рН-параметр, температура живильної води, система автоматичного управління, ПІД-регулятор, математичне моделювання.

**R.Fedyun, T.Tabalenkova, V.Popov**

**Donetsk National Technical University**

**Automating the process of chemical water treatment thermal power plant.** Chemical water treatment complex process, which is a set of subsystems, which consist of heat exchangers, fixtures, pipes, pumps, valves and motors that drive the system. Task of chemical water treatment is trouble-free operation of all components of the installation provided quality water purification and waste minimization, at the lowest cost her the greatest simplicity and reliability of a given water treatment system. Analysis of this question showed that the process of chemical water treatment is a multidimensional object, the effective functioning of which is impossible without modern automation systems. This paper examines two interrelated systems: stabilization of water temperature in the heat exchanger, the stabilization of pH-setting in an illuminator. Were obtained mathematical descriptions of each circuit and developed a mathematical model of the chemical treatment of water . PH- stabilization parameter in the illuminator is a complex system, which is implemented by means of the ratio regulator. For this system were needed two controls: for the external control loop was selected PID and internal PD controller whose settings were based on the recommended values and by experimental verification. Stabilization of the



temperature in the heat exchanger was presented as a perturbation for the first system. For this circuit was used PD controller. Was simulated resulting mathematical model of the chemical treatment of water. Analysis of the results showed satisfactory performance transients above. Simulation results, the following conclusions: the time during which the temperature parameter and pH- parameter set, match the technical task, the value of overshoot does not exceed 5 %, set to meet the required, set the value of the error signal to zero and the disturbance leads to small admissible deviations that are recovered for allowable time. Regulatory body is correct and effective, since the maximum valve opening angle is half of the maximum possible nominal values. Thus, the proposed regulation laws with those obtained tuning parameters showed quite a smooth process with sufficient speed and quality indicators ACS as desired.

**Keywords:** chemical water treatment, pH-setting, temperature of feed water, automatic control system, PID controller, mathematical modeling.



**Федюн Роман Валерьевич**, Украина, закончил Донецкий национальный технический университет, канд. тех. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – моделирование и автоматическое управление технологическими процессами в промышленности.



**Табаленкова Татьяна Викторовна**, Украина, магистратура в Донецком национальном техническом университете, факультет компьютерных информационных технологий и автоматизации, кафедра автоматизации и телекоммуникаций (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – моделирование и управление технологическими процессами в промышленности.



**Попов Владислав Александрович**, Украина, закончил Донецкий политехнический институт, канд. тех. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – автоматизация технологических процессов и производств.