

*Мақалада үшбұрышты тұрақтандырғыштарды зерттеу нәтижелері келтірілген. Ауаның рециркуляция аймағына абсолют шығыны, факел ұзындығы және басқа көрсеткіштердің үшбұрышты тұрақтандырғыштардың өлшемдерінен және де түрінен тәуелділігі келтірілген. Қосымша жасалған жану үрдісінің сандық модельдеуі тәжірибе нәтижелерін терең талдауға және де көркемдеуге үлкен әсерін тигізді.*

*The article presents the results of an experimental study of V-gutter flameholders. The dependences of the absolute flow rate in the recirculation zone, flame length and other parameters depending on the size and type of corner stabilizers were presented. Additionally, the numerical simulation of the combustion process, which allowed deeper analysis and improved the presentation was conducted.*

УДК 681.513.54

**О. Н. Евсеенко**

аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина  
e-mail: sendmeyouemail@mail.ru

## **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ**

*В статье представлена обработка результатов эксперимента и поиск оптимальных параметров управления для поддержания заданной температуры с наименьшей ошибкой управления. В статье рассматривается прикладная сторона решения – практическое применение метода наименьших квадратов для аппроксимации поверхности и нахождение оптимального соотношения параметров управления. Представлены результаты эксперимента по выводу температуры объекта на определенный уровень и поддержанию заданной температуры. Установлено, что выбор большого значения интервала предсказания или большой мощности нагревателя ухудшают качество управления.*

*Ключевые слова: управление температурным полем, предсказывающий фильтр, ШИМ-регулирование, эксперимент, метод наименьших квадратов.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Зона нечувствительности или транспортное запаздывание (dead time) [1] часто присутствует в системах управления как задержка между срабатыванием регулирующего органа и началом изменения регулируемого параметра объекта. В большинстве случаев величина этой задержки достаточно мала и ею пренебрегают.

Большинство процессов в промышленности контролируются за счет использования двух- трехпозиционных регуляторов или ПИД контроллеров [2]. Когда в процессах регулирования присутствует транспортное запаздывание, настройка ПИД-регулятора становится проблематичной и точность регулирования в замкнутой системе снижается. В связи с этим были приложены усилия для нахождения самого эффективного алгоритма настройки параметров ПИД контроллеров. На сегодняшний день существует ряд алгоритмов настройки ПИД-регуляторов для устойчивых и неустойчивых процессов с транспортным запаздыванием [3, 4], но они не могут обеспечить высокое качество управления для большого времени транспортного запаздывания. Поэтому если время транспортного запаздывания достаточно велико или требуется высокая точность управления, необходимо использовать системы с предсказанием.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

В качестве одного из методов, позволяющих управлять температурой объекта с предсказанием, можно считать метод ШИМ-регулирования с использованием предсказывающего фильтра [5, 6]. Для проверки эффективности данного метода в качестве объекта управления был выбран продолговатый полый стержень с намотанным на один конец нагревателем, датчики температуры, расположенные на поверхности полого стержня, микроконтроллер, содержащий модель объекта.

Далее, в соответствии с методом, для датчика температуры, расположенного на расстоянии 5 см от конца нагревателя, была получена реакция объекта управления на импульсы заданной длительности для нагревателей с мощностями равными 5 Вт, 11 Вт, 16 Вт, 25 Вт, 40 Вт, 50 Вт (рис. 1).

Для нагревателя мощностью 25 Вт и периодом предсказания равным 200 с проведен эксперимент для поддержания заданной температуры (рис. 2).

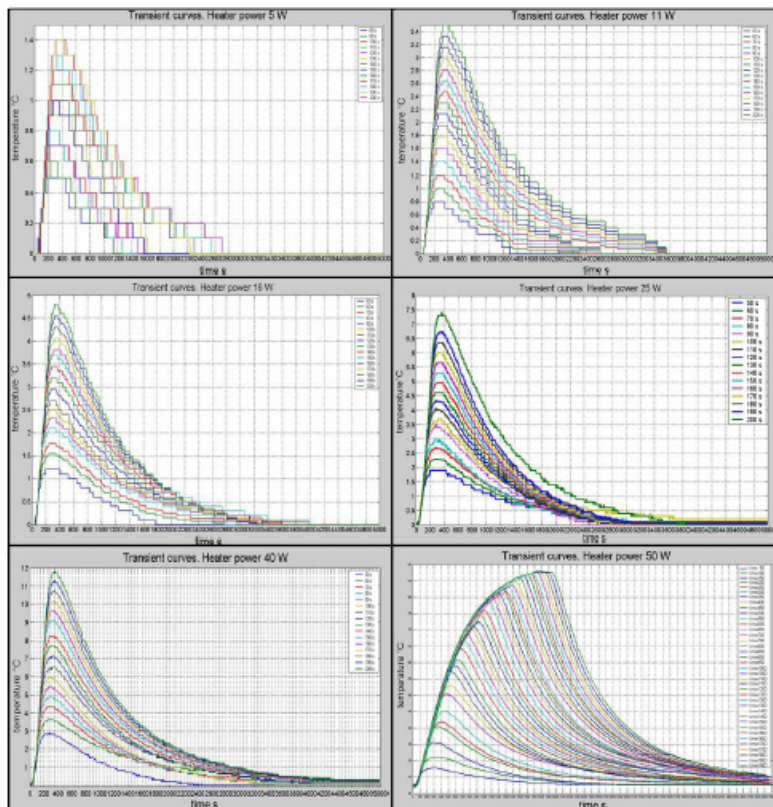


Рисунок 1 – Реакция объекта управления на импульсы заданной длительности

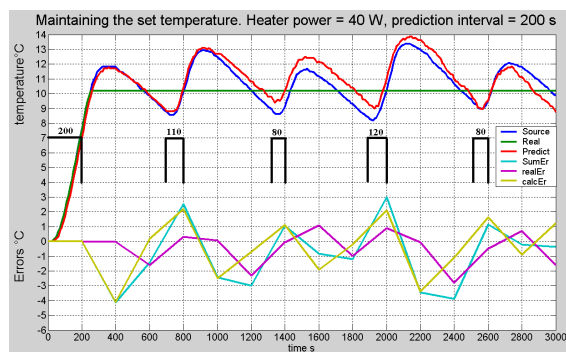


Рисунок 2 – Поддержание заданной температуры объекта управления

В результате эксперимента максимальное отклонение реальной температуры от заданной составило 4 °С, максимальная приведенная относительная погрешность измерений составила 40 %.

Величина данных погрешностей вызвана тем, что в соответствии с методом ШИМ-регулирования с предсказанием, импульс для компенсации величины ошибки рассогласования вырабатывается к концу интервала дискретизации. Однако при этом не учитывается величина перерегулирования от данного импульса (рис. 3).

Необходимо найти такое соотношение параметров длительности импульса и мощности нагревателя, чтобы ошибка эксперимента была минимальной или достигнуть максимальной точности регулирования.

После серии проведенных экспериментов по получению реакций объекта на импульсы заданной длительности (рис. 1) имеется набор из трёхмерных массивов, элементы которых можно рассматривать как точки поверхности. Необходимо обработать эти результаты и определить точки минимума/максимума поверхности.

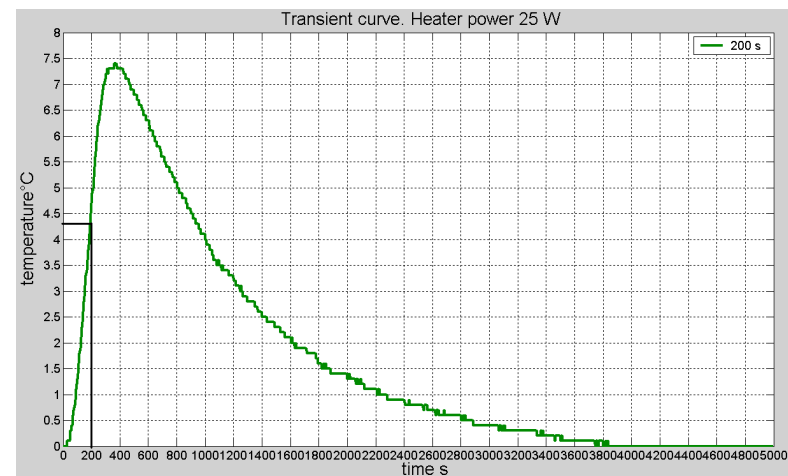


Рисунок 3 – Демонстрация ошибки перерегулирования

Для построения поверхности было выбрано 6 точек (табл. 1).

Таблица 1 – Выбранные узловые точки

№ точки	X, Вт	Y, с	Z
1	11.25	200	1.4/1.25
2	25	170	3.6
3	5	80	0.4/0.15
4	15.87	150	1.9/1.2
5	5	200	3/4
6	5	100	5/3

Где X – мощность нагревателя;

Y – длительность импульса;

Z – погрешность регулирования, равная отношению значения температуры перерегулирования к заданному значению температуры.

Построенный график по точкам представлен на рис. 4.

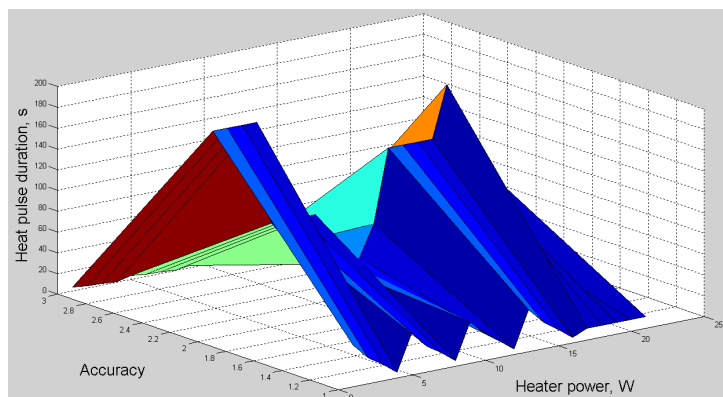


Рисунок 4 – График поверхности по выбранным узловым точкам

Взять за основу элемент, индекс которого имеет максимальное значение, недостаточно, поскольку данная точка может быть локальным минимумом/ максимумом или «ложным» пиком. Поэтому необходимо аппроксимировать выбранные данные некоторой поверхностью, затем получить уравнение этой поверхности и найти экстремум.

Для аппроксимации поверхности по заданным точкам был выбран метод наименьших квадратов. Суть метода заключается в минимизации суммы квадратов отклонений между фактическими и расчетными данными [7].

В качестве аппроксимирующей поверхности вращения была выбрана поверхность, задаваемая уравнением (1).

$$z = a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g \quad (1)$$

Далее, в соответствии с методом наименьших квадратов, получена функция, представляющая собой сумму квадратов отклонений известных точек от соответствующих точек на искомой поверхности (2).

$$f = \sum ([a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z]^2) \quad (2)$$

Затем необходимо найти такие значения коэффициентов a, b, c, d, f, g, при которых исходная функция будет минимизирована, то есть найти частные производные функции (3).

$$\begin{cases} \partial Q / \partial a = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot x^2) \\ \partial Q / \partial b = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot y^2) \\ \partial Q / \partial c = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot x \cdot y) \\ \partial Q / \partial d = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot x) \\ \partial Q / \partial f = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot y) \\ \partial Q / \partial g = \sum (2[a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + f \cdot y + g - z] \cdot 1) \end{cases} \quad (3)$$

При раскрытии скобок получено выражение (4).

$$\begin{cases} \sum (x^2 \cdot z) = a \cdot \sum (x^4) + b \cdot \sum (x^2 \cdot y^2) + c \cdot \sum (x^3 \cdot y) + d \cdot \sum (x^3) + f \cdot \sum (x^2 \cdot y) + g \cdot \sum (x^2) \\ \sum (y^2 \cdot z) = a \cdot \sum (x^2 \cdot y^2) + b \cdot \sum (y^4) + c \cdot \sum (x \cdot y^3) + d \cdot \sum (x \cdot y^2) + f \cdot \sum (y^3) + g \cdot \sum (y^2) \\ \sum (x \cdot y \cdot z) = a \cdot \sum (x^3 \cdot y) + b \cdot \sum (x \cdot y^3) + c \cdot \sum (x^2 \cdot y^2) + d \cdot \sum (x^2 \cdot y) + f \cdot \sum (x \cdot y^2) + g \cdot \sum (x \cdot y) \\ \sum (x \cdot z) = a \cdot \sum (x^3) + b \cdot \sum (x \cdot y^2) + c \cdot \sum (x^2 \cdot y) + d \cdot \sum (x^2) + f \cdot \sum (x \cdot y) + g \cdot \sum (x) \\ \sum (y \cdot z) = a \cdot \sum (x^2 \cdot y) + b \cdot \sum (y^3) + c \cdot \sum (x \cdot y^2) + d \cdot \sum (x \cdot y) + f \cdot \sum (y^2) + g \cdot \sum (y) \\ \sum (z) = a \cdot \sum (x^2) + b \cdot \sum (y^2) + c \cdot \sum (x \cdot y) + d \cdot \sum (x) + f \cdot \sum (y) + g \cdot \sum (1) \end{cases} \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4) параметры из таблицы 1, имеем выражение (5).

$$\begin{cases} 4.7195 \cdot 10^5 \cdot a + 3.0202 \cdot 10^7 \cdot b + 3.5881 \cdot 10^6 \cdot c + 21421 \cdot d + 1.7884 \cdot 10^5 \cdot f + 1078.4 \cdot g = 2917.6 \\ 3.0202 \cdot 10^7 \cdot a + 4.6824 \cdot 10^9 \cdot b + 3.1395 \cdot 10^8 \cdot c + 1.8116 \cdot 10^6 \cdot d + 2.58 \cdot 10^7 \cdot f + 1.478 \cdot 10^5 \cdot g = 2.482 \cdot 10^5 \\ 3.5881 \cdot 10^6 \cdot a + 3.1395 \cdot 10^8 \cdot b + 3.0202 \cdot 10^7 \cdot c + 1.7884 \cdot 10^5 \cdot d + 1.8116 \cdot 10^6 \cdot f + 10781 \cdot g = 24239 \\ 21421 \cdot a + 1.8116 \cdot 10^6 \cdot b + 1.7884 \cdot 10^5 \cdot c + 1078.4 \cdot d + 10781 \cdot f + 67.12 \cdot g = 153.14 \\ 1.78874 \cdot 10^5 \cdot a + 2.58 \cdot 10^7 \cdot b + 1.8116 \cdot 10^6 \cdot c + 10781 \cdot d + 1.478 \cdot 10^5 \cdot f + 900 \cdot g = 1603.5 \\ 1078.4 \cdot a + 1.478 \cdot 10^5 \cdot b + 10781 \cdot c + 67.12 \cdot d + 900 \cdot f + 6 \cdot g = 11.387 \end{cases} \quad (5)$$

В матричном представлении выражение (5) преобразуется в (6).

$$\begin{pmatrix} 4.7195 \cdot 10^5 & 3.0202 \cdot 10^7 & 3.5881 \cdot 10^6 & 21421 & 1.7884 \cdot 10^5 & 1078.4 \\ 3.0202 \cdot 10^7 & 4.6824 \cdot 10^9 & 3.1396 \cdot 10^8 & 1.8116 \cdot 10^6 & 2.58 \cdot 10^7 & 1.478 \cdot 10^5 \\ 3.5881 \cdot 10^6 & 3.1395 \cdot 10^8 & 3.0202 \cdot 10^7 & 1.7884 \cdot 10^5 & 1.8116 \cdot 10^6 & 10781 \\ 21421 & 1.8116 \cdot 10^6 & 1.7884 \cdot 10^5 & 1078.4 & 10781 & 67.12 \\ 1.7884 \cdot 10^5 & 2.58 \cdot 10^7 & 1.8116 \cdot 10^6 & 10781 & 1.478 \cdot 10^5 & 900 \\ 1078.4 & 1.478 \cdot 10^5 & 10781 & 67.12 & 900 & 6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ f \\ g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2917.6 \\ 2.482 \cdot 10^5 \\ 24239 \\ 153.14 \\ 1603.5 \\ 11.387 \end{pmatrix} \quad (6)$$

В результате использования метода Крамера получены значения коэффициентов (7).

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ f \\ g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 147 / 22063 \\ 9 / 26449 \\ -48 / 105367 \\ 89 / 2117 \\ -334 / 3065 \\ 1487 / 165 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Вычисленные значения коэффициентов (7) подставлены в уравнение (1). В результате получено уравнение аппроксимирующей поверхности (8).

$$z = \frac{147}{22063} \cdot x^2 + \frac{9}{26449} \cdot y^2 - \frac{48}{105367} \cdot x \cdot y + \frac{89}{2117} \cdot x - \frac{334}{3065} \cdot y + \frac{1487}{165} \quad (8)$$

Для проверки наличия экстремумов на поверхности необходимо определить частные производные первого порядка (8-9).

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial x} &= \frac{294}{22063} x - \frac{48}{105367} y + \frac{89}{2117} \\ \frac{\partial z}{\partial y} &= -\frac{48}{105367} x - \frac{18}{26449} y - \frac{334}{3065} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{294}{22063} x - \frac{48}{105367} y + \frac{89}{2117} = 0 \\ -\frac{48}{105367} x - \frac{18}{26449} y - \frac{334}{3065} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

В результате решения системы (9) получена критическая точка M1(2.3734;161.71).

Для определения типа экстремума необходимо найти частные производные второго порядка и вычислить значение частных производных в критической точке M1(2.3734;161.71).

$$\begin{aligned} A &= \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} (2.3734; 161.71) = \frac{294}{22063} \\ C &= \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} (2.3734; 161.71) = \frac{18}{26449} \\ B &= \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} (2.3734; 161.71) = -\frac{48}{105367} \end{aligned}$$

Выражение  $A \cdot C - B^2 > 0$ , поэтому точка M1(2.3734;161.71) является точкой минимума.

Результат полученной плоскости с заданными параметрами сетки в диапазоне от 0 с до 200 с шагом 0.1 для значений мощности нагревателя и длительности импульса представлен на рис. 5.

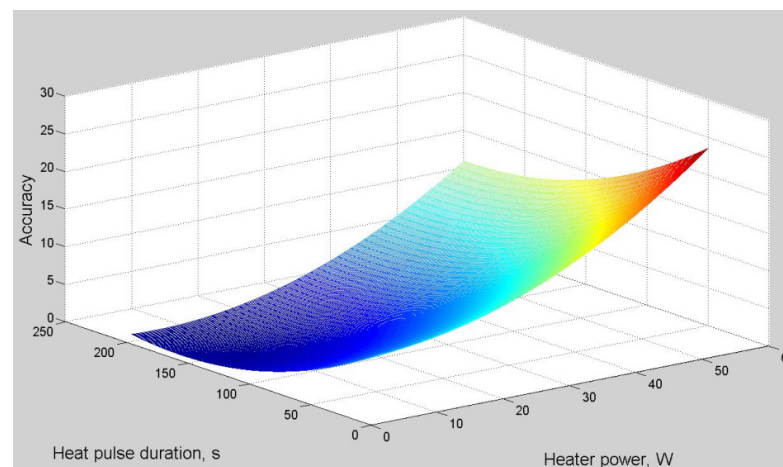


Рисунок 5 – Аппроксимированная поверхность по заданной сетке

Используя 2.3734 Вт в качестве мощности нагревателя, получены импульсы управления. Используя 161.71 с в качестве периода предсказания нагревателя, проведен эксперимент по поддержанию заданной температуры объекта (рис. 6).

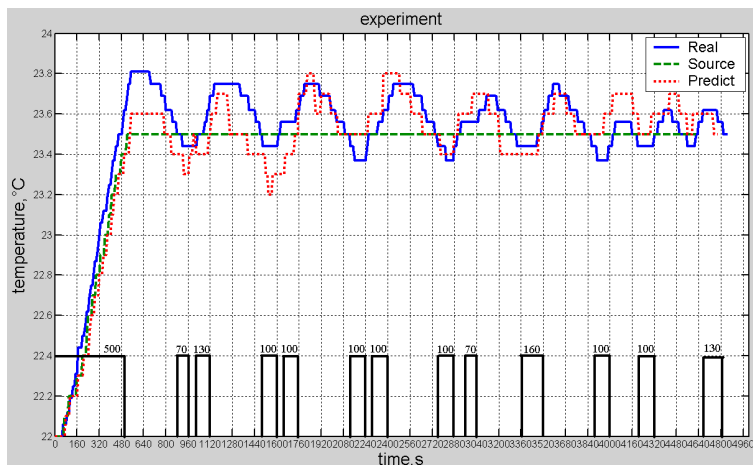


Рисунок 6 – Поддержание заданной температуры объекта с использованием оптимальных параметров регулирования

### ВЫВОДЫ

В данной статье представлены результаты применения метода ШИМ-регулирования с предсказанием для управления температурой объекта. Продемонстрировано применение метода наименьших квадратов для построения аппроксимирующей плоскости и поиска экстремума по полученным экспериментальным данным. Проведенный эксперимент с полученными оптимальными параметрами продемонстрировал хорошую точность управления. В результате эксперимента максимальное отклонение реальной температуры от заданной составило 0,25 градуса Цельсия.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Normey-Rico J. E.** Control of Dead-time Processes / J. E Normey-Rico, E. F. Camacho. – London : Springer-Verlag, 2007. – 462 p.
- 2 Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Е. С. Бондарь [и др.]. – Киев : Аванпост-Прим, 2005. – 560 с.
- 3 **Astrom, K. J.** PID Controllers Theory, Design, and Tuning / Astrom K. J., Hagglung T. – 2-nd ed. – USA, 1995. – 344 p.
- 4 **Ziegler, J. G.** Optimum settings for automatic controllers [Electronic resource] / J. G. Ziegler, N. B. Nichols // Transaction of the ASME. – 1942. – November. – P. 759–768. – Access mode: <http://chem.engr.utc.edu/Student-files/x2008-Fa/435-Blue/1942-paper.pdf>. – Title from screen.

5 **Качанов, П. А.** Поддержание заданной температуры инерционного объекта с использованием ШИМ-регулирования с предсказанием / П. А. Качанов, О. Н. Евсеенко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Сер. Автоматика та приладобудування : зб. наук. пр. – Харків, 2014. – № 67. – С. 18-28.

6 Спосіб програмного управління тепловим об'єктом з застосуванням широтно-імпульсної модуляції : пат. на корисну модель № 81276 Україна: МПК G05D 23/19 (2006.01) / Савицький С. М., Гапон А. І., Качанов П. О., Євсеєнко О. М., Вискребенцев В. О. ; заявник Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – № u201300059 ; заявл. 02.01.2013 ; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с.

7 **Лоусон, Ч.** Численное решение задач метода наименьших квадратов : пер с англ. / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М. : Наука, 1986. – 232 с.

Материал поступил в редакцию 10.03.16.

*О. Н. Евсеенко*

**Експеримент нәтижелерін өңдеу және кіші квадраттар әдісін пайдалана отырып бакылау оңтайлы параметрлерін іздеу**

Ұлттық Техникалық Университеті

«Харьков политехникалық институты», Харьков, Украина.

Материал 10.03.16 баспаға түсті.

*O. N. Evseenko*

**Processing of the experiment results and the search for optimal control parameters using the least squares method**

National Technical University

«Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine.

Material received on 10.03.16.

*Мақалада эксперимент нәтижелерін өңдеу және басқарудың аса төмен қатемен келтірілген температураны ұстап тұруға арналған басқарудың оңтайлы параметрлерін іздестіру келтірілген. Зерттеу жұмысында шешімнің қолданбалы жағы – аса төмен квадраттар әдісін практикалық қолдануға арналған басқарудың параметрлерінің оңтайлы арақатысын табу және бетінің аппроксимациясы. Нысанның температурасын белгілі деңгейге шығару және белгіленген температураны ұстап тұру бойынша эксперимент нәтижелері келтірілген. Болжамалы интервалдың жоғары мәнін немесе жылытқыштың үлкен қуатын таңдау басқарудың сапасын төмендететіні анықталған.*

*The article is devoted to the temperature control of objects with lumped and distributive parameters. The results of maintaining the desired temperature with the smallest error control are presented. The article deals with the practical application of the least squares method of approximating the equation of a surface and finding the optimum control parameters. The problems of choosing the right value of heater power of regulator and prediction period are discussed. It is concluded that algorithm of PWM-control with prediction filter provides good quality control.*

УДК 621.182.448(574.25)

**К. Х. Жапаргазинова<sup>1</sup>, Р. А. Ахметкалиева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>к.х.н., профессор; <sup>2</sup>магистрант, Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар

## **УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ ЗА СЧЕТ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*В статье рассмотрены различные методы очистки теплообменного оборудования от накипи и отложений солей в зависимости от химического состава.*

*Ключевые слова: теплообменная аппаратура, накипь, химическая очистка, оборотная вода, скорость коррозии, жесткость воды.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Теплообменная аппаратура составляет порядка 40 % от общей доли технологического оборудования нефтеперерабатывающих производств. В процессе длительной работы внутренняя поверхность трубного пространства теплообменников подвергается загрязнению и износу. Очистка внутренней поверхности труб теплообменного оборудования от отложений играет большую роль в стабильной работе как отдельных единиц, так и блоков аппаратуры. Несвоевременная очистка теплообменника, а тем более полный отказ от неё, приводит не только к постоянному увеличению энергетических затрат на производство, но и к сравнительно высоким разовым расходам на восстановление рабочих параметров, а некоторых случаях, и на устранение аварийных ситуаций. Причинами снижения эффективности их работы и выхода теплообменного оборудования из строя, приводящие к ремонту теплообменников, остаются общими для любых теплообменников являются

некачественная водоподготовка, нарушение технологического режима на рабочей поверхности.

Теплообменник – устройство, в котором осуществляется теплообмен между двумя теплоносителями, имеющими различные температуры. По принципу действия теплообменники подразделяются на рекуператоры и регенераторы. В рекуператорах движущиеся теплоносители разделены стенкой. Основная часть накипи и солевых отложений оседает на внутренних стенках теплообменника а также на на внутренних пучках, что приводит к быстрому износу оборудования.

Теплообменные аппараты, в которых одновременно с теплообменом протекают и смежные процессы, такие как фазовые превращения, конденсация, испарение, смешение. Аппараты имеют свои наименования: конденсаторы, испарители, градирни, конденсаторы смешения. В зависимости от направления движения теплоносителей рекуперативные теплообменники могут быть прямоточными при параллельном движении в одном направлении, противоточными при параллельном встречном движении, а также при взаимно поперечном движении двух взаимодействующих сред. Основным теплоносителем является вода [1].

Для очистки теплообменной аппаратуры используют химическую, абразивную или специальную очистку.

Химическая очистка осуществляется без вскрытия теплообменника. Для очистки от накипи применяют 5-15 % раствор соляной кислоты с добавками ингибиторов. Для очистки от органических отложений используются углеродородные растворители. Очистка от твердых отложений путем заполнения теплообменника на сутки 5 % раствором соляной кислоты с добавкой жидкого стекла. Твердый осадок разрыхляется в этом растворе и затем легко смывается водой [2].

Абразивная очистка подразделяются на механическую, гидropневматическую, гидромеханическую и пескоструйную.

В Казахстане распространена механическая очистка теплообменной аппаратуры. Чистку проводят щеткой и под сильным напором воды, который очищает стены трубок и пучков от накипи. В ходе такой очистки возможны механические повреждения: стены труб истончаются, трубки быстрее изнашиваются и приводит к негодности аппарата.

В ходе механической очистки если пучки повреждаются или являются неисправными, допустимо заколотить 20 % пучков в аппарате с обеих сторон. Большее количество становится не рентабельным и сказывается на работе аппарата.

Для химической очистки рекомендуется подбирать реагенты в зависимости от вида отложений, выявленных на внутренних поверхностях очищаемого теплообменника, так как кислоты в различной степени реагируют с разными видами отложений