

- перепад температуры подогрева воздуха за период дутья 67 °С;
- коэффициент регенерации теплоты 77,1 %;
- масса насадки 59,2 кг для одной горелки, а для двадцати горелок – 1184 кг;
- аэродинамическое сопротивление насадки 196 Па.

### Список использованных источников

1. Технический паспорт проходной печи с роликовым подом стана № 3, инв. № 25939 установленной в трубоволочильном цехе ЗАО «Никопольский завод нержавеющей труб», 2006. 36 с.
2. Губинский В.И., Воробьева Л.А., Еремин А.О. Алгоритм расчета трубчатого теплообменника регенеративной горелки // *Металлургическая теплотехника: сб. научн. тр. Национальной металлургической академии Украины*. 2009. С. 87–94.
3. Патент на винахід № 92293. Трубна насадка регенеративного теплообмінника; Губинський В. Й., Губинський М. В., Воробйова Л. О., Єрьомін О. О., Сибір А. В. Номер заявки: А2009 123 49; Заявл. 30. 11. 2009. Опубл. 11.10.2010. Бюл. № 19.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА ВТОРОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

**Воронцов Е.Ю., Лисиенко В.Г., Пономарев Н.Н.**  
*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
г. Екатеринбург, Россия*

Задача эффективного управления технологическими процессами остается актуальной проблемой для предприятий различных отраслей промышленности. Одним из составляющих факторов комплексной проблемы задачи управления является автоматическое поддержание технологических параметров на заданном уровне. С этой целью на предприятиях широко используются ПИД-регуляторы [1].

Настройка регуляторов может быть осуществлена несколькими способами, при этом она зависит от динамических параметров системы. Методы настройки регулятора позволяют определить параметры регулятора в аналитической форме или получать алгоритмы определения параметров настройки. Они позволяют системе управления оставаться устойчивой и достигать заданной цели. Эти методы требуют определенных знаний об управляемых процессах.

Большинство методов настройки ПИД-регуляторов основано на использовании в качестве объекта управления апериодического звена первого порядка, и, следовательно, не могут дать точной настройки и требуемого качества регулирования [2; 3]. В данной статье рассмотрим такие методы настройки, как AMIGO, А.П. Копеловича и Зиглера–Никольса.

Используя современные аппаратное и программное обеспечение можно настроить ПИД-регулятор, опираясь на реальные передаточные функции, описывающие различные технологические процессы. В связи с этим актуальным является представление объекта управления звеном более высокого порядка. В данной статье мы представим объект управления как апериодическое звено второго порядка с запаздыванием

Метод настройки AMIGO был получен путем практического исследования систем управления и анализом их свойств (производительность, устойчивость и т.п.) [4; 5].

При настройке методом AMIGO передаточная функция объекта управления:

$$G(s) = \frac{1}{(Ts + 1)^2} \quad (1)$$

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид

$$C(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + s T_d \right] \quad (2)$$

Выражения для определения настроек по методу AMIGO имеют вид:

$$K_c = \left( 0,2 + 0,45 \frac{T}{\tau} \right), \quad (3)$$

$$T_i = \left( \frac{0,4\tau + 0,8T}{\tau + 0,1T} \right) \tau, \quad (4)$$

$$T_d = \left( \frac{5\tau T}{0,3\tau + T} \right) 0,1. \quad (5)$$

Метод А.П. Копеловича базируется на представлении передаточной функции объекта управления в форме

$$G(s) = \frac{k}{(Ts + 1)} e^{-s\tau} \quad (6)$$

для статических объектов управления и в форме

$$G(s) = \frac{k}{s} e^{-s\tau} \quad (7)$$

для астатических объектов управления.

Метод А.П. Копеловича позволяют получить три оптимальных процесса регулирования: апериодический с минимальным временем регулирования, с двадцати процентным перерегулированием и с минимальным среднеквадратичным отклонением от задания.

Опыты для определения оптимальных настроек проводили на электронной моделирующей установке и на промышленных объектах. Эти опыты позволили уточнить данные, приведенные в [6], и определить настройки для тех типов регуляторов и процессов, которые раньше не рассматривались.

Приближенные значения оптимальных настроек для апериодического процесса могут быть просчитаны по формулам

$$K_c = \frac{0,95}{k_{об} \tau / T}; \quad (8)$$

$$T_i = 2,4\tau; \quad (9)$$

$$T_d = 0,4\tau. \quad (10)$$

Недостатки метода Копеловича состоят в невозможности использования в расчетах передаточной функции общего вида и ограниченном количестве типов переходных процессов.

Метод Зиглера–Никольса [7], или метод незатухающих колебаний, применим для настройки систем автоматического регулирования с объектом управления, передаточная функция которого задана полиномами произвольных степеней. Согласно методу вначале определяются значения критического коэффициента передачи  $K_u$  и критической постоянной времени  $T_u$ , при которых система находится на границе устойчивости. Далее значения настроек рассчитываются по формулам [8], приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Формулы расчета настроек по методу Зиглера–Никольса

Регулятор	$K_c$	$T_i$	$T_d$
П	$K_u/2$	–	–
ПИ	$K_u/2,2$	$T_u/1,2$	–
ПИД	$K_u/1,7$	$T_u/2$	$T_u/8$

Объект управления представлен передаточной функцией второго порядка:

$$G_1(s) = \frac{1 \cdot e^{-5s}}{(3s + 1)(s + 1)}. \quad (11)$$

После аппроксимации по методу, изложенному в [9], приводим объект управления к виду (6):

$$G_1(s) = \frac{0,99 \cdot e^{-5,64s}}{2,85s + 1}, \quad (12)$$

где  $k_{об} = 0,99$ ;  $T = 2,85$  с;  $\tau = 5,64$  с.

Критерий приближения (11) к (12) переходной характеристики основан на точном совпадении частотных свойств объекта в пределах полосы пропускания.

Система управления с ПИД-регулятором представлена на рис. 1. Значения рассчитанных значений настроек приведены в табл. 2. Рассчитанные значения показателей качества регулирования приведены в табл. 3.

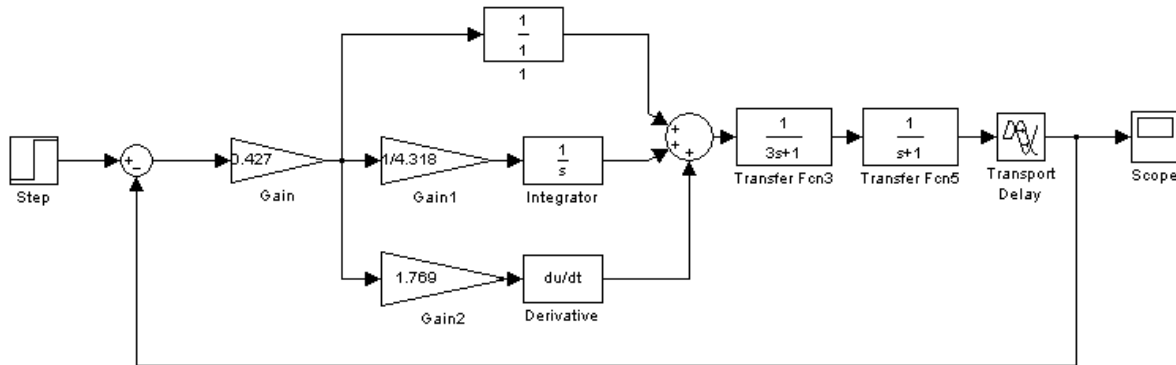


Рис. 1. S-модель системы управления с объектом второго порядка

Таким образом, в статье были рассмотрены методы настройки ПИД-регулятора, такие как AMIGO, А.П. Копеловича и Зиглера–Никольса, на примере моделирования системы автоматического регулирования с объектом управления второго порядка с запаздыванием в программной среде Matlab.

Таблица 2

Значения рассчитанных значений настроек регулятора

Метод	$K_c$	$T_i$	$T_d$
AMIGO	0,432	4,3178	1,7695
Копеловича	0,485	6,84	1,14
Зиглера–Никольса	0,962	7,75	1,938

Были аналитически вычислены настройки ПИД-регулятора ( $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ) согласно алгоритмам каждого из рассмотренных методов (табл. 2). В пакете расширения Simulink была создана S-модель системы управления (рис. 1) и промоделирована реакция системы на единичный ступенчатое воздействие, после чего построили графики переходных процессов при настройке ПИД-регулятора каждым из методов (рис. 2).

По графикам переходных процессов определили показатели качества регулирования (см. табл. 3) и сделали следующие выводы.

Таблица 3

Рассчитанные значения показателей качества регулирования

Метод	время нарастания, $t_n$ , с	быстродействие, $t_{уст}$ , с	перерегулирование, %	интегральный квадратичный критерий качества
AMIGO	19,3	40	4	8,67
Копеловича	200	92	0	8,06
Зиглер–Никольса	14,2	28	15	13,52

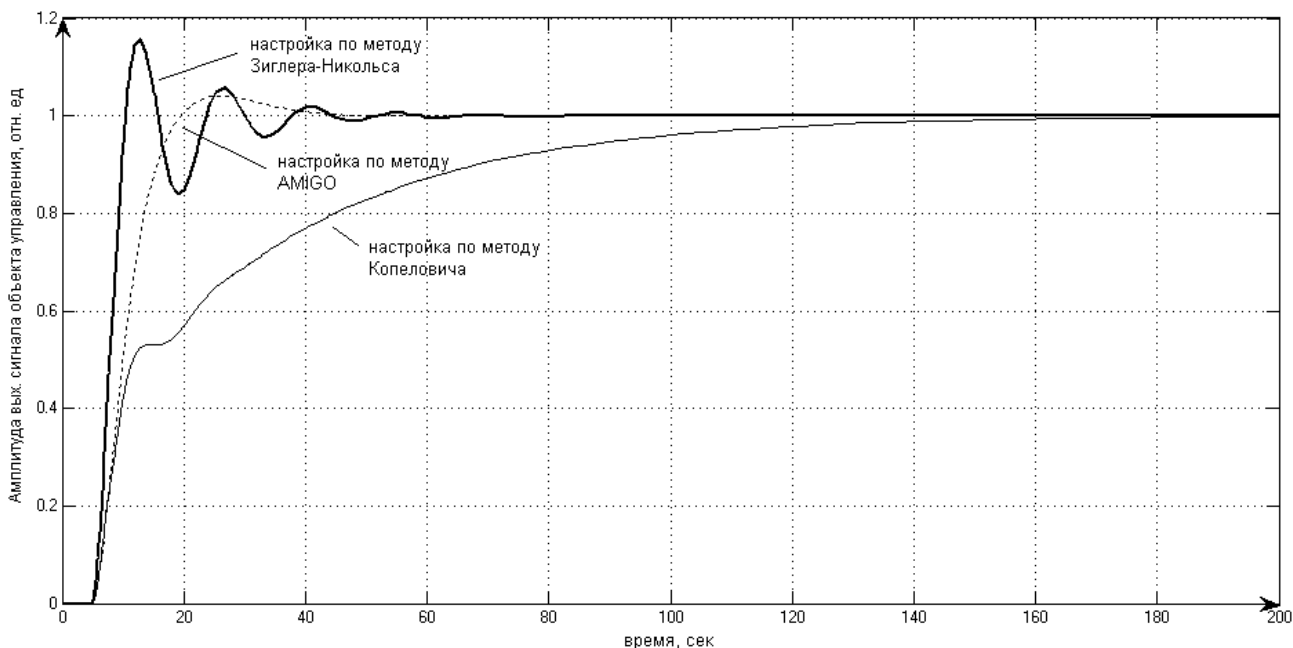


Рис. 2. Реакция системы на единичное ступенчатое воздействие

Метод настройки AMIGO обладает более высоким показателем быстродействия и малым временем регулирования по сравнению с остальными методами настройками. Данный метод можно использовать для настройки процессов высоко-инерционных объектов с запаздыванием, например, таких как электрическая печь сопротивления, в которой уменьшение времени нагрева до заданной температуры позволит существенно снизить расход потребляемой электрической энергии.

Метод настройки А.П. Копеловича имеет весьма низкое быстродействие и не имеет перерегулирования. Его можно использовать для тех типов процессов, к которым не предъявляют жестких требований по быстродействию.

Метод настройки Зиглера–Никольса никак не учитывает требования к запасу устойчивости системы. Судя по медленному затуханию переходного процесса в системе, этот метод даёт слишком малый запас устойчивости. Однако часто он используется только для генерации начальных приближений параметров, которые затем уточняются методами оптимизации и с помощью нечётких правил.

Следует отметить, что в статье была использована модель идеального ПИД-регулятора. Для настройки реальных объектов необходимо использовать модель, рассмотренную в [10].

### Список использованных источников

1. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. 2008. №1. С. 86–99.
2. Guillermo J. Silva, Aniruddha Datta. S. P. Bhattacharyya. PID Controllers for Time-Delay Systems. Boston. ISBN 0–8176–4266–8.2005.
3. Cominos P. and Munro N. PID Controllers: Recent Tuning Methods and Design to Specification. IEE Proc. D. Control Theory and Applications. 2002. Vol. 149. No. 1. P. 46–53.
4. Hang C.C., Astrom K.J. and Ho W.K. Refinement of Zigler–Nichols Tuning Formula. IEE Proc. Pt. D. 1991. Vol. 138. P. 111–118.
5. Astrom K.J. and Hagglund. The Future of PID Control. IFAC J. Control Engineering Practice. 2001. Vol. 9. P. 1163–1175.
6. Чесноков Ю.Н., Гусев О.А. Проектирование систем регулирования на ПК / под ред. В.В. Муханова. Екатеринбург: УГТУ, 1999. 108 с.
7. Автоматическое управление в химической промышленности / под ред. Е.Г. Дудникова. М.: Химия, 1987.

8. Ziegler J.G. and Nichols N.B. Optimum Settings for Automatic Controllers. Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759–768.
9. Ala Eldin Abdallah Awouda and Rosbi bin Mamat. New PID Tuning Rule Using ITAE Criteria. International Journal of Engineering (IJE). Vol. 3. Issue 6. January 2010. P. 597–608.
10. Ротач В.Я. Расчет настройки реальных ПИД-регуляторов // Теплоэнергетика. 1993. №10. С. 31–35.

## ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ СФЕРИЧЕСКОЙ ЛУНКИ НА ТЕПЛООБМЕН

**Гусаков А.А., Митяков В.Ю., Можайский С.А.**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

Одним из способов интенсификации теплообмена в металлургии является нанесение на теплообменные поверхности сферических лунок. Несмотря на интерес к интенсификации теплообмена с помощью лунок, оптимальная форма и взаимное расположение лунок до сих пор не установлены. Эта задача имеет столько взаимовлияющих факторов, что изначально представляет интерес разобраться с влиянием на теплообмен одиночной лунки на поверхности. В работе исследуется влияние относительной глубины лунки на интенсификацию теплообмена.

Для экспериментов изготовили модели в виде коробчатой конструкции одиночных лунок с относительной глубиной 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5. Стенки модели выполнены из листовой меди толщиной 0,6 мм. Таким образом, поверхность модели имеет постоянную температуру, близкую к 100 °С (рис. 1).

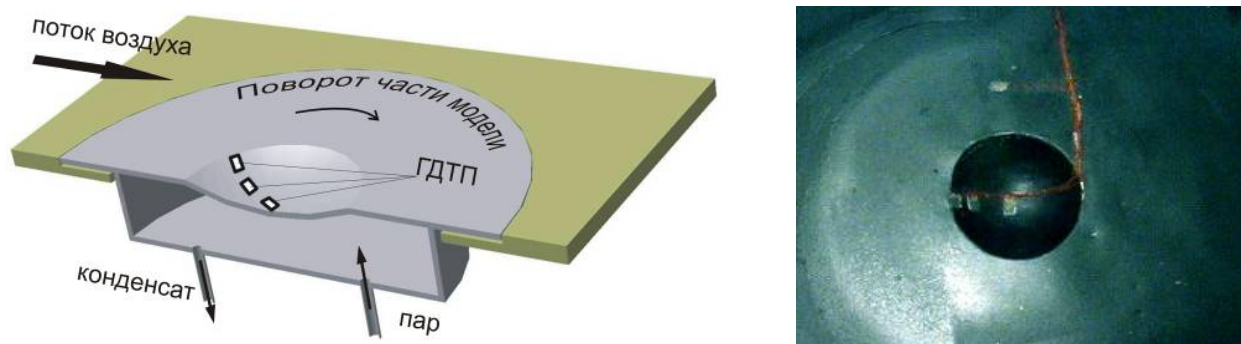


Рис. 1. Схема и внешний вид поворотной модели

Модели с лункой обдували воздухом в рабочей части аэродинамической трубы кафедры «Теоретические основы теплотехники» СПбГПУ. Труба позволяет вести опыты при скоростях потока 0,3 ... 50 м/с, причем степень турбулентности потока  $Tu \leq 0,3$  %.

В наших экспериментах было предложено устанавливать градиентные датчики теплового потока (ГДТП) [1] по одной образующей лунки, а также на пластине. Для получения данных по всей поверхности лунки модель поворачивалась вокруг оси лунки. Для обеспечения условий обтекания, не зависящих от угла поворота пластины, была сделана модель с центральной подвижной частью, и внешней неподвижной. Подвижная часть соединялась со специальным поворотным столом, позволяющим поворачивать ее вокруг оси с точностью 1°. Неподвижная часть крепилась в рабочей части аэродинамической трубы. При переходе