

14. Слободской М.И., Попов Л.Е. Особенности работы источника Франка-Рида в поле случайно расположенных препятствий // Известия АН. Сер. физическая. – 1998. – Т. 62. – № 7. – С. 1339–1344.
15. Нацик В.Д., Чишко К.А. Акустическая эмиссия при образовании дислокационного скопления источником Франка-Рида // Физика твердого тела. – 1978. – Т. 20. – № 7. – С. 1933–1936.
16. Нацик В.Д., Чишко К.А. Динамика и звуковое излучение дислокационного источника Франка-Рида / Физика конденсированного состояния: сб. трудов ФТИНТ АН УССР. – 1974. – Вып. 33. – С. 44–53.
17. Вихорь Н.А., Колупаева С.Н., Попов Л.Е. Движение дислокаций при формировании полосы кристаллографического скольжения // Физика металлов и материаловедение. – 1995. – Т. 80. – № 4. – С. 51–57.
18. Попов Л.Е., Колупаева С.Н., Вихорь Н.А., Пуспешева С.И. Дислокационная динамика кристаллографического скольжения // Известия вузов. Физика. – 2000. – № 1. – С. 71–76.
19. Popov L.E., Kolupaeva S.N., Vihor N.A., Puspeshcheva S.I. Dislocation dynamics of elementary crystallographic shear // Computational Materials Science. – 2000. – V. 19. – P. 267–274.
20. Пуспешева С.И., Колупаева С.Н., Попов Л.Е. Динамика кристаллографических скольжений в меди // Металловедение. – 2003. – № 9. – С. 14–19.
21. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. Концепция упрочнения и динамического возврата в теории пластической деформации // Известия вузов. Физика. – 1982. – № 6. – С. 56–82.
22. Попов Л.Е., Кобытев В.С., Ковалевская Т.А. Пластическая деформация сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 182 с.
23. Самохина С.И., Петелин А.Е., Колупаева С.Н. Исследование дислокационной динамики кристаллографического скольжения. База данных программного комплекса DDSC // Прикладные задачи математики и механики: Матер. XV Междунар. науч. конф. ученых Украины, Беларуси, России. – Севастополь, 2007. – С. 274–277.
24. Самохина С.И., Петелин А.Е., Колупаева С.Н. Интерфейс программного комплекса DDSC для исследования дислокационной динамики кристаллографического скольжения // Научное творчество молодежи: Матер. XII Всеросс. научно-практ. конф. – Томск, 2008. – Ч. 1. – С. 35–38.

Поступила 14.04.2010 г.

УДК 681.52

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОЗОННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ПО МЕТОДУ БРИДЖМЕНА

М.М. Филиппов, Ю.В. Бабушкин, А.И. Грибенюков*, В.Е. Гинсар*

Томский политехнический университет

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

E-mail: imces@yandex.ru

Представлено описание системы автоматического регулирования многозонной термической установкой для выращивания монокристаллов методом Бриджмена в вертикальном варианте. Показаны результаты внедрения и апробации предлагаемой системы.

Ключевые слова:

Многозонная термическая установка, метод Бриджмена, рост кристаллов, температурное поле, система автоматического регулирования.

Key words:

Multizone thermal installation, Bridgman method, crystal growth, thermal field, automatic control system.

Качество кристаллов, выращиваемых по методу Бриджмена, зависит от множества факторов, которые можно разделить на три группы. *Первая группа* связана со свойствами кристаллизующего вещества (состав, температура плавления, теплофизические свойства расплава и кристалла и др.). *Вторая группа* относится к особенностям организации рабочего объема, в котором происходят физико-химические процессы при росте кристалла (наличие или отсутствие затравочных кристаллов, тиглей, их взаимодействие с источником и стоком тепла). *Третья группа* факторов связана с параметрами термической установки, в которой проводится процесс выращивания кристалла. Ос-

новными требованиями, предъявляемыми к термическим установкам для выращивания кристаллов, являются:

- воспроизводимость в рабочем объеме необходимых температурных режимов, удовлетворяющих условиям технологического процесса;
- точность поддержания температурных полей в рабочем объеме установки на всех этапах технологического цикла выращивания кристалла;
- возможность создания в рабочем объеме установки заданных осевых градиентов распределения температуры;
- точность и стабильность перемещения ампулы.

Многочисленными экспериментальными работами по выращиванию монокристаллов методом Бриджмена, проведенными в нашей стране [1] и за рубежом [2], показано, что хорошее качество кристаллов достигается, если в технологическом процессе выполняются следующие условия:

- скорость изменения температуры в рабочем объеме не превышает $1^\circ\text{C}/\text{мин}$ для обеспечения допустимого уровня термомеханических напряжений;
- точность регулирования и поддержания температуры в рабочем объеме не хуже $0,1^\circ\text{C}$ для достижения однородности структурных свойств выращиваемого кристалла;
- реализация выпуклой в расплав формы фронта кристаллизации, которая приводит к подавлению паразитного зародышеобразования и улучшенной однородности свойств растущего кристалла [3].

Для реализации перечисленных требований разрабатываются специальные термические установки. Один из вариантов такой установки, изготовленной в ИМКЭС СО РАН, г. Томск, представляет собой многозонную печь, построенную на основе унифицированных кольцевых нагревательных модулей. Ее рабочий объем – цилиндр, образованный внутренними поверхностями нагревательных модулей, разделенных теплоизолирующими прокладками. Подробное описание термической установки представлено в [4]. Установка имеет 30 резистивных нагревательных элементов, 30 термопар, расположенных вблизи нагревательных элементов и предназначенных для контроля и управления тепловой мощностью нагревателей, а также 7 термопар, расположенных на границе рабочего объема для контроля распределения температуры в зоне кристаллизации.

В соответствии с функциональным назначением рабочий объем термической установки разделен на три тепловые зоны. В верхней тепловой зоне осуществляется плавление рабочего вещества и поддержание его в жидком состоянии, в градиентной зоне происходит непосредственный рост кристалла, в нижней тепловой зоне поддерживается температурный режим, обеспечивающий теплоотвод от выращенного кристалла.

В процессе роста кристалла ампула с расплавленным рабочим веществом медленно перемещается в осевом направлении из горячей зоны в холодную. Рабочее вещество, проходя через точку плавления, кристаллизуется.

Осевое распределение температуры в рабочем объеме установки, номинально обеспечивающее условия роста монокристалла ZnGeP_2 , представлено в [4]. Т. к. благоприятным фактором для роста кристалла является выпуклая в расплав форма фронта кристаллизации, то вблизи фронта кристаллизации температура на оси радиального сечения должна быть ни-

же температуры боковой поверхности ампулы. Положение фронта кристаллизации подбирается экспериментально на основе анализа геометрии рабочего объема, теплофизических свойств материалов, тепловых потоков в рабочем объеме и положения ампулы с рабочим веществом относительно установки.

Анализ условий работы термической установки в процессе выращивания кристалла (~ 300 ч) показывает, что кроме внутренних возмущений (продольно-осевое перемещение ампулы с рабочим веществом относительно установки, переход вещества из жидкого состояния в твердое с выделением теплоты кристаллизации, изменение давления паров расплавленного рабочего вещества, конвективные потоки в расплаве), возможны и внешние возмущения, основными из которых являются изменения:

- условий теплоотдачи в окружающую среду, как на внешней, так и на внутренней поверхностях установки;
- напряжения питающей сети U_c .

Создание необходимых по технологии выращивания монокристаллов термических условий требует, кроме оптимального распределения источников тепла с нужным пространственным разрешением, интеллектуальной системы автоматического регулирования, способной обеспечить высокую временную стабильность температурного поля установки и возможность плавного перехода от одного режима к другому. Недостатком метода Бриджмена является то, что в настоящее время нет средств прямого контроля внутренних возмущений, связанных с физико-химическими процессами, протекающими в ампуле. Их влияние на температурное поле в рабочем объеме можно оценить только косвенно. Поэтому работа системы автоматического регулирования направлена на компенсацию влияния на процесс выращивания кристалла внутренних и внешних возмущений.

Целью работы является разработка системы управления многозонной термической установкой для выращивания кристаллов по методу Бриджмена в вертикальном варианте. Система управления выполнена в виде управляющего вычислительного комплекса (УВК) (рис. 1), включающего информационно-измерительную и управляющую системы (ИИС и УС).

ИИС выполняет функции представления максимально возможной информации оператору-технологу, а именно:

- показания термопар для контроля и организации управления температурным полем, M штук;
- показания термопар для контроля распределения температуры в рабочем объеме, S штук;
- выделяемая мощность нагревателей (Q_i , $i=1, N$, N – количество нагревательных элементов);
- положение ампулы $h(t)$.

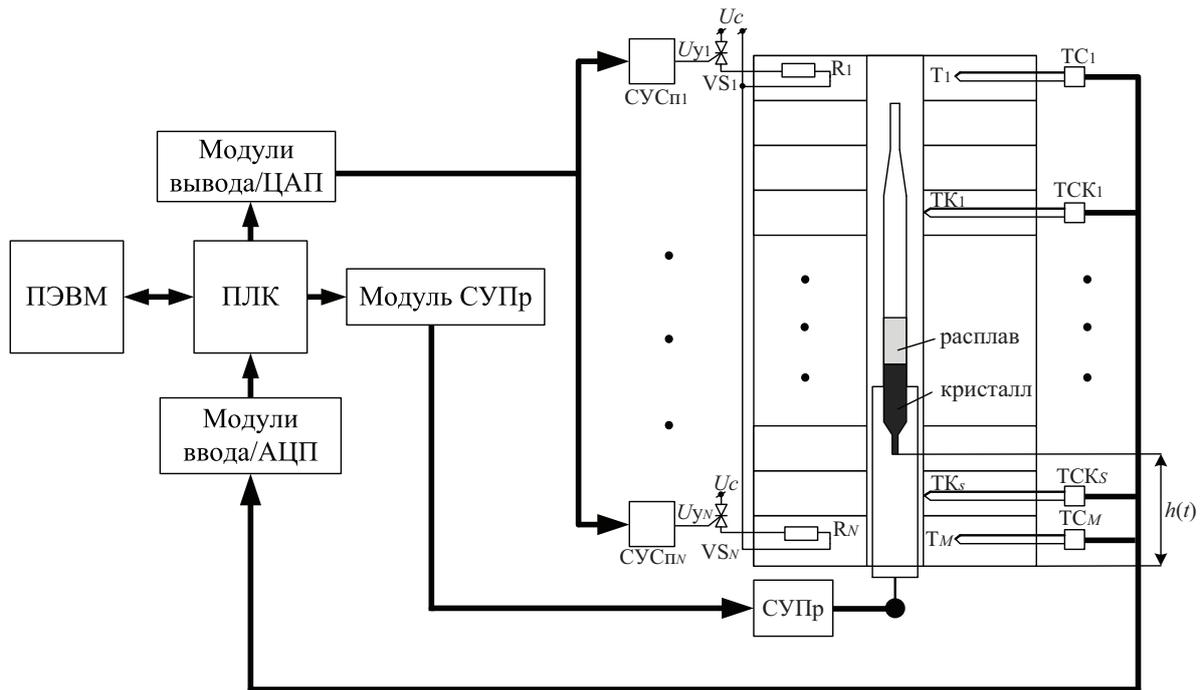


Рис. 1. Функциональная схема УВК многозонной установки для выращивания монокристаллов. Обозначения: ПЭВМ – персональный компьютер; ПЛК – программируемый логический контроллер; ЦАП и АЦП – цифроаналоговый и аналогоцифровой преобразователи; СУПр – система управления механизмом перемещения ампулы; Т, ТК – термопары; ТС, ТСК – термостаты; СУСП – схемы управления силовыми преобразователями; U_c – текущее напряжение сети; U_y – управляющие сигналы; R – нагреватели; VS – симисторы

В состав ИИС входят:

- $(M+S)$ двойных термопар платиновой группы с градуировкой ПП(S);
- $(M+S)$ термостатов для обеспечения постоянной температуры холодных спаев термопар. Температура термостатирования – 60 °С. Точность регулирования температуры термостата составляет $\pm 0,01$ °С;
- $(M+S)$ каналов ввода аналоговых сигналов со встроенными 16-и разрядными АЦП.

Тепловые мощности, выделяемые в резистивных нагревательных элементах, рассчитываются по формуле

$$Q_i(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^t U_c(t) I_i(t) \frac{U_{y_i}(t)}{U_{\max}} dt, \quad i = \overline{1, N},$$

где $U_c(t)$ – напряжение питающей сети, В; $I_i(t)$ – сила электрического тока в i -м нагревателе, А; $U_{y_i}(t)$ – выходной сигнал i -го ЦАП; U_{\max} – максимальное значение выходного сигнала; t_0 – время начала процесса, с; t – текущее время, с; $\tau = 1/f$, где f – частота напряжения питающей сети, Гц.

С целью исключения внесения искажений в электрическую сеть, для управления тепловой мощностью нагревателей используется фазовый принцип, сущность которого сводится к следующему. При сигнале управления $U_{y_i}(t) = U_{\max}$, сими-

сторы полностью открыты, и управляющему напряжению U_{\max} соответствует максимальная тепловая мощность. При $0 < U_{y_i}(t) < U_{\max}$ в цепь нагревателя пропускается только часть напряжения питания сети. При $U_{y_i}(t) = 0$ симисторы закрыты, и электрический ток в цепи нагревателей отсутствует.

Положение ампулы $h(t)$ в рабочем объеме термической установки определяется из выражения

$$h(t) = h_0 - V(t - t_0),$$

где h_0 – начальное положение ампулы, м; V – скорость перемещения ампулы, м/с.

Непосредственно в процессе выращивания кристалла методом Бриджмена положение фронта кристаллизации измерить невозможно, поэтому технолог, опираясь на показания контрольных термопар и предшествующий экспериментальный опыт, может произвести только оценки текущего положения фронта. На основании полученных оценок он выбирает режим ведения технологического процесса.

УС выполняет следующие функции:

- поддержание необходимого температурного поля термической установки;
- перемещение ампулы с рабочим веществом с заданной скоростью относительно термической установки.

В состав УС входят:

- ПЛК серии LinCon [5];
- выходные четырехканальные модули, оснащенные 14-и разрядными ЦАП;
- силовые преобразователи на симисторах с соответствующими схемами управления;
- система управления механизмом перемещения ампулы на основе шагового двигателя и редуктора;
- ПЭВМ.

ПЛК серии LinCon-8000 на базе операционной системы Embedded Linux конструктивно выполнен в виде единого корпуса, содержащего процессорную часть и слоты расширения для установки плат ввода/вывода. Контроллер оснащен RISC-процессором Intel Strong ARM 206 МГц. Среди периферийных устройств LinCon-8000 можно выделить интерфейсы PS/2 и VGA для подключения клавиатуры, монитора и «мыши», последовательные порты RS-232 и RS-485, а также 7 слотов расширения для установки модулей аналогового или дискретного ввода/вывода быстродействием до 100 кГц.

Программное обеспечение УВК термической установки состоит из двух частей. Первая часть – программное обеспечение ПЛК, вторая – программное обеспечение ПЭВМ. В качестве средства разработки программного обеспечения ПЭВМ выбран язык программирования Object Pascal и интегрированная среда программирования Borland Delphi. Для разработки программного обеспечения ПЛК использован язык программирования С и комплект средств разработки LinCon-8000 SDK [5].

Программное обеспечение ПЭВМ предназначено для обеспечения интерфейса взаимодействия оператора-технолога с УВК. Интерфейс программы делится на 5 зон: «Мнемосхема системы», «Настройка ПИД-регуляторов», «Программа регулирования», «Аварийные ситуации», «Архивная информация».

Зона «Мнемосхема системы» обеспечивает:

- отображение фактических показаний термодатчиков многозонной термической установки, °С;
- отображение заданных значений температур для регуляторов нагревательных элементов установки, °С;
- отображение текущих значений тепловых мощностей нагревательных элементов, %;
- отображение состояния работы ПИД-регуляторов. Каждый регулятор имеет два режима работы. В ручном режиме мощность нагревателя задается оператором-технологом и фиксируется на заданном уровне. В автоматическом режиме мощность нагревателя вычисляется в соответствии с ПИД-законом управления;
- возможность смены режима работы регуляторов.

Зона «Настройка ПИД-регуляторов» предназначена для задания параметров ПИД-регуляторов. Оператор-технолог имеет возможность изменить пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие закона управления.

Зона «Программа регулирования» позволяет оператору-технологу формировать законы изменения температурных режимов функционирования термической установки в соответствии с программой технологического процесса. Пример программы регулирования температуры приведен в таблице. Оператор-технолог задает время работы температурного режима и конечные задания для каждого из регуляторов. Значения текущих заданий регуляторов в промежуточные моменты времени вычисляются по формуле

$$UST_i = PRGUST_{j-1,i} + \frac{(PRGUST_{j,i} - PRGUST_{j-1,i})}{t_j} t_{мек},$$

где UST – текущее задание регулятора, °С; $PRGUST_j$ – задание j -го кадра, °С; $t_{мек}$ – время, прошедшее с начала кадра, с; t_j – полное время j -го кадра, с; i – номер регулятора, $i=1, N$; j – номер текущего кадра программы изменения температурных режимов.

Таблица. Динамика температурных режимов термической установки, °С

№№ элемента	Кадр 1, 1000 мин	Кадр 2, 10 мин	...
1	1030	1035	...
2	1010	1015	...
...
30	990	995	...

Также оператор-технолог задает скорость перемещения ампулы.

Зона «Аварийные ситуации» предназначена для отображения информации о внештатных ситуациях в элементах термической установки:

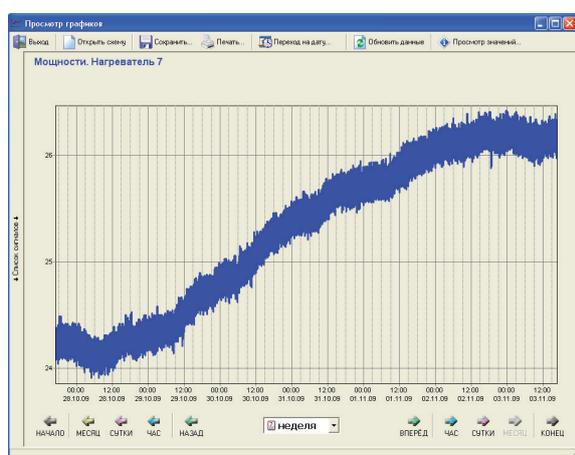
- отклонение температур нагревательных элементов от заданных на величину, превышающую $\Delta T_{крит}$;
- превышение скорости изменения температуры от допустимых значений;
- отклонение скорости перемещения ампулы от заданной;
- выход из строя модулей АЦП/ЦАП.

Зона «Архивная информация» предназначена для отображения записанной в архив информации о состоянии установки в течение технологического процесса. Позволяет просматривать информацию о:

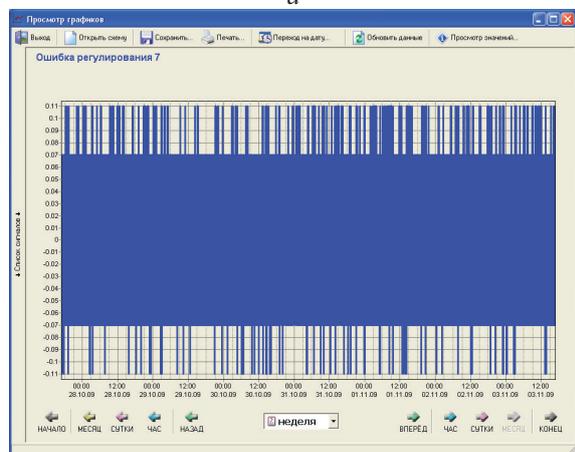
- значениях термоЭДС термодатчиков;
- мощностях нагревательных элементов;
- состоянии регуляторов;
- номерах кадров программ регулирования температуры и скорости;

- состоянии программы в контроллере (вкл/выкл);
- значениях текущих заданий регуляторов;
- рассогласованиях температур и текущих заданий регуляторов;
- времени, прошедшем с начала кадра;
- аварийных ситуациях;
- положении ампулы и скорости ее перемещения.

Программное обеспечение ПЛК предназначено для управления температурными режимами функционирования термической установки, управления перемещением ампулы с заданной скоростью и связи с ПЭВМ.



а



б

Рис. 2. Рабочее окно программы просмотра архивной информации для седьмого нагревательного элемента: а) изменение тепловой мощности, % от максимальной; б) ошибка регулирования температуры, °С

Алгоритм работы программного обеспечения ПЛК выглядит следующим образом. При запуске программы стартует бесконечный цикл, в течение которого выполняются следующие основные процедуры:

- ReadAndWriteAll – обеспечивает регистрацию показаний датчиков термической установки и отправку управляющих сигналов на модули вывода и в систему управления механизмом перемещения ампулы. Сигналы, поступающие от объекта, подвергаются первичной обработке для исключения случайных или ошибочных показаний. Для аналоговых входов выполняется проверка нахождения значения температуры в заданном диапазоне и проверка разности предыдущего и текущего значений сигнала. Для сигнала положения ампулы и скорости перемещения производится сравнение с текущими заданиями. В случае отклонения формируется аварийное сообщение;
- CalculateAll – предназначена для формирования управляющих сигналов на основании программы температурных режимов функционирования термической установки и заданий для скорости перемещения ампулы. Значения управляющих сигналов нагревателей рассчитываются по ПИД-закону управления. Параметры ПИД-регуляторов задаются оператором-технологом на ПЭВМ;
- SendAndReceiveAll – обеспечивает обмен информацией с ПЭВМ через последовательный интерфейс RS-232 со скоростью 115,2 кбит/с.

В качестве примера результатов эксплуатации разработанной системы управления приведены записи архивной информации за неделю технологического процесса роста кристалла (рис. 2).

Видно, что тепловая мощность седьмого нагревателя за неделю технологического процесса выращивания кристалла изменяется на 2 % от максимальной (рис. 2, а). Отклонения температуры соответствующей термопары от заданной в среднем не превышают 0,1 °С (рис. 2, б). Таким образом, по результатам разработки и опытной эксплуатации системы автоматического управления температурным полем МТУ можно сделать следующие выводы:

- система регулирования позволяет обрабатывать влияние внутренних и внешних возмущений и поддерживает в течение всего процесса выращивания кристалла температурное поле термической установки с точностью 0,1 °С;
- фактическая скорость изменения температуры не превышает предельную на всех этапах технологического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков А.В. Выращивание монокристаллов арсенида галлия с высоким структурным совершенством методом вертикально направленной кристаллизации // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2006. – № 6. – С. 16–19.
2. Shay J.L., Wernick J.H. Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties, and Applications. – N.Y.: Pergamon press, 1979. – 244 p.
3. Вильке К.-Т. Выращивание кристаллов. – Л.: Недра, 1977. – 599 с.

4. Филиппов М.М., Бабушкин Ю.В., Грибенюков А.И., Гинсар В.Е. Оценка динамики температурного поля в рабочем объеме вертикальной установки Бриджмена при продольно-осевом перемещении ростового контейнера в процессе выращивания кристаллов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 104–109.
5. Официальный сайт компании ICP DAS. 2009: URL: <http://www.icpdas.com/> (дата обращения: 20.11.2009).

Поступила 14.01.2010 г.

УДК 681.511.4

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛОБМЕННИКА

М.В. Скороспешкин, Г.П. Цапко, В.Н. Скороспешкин

Томский политехнический университет
E-mail: smax@aics.ru

Предложена адаптивная система регулирования температуры углеводородного конденсата на выходе из кожухотрубного теплообменника, включающая в себя ПИ-регулятор и последовательное псевдолинейное корректирующее устройство динамических свойств систем автоматического регулирования. Проведено исследование свойств адаптивной системы регулирования температуры. Показана эффективность предложенной адаптивной системы при изменении параметров объекта управления с течением времени.

Ключевые слова:

Адаптивное псевдолинейное корректирующее устройство, система автоматического регулирования, нестационарный объект управления, качество регулирования.

Key words:

The adaptive pseudo-linear correcting device, automatic control system, non-stationary object of control, quality of regulation.

В системах автоматического регулирования (САР) нестационарными объектами для осуществления заданного качества регулирования в процессе работы САР необходимо обеспечить целенаправленное изменение динамических характеристик регулирующего устройства таким образом, чтобы компенсировать нежелательные изменения свойств объекта управления.

В большинстве случаев это осуществляется изменением параметров пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-регуляторов). Такие подходы описаны, например, в [1, 2], однако реализация этих подходов связана либо с идентификацией, либо с использованием специальных способов, основанных на вычислениях по кривой переходного процесса. Оба эти подхода достаточно сложны и требуют значительного времени на подстройку.

Менее распространенным, но более эффективным является способ, основанный на применении специальных адаптивных корректирующих устройств, которые включаются последовательно с регуляторами. Меняя определенным образом свои параметры, устройства корректируют динамические свойства САР и тем самым компенсируют изменение свойств объекта управления [3, 4].

В настоящей работе приводятся результаты исследований свойств системы автоматического регулирования температуры углеводородного кон-

денсата на выходе из кожухотрубного теплообменника процесса производства этилена в ООО «Томскнефтехим», реализованной на основе ПИ-регулятора и последовательного адаптивного псевдолинейного корректирующего устройства динамических характеристик САР с амплитудным подавлением [4].

Предлагаемый способ адаптации характеризуется тем, что в процессе работы системы регулирования параметры регулятора не меняются и соответствуют настройке, предшествующей запуску системы в работу. В процессе работы САР, в зависимости от изменений параметров объекта управления, меняется постоянная времени корректирующего устройства. Это изменение происходит только в тех случаях, когда качество регулирования становится неудовлетворительным вследствие изменения свойств объекта управления, или из-за воздействия на объект управления возмущений. Это позволяет обеспечить необходимый запас устойчивости системы и повысить качество переходных процессов.

Технологический процесс охлаждения и сушки пирогаза в ООО «Томскнефтехим» осуществляется на установке газоразделения. Установка газоразделения отличается сложностью, что обусловлено многокомпонентностью поступающей на её вход углеводородной смеси. Здесь, в узле первичного функционирования, очистки и сушки, пирогаз с