

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

печей пиролиза поступает в сепаратор, где происходит его первичное отделение от содержащихся в нем углеводородного конденсата и воды. После прохождения сепаратора пирогаз поступает на вход первой ступени турбокомпрессора, после чего, проходя через холодильник, попадает в следующий сепаратор для дальнейшего его отделения от углеводородного конденсата и воды. Цикл прохождения пирогазом ступеней турбокомпрессора, холодильников и сепараторов повторяется пять раз, после чего охлажденный и осушенный пирогаз поступает в первичную метановую колонну, предназначенную для грубой очистки метановодородной фракции. Оставшееся в сепараторах после отделения от пирогаза тяжелое жидкое топливо (углеводородный конденсат и вода) попадает в кожухотрубный теплообменник, в котором нагревается до температуры 90 °С, после чего откачивается на склад.

В данном технологическом процессе применяется теплообменник с изменяющимся агрегатным состоянием вещества. Передаточная функция теплообменника имеет вид:

$$W(s) = \left(\frac{K}{T_1s + 1} \right) \left(\frac{1 - be^{-\tau s}}{(T_2s + 1)(T_3s + 1)} \right) \left(\frac{1}{T_4s + 1} \right),$$

где K – статический коэффициент передачи теплообменника, T_1, T_2, T_3, T_4 – постоянные времени теплообменника, b – константа, учитывающая конструктивные особенности теплообменника, τ – время, характеризующее запаздывание теплообменника.

Постоянная времени T_1 определяет изменение давления пара в межтрубном пространстве; T_2 и T_3 – учитывают изменение теплообменных свойств стенок и жидкости в трубках теплообменника; T_4 учитывает инерционность выходной камеры для технологического потока.

При исследовании САР углеводородного конденсата использовалась передаточная функция теплообменника:

$$W(s) = \left(\frac{9}{0,27s + 1} \right) \left(\frac{1 - 0,7e^{-10s}}{(25,8s + 1)(0,94s + 1)} \right) \left(\frac{1}{1,11s + 1} \right). \quad (*)$$

Система автоматического регулирования температуры в теплообменнике должна постоянно

поддерживать температуру углеводородного конденсата на уровне 90 °С.

Из формулы (*) видно, что теплообменник, как объект управления, обладает существенным запаздыванием, что необходимо учитывать при выборе закона регулирования. Требованиями на качество переходного процесса для данной САР являются величина перерегулирования <20 % и время регулирования <60 с.

Учитывая указанные выше особенности кожухотрубного теплообменника с изменяемым агрегатным состоянием как объекта управления, в качестве САР температуры углеводородного конденсата была выбрана одноконтурная САР с ПИ-регулятором.

По методу расширенных частотных характеристик были рассчитаны настройки ПИ-регулятора, обеспечивающие требования на качество переходного процесса. Настройки имеют следующие значения: $K_{PI}=0,2$; $K_{IPI}=0,05$.

На рис. 1 представлена модель САР температуры углеводородного конденсата на выходе из кожухотрубного теплообменника, составленная в системе MatLab 6.5 (Simulink).

Внутренними возмущениями объекта управления являются изменения: коэффициента теплопередачи на наружной и внутренней поверхностях трубы; удельной теплоемкости стенки трубки теплообменника. Основными внешними возмущениями являются изменения температуры теплоносителя и окружающей среды.

Эти параметры входят в значение постоянных времени T_2 и T_3 передаточной функции теплообменника. При уменьшении удельной теплоёмкости стенки трубки теплообменника или жидкости уменьшатся и значения постоянных времени T_2 и T_3 передаточной функции.

Рассмотрим случай, когда удельная теплоёмкости стенки трубки теплообменника понизилась настолько, что значение постоянной времени T_2 передаточной функции теплообменника уменьшилось с 25,8 до 17,0 с.

На рис. 2 представлены кривые переходного процесса на ступенчатое задающее воздействие САР температуры углеводородного конденсата на выходе из кожухотрубного теплообменника с ПИ-регулятором с настройками, описанными вы-



Рис. 1. Модель САР температуры углеводородного конденсата на выходе из кожухотрубного теплообменника

ше, для случаев, когда значение постоянной времени $T_2=25,8$ с (кривая 1) и $T_2=17$ с (кривая 2).

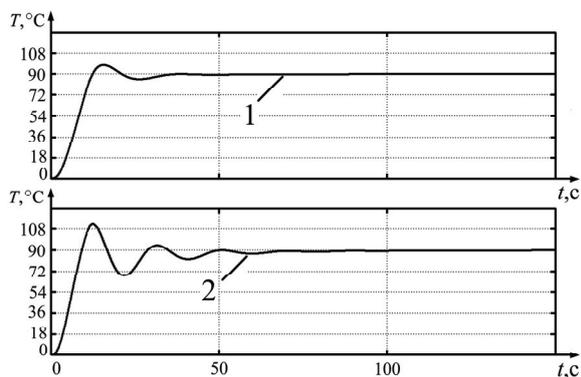


Рис. 2. Кривые переходного процесса САР температуры углеводородного конденсата

Анализ переходных процессов показывает, что при изменении значения постоянной времени T_2 с 25,8 до 17,0 с, качество САР оказывается неудовлетворительным.

Неудовлетворительным также является качество САР при воздействии на объект управления неконтролируемых возмущений, проявляющейся со временем его нестационарности. В этих случаях используемый в системе регулятор уже не может обеспечивать приемлемое качество регулирования, вплоть до того, что система может стать неустойчивой, что, в свою очередь, может не только привести к выпуску бракованной продукции, но и отрицательно сказывается на уровне взрыво- и пожаробезопасности объекта.

Для улучшения качества регулирования температуры углеводородного конденсата в теплообменнике и уменьшения негативного влияния неконтролируемых возмущений и нестационарности объекта управления на процесс регулирования, в САР предложено ввести последовательное адаптивное псевдолинейное корректирующее устрой-

ство с амплитудным подавлением. Данное адаптивное корректирующее устройство повышает запас устойчивости по амплитуде при изменении параметров объекта управления.

На рис. 3 представлена структурная схема САР с адаптивным псевдолинейным корректирующим устройством с амплитудным подавлением, где g – задающее воздействие системы регулирования; ε и ε_1 – входной и выходной сигналы корректирующего устройства; u – управляющее воздействие; y – выход объекта управления; КУ – псевдолинейное корректирующее устройство с амплитудным подавлением; БН – блок настройки псевдолинейного корректирующего устройства; БАК – блок анализа качества системы; ГПС – генератор пробного сигнала; z – возмущающее воздействие; q – параметр, характеризующий нестационарность корректирующего устройства; T – постоянная времени корректирующего устройства; I – критерий качества системы; S_1 и S_2 – сигнал запуска/останова генератора пробного сигнала.

Способ адаптации предложенной САР характеризуется тем, что в процессе работы системы регулирования параметры ПИ-регулятора не меняются и соответствуют настройке, предшествующей запуску системы в работу. В процессе работы, в зависимости от изменения параметров объекта управления, меняется создаваемый корректором запас устойчивости по амплитуде. Эти изменения происходят только в тех случаях, когда качество регулирования САР становится неудовлетворительным вследствие изменения свойств объекта управления или из-за воздействия на объект управления возмущений. Это позволяет обеспечить устойчивость системы и повысить качество управления.

Работа адаптивной САР осуществляется следующим образом. При первоначальном запуске системы в работу в установившемся режиме ГПС подает в САР прямоугольный пробный импульс, амплитуда которого равна 1/10 от значения сигнала задания, а длительность составляет 175 с. После

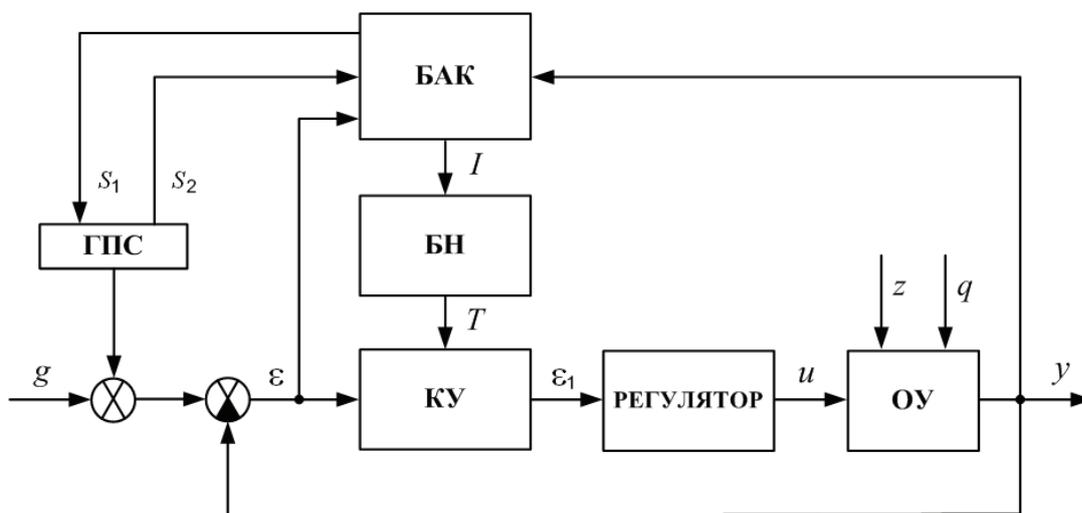


Рис. 3. Структурная схема САР

подачи пробного импульса в блоке БАК происходит подсчет оценки критерия качества системы за время длительности пробного импульса. Критерием качества системы является интегральный критерий, который имеет вид:

$$I_1 = \int_{t_1}^{t_2} |\varepsilon(t)| dt,$$

где ε – ошибка регулирования.

Подсчитанная оценка критерия качества запоминается в блоке БН в качестве эталонной оценки. Затем, через определенный промежуток времени, ГПС вновь подает в систему прямоугольный пробный импульс, после чего в БАК вновь происходит подсчет оценки критерия качества САР за время длительности пробного импульса. Далее текущая оценка критерия сравнивается с эталонной оценкой и по результату сравнения принимается решение о необходимости подстройки корректирующего устройства. Принятие решения основывается на анализе условия:

$$|I_t - I_0| > \Delta,$$

где I_t – текущее, а I_0 – эталонное значение критерия.

Величина Δ характеризует допустимое отклонение качества САР от эталонного.

Если принято решение о подстройке корректирующего устройства, то в блоке БН происходит расчет значения постоянной времени корректирующего устройства, после чего значение данного параметра поступает в КУ и запоминается в нем. Для определения постоянной времени в данной работе используется градиентный метод. Корректировка постоянной времени осуществляется с учетом зависимости:

$$T_i = T_{i-1} + \Delta T,$$

где T_i, T_{i-1} – значения постоянной времени на текущем и предыдущем шагах, ΔT – величина приращения T .

Диапазон изменения постоянной времени корректирующего устройства определяется с учетом обеспечения устойчивости системы и требуемого качества переходных процессов.

Для исследования работы системы автоматического регулирования с адаптивным корректирующим устройством с амплитудным подавлением была составлена модель САР температуры углеводородного конденсата на выходе из кожухотрубного теплообменника в системе MatLab 6.5 (Simulink), представленная на рис. 4. На этом же рисунке приведена модель САР, не обладающая свойствами адаптации.

Начальные значения параметров объекта управления и ПИ-регулятора одинаковы (см. выше) и остаются неизменными в процессе работы системы.

Начальное значение постоянной времени корректирующего устройства принято равным 0,01 с. Значение параметра первоначальной настройки КУ выбрано таким, чтобы вносить минимальное изменение в частотные характеристики САР.

Изменение постоянной времени корректирующего устройства производится с помощью аппарата S-функций в блоке БН. Запуск ГПС также производится с помощью аппарата S-функций в блоке БАК.

На рис. 5 представлены кривые переходных процессов в системах регулирования только с ПИ-регулятором (кривая 1) и регулятором, дополненным последовательно включенным в цепь регу-

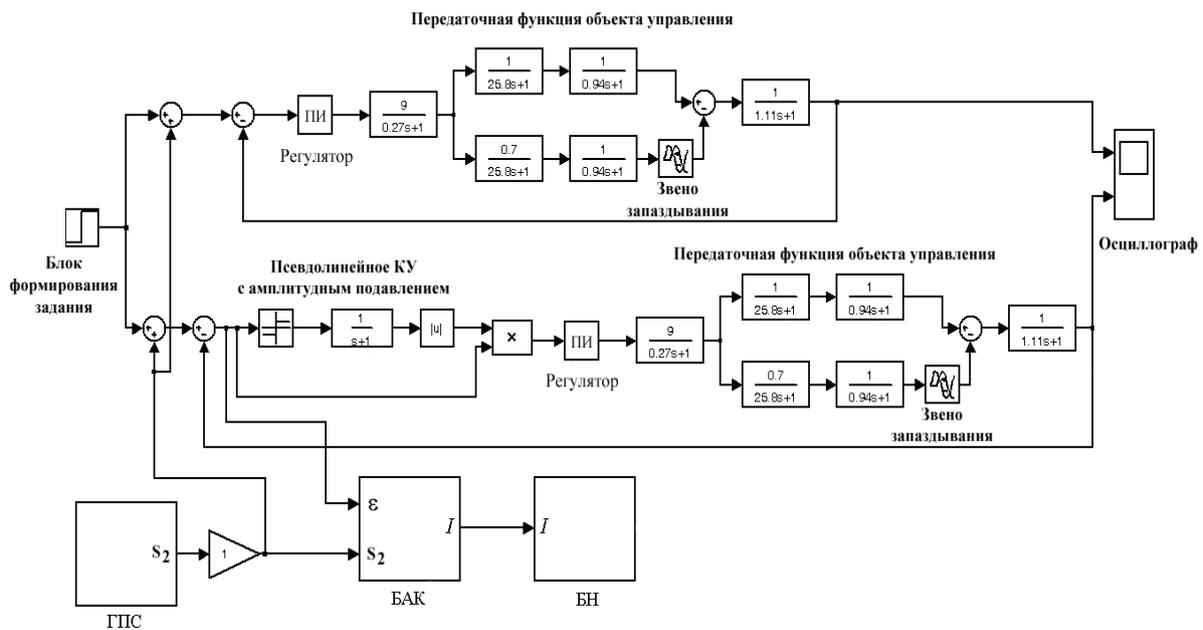


Рис. 4. Модель адаптивной САР температуры углеводородного конденсата на выходе из кожухотрубного теплообменника

лирования адаптивным псевдолинейным корректирующим устройством с амплитудным подавлением (кривая 2). Эти кривые наглядно иллюстрируют способность адаптации системы регулирования к изменению параметров объекта управления. Кривая 3 иллюстрирует импульсы, поступающие в САР с генератора пробного сигнала.

Изначально была проведена настройка ПИ-регуляторов обеих систем таким образом, чтобы переходный процесс при ступенчатом воздействии на объект управления удовлетворял требованиям по качеству, описанным выше.

Также была проведена настройка корректирующего устройства при $T=0,01$ с. При такой настройке оно вносит минимальное ослабление в вид амплитудно-частотной характеристики.

После запуска систем в работу и окончания переходных процессов, в момент времени t_1 , в обе системы поступает импульс с генератора пробного сигнала (кривая 3). После подачи импульса в блоке БАК рассчитывается эталонная оценка критерия качества САР и запоминается в качестве эталонной оценки. В момент времени t_2 происходит изменение постоянной времени T_2 передаточной функции объекта управления с 25,8 до 17 с.

При таких параметрах объекта управления и начальных настройках ПИ-регулятора переходный процесс на ступенчатое воздействие становится более колебательным, что видно из графиков при поступлении очередного импульса с ГПС в момент времени t_3 . Далее происходит подсчет текущей оценки критерия качества САР, сравнение её с эталонной оценкой, и по результату сравнения принимается решение о подстройке корректирующего

устройства. В момент времени t_4 происходит изменение значения постоянной времени корректирующего устройства на величину приращения ΔT , равную 15 с. После изменения постоянной времени КУ, её значение поступает в корректирующее устройство и запоминается в нем.

Далее, в момент времени t_5 , в САР вновь подается пробный сигнал, и цикл подстройки повторяется. В момент времени t_6 значение текущей оценки критерия качества САР становится удовлетворительным, и подстройка прекращается.

Для подстройки потребовалось три итерации. Значение постоянной времени корректирующего устройства после окончания процесса подстройки стало равным 45 с.

Вид кривой 2, в момент времени t_6 , говорит о том, что качество САР с корректором (кривая 2) значительно лучше, чем без корректора (кривая 1) при изменившихся параметрах объекта управления и произошедшей подстройке к ним КУ. Качество работы САР с КУ остается удовлетворительным при изменении постоянной времени объекта до значения $T_2=3$ с, а при $T_2=8$ с система без корректора становится неустойчивой.

На основе модели (рис. 4) проведено исследование свойств адаптивной системы при изменении времени запаздывания теплообменника. Результаты исследования показали, что САР с адаптивным псевдолинейным корректирующим устройством с амплитудным подавлением остается устойчивой при увеличении времени запаздывания с 10 до 150 с. Для сравнения: в обычной системе происходит потеря устойчивости уже при времени запаздывания, равном 28 с.

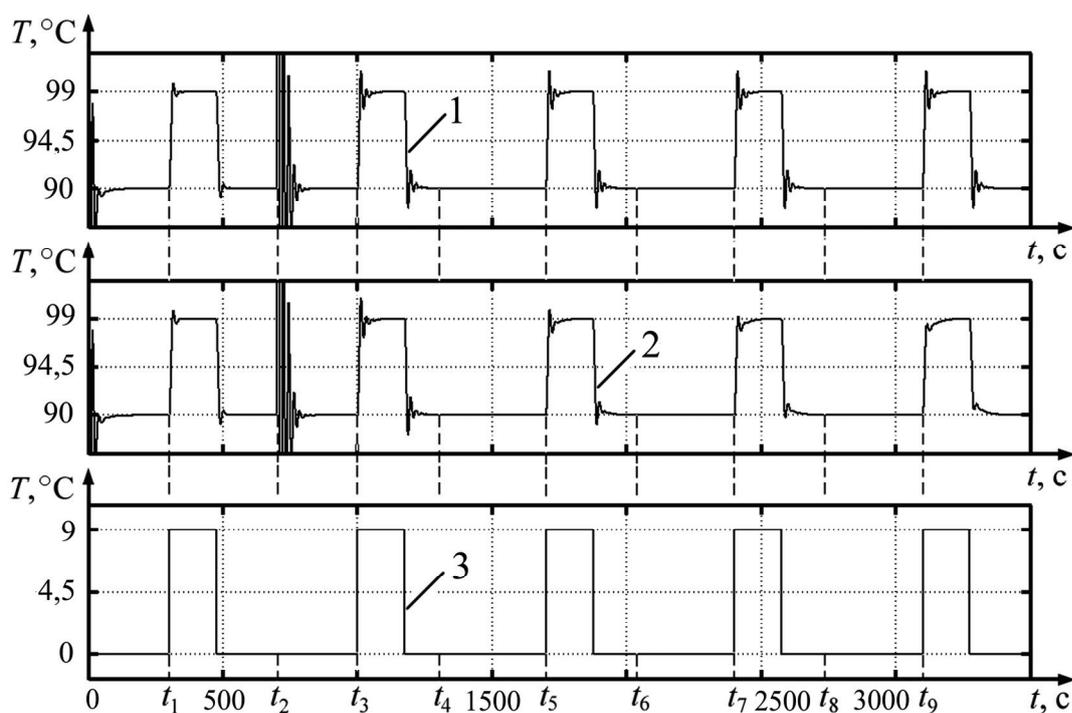


Рис. 5. Кривые переходных процессов

Выводы

1. Предложена адаптивная система регулирования температуры углеводородного конденсата на выходе из кожухотрубного теплообменника, включающая ПИ-регулятор и последовательное псевдолинейное корректирующее устройство динамических свойств систем автоматического регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдатов В.В., Ухаров П.Е. Адаптивная настройка систем управления с ПИД-регуляторами в условиях информационной неопределенности // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 8. – С. 16–20.
2. Штейнберг Ш.Е., Залуцкий И.Е., Сережин Л.П., Варламов И.Г. Настройка и адаптация автоматических регуляторов. Инструментальный комплект программ // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003. – № 10. – С. 43–47.
3. Скороспешкин М.В. Адаптивные псевдолинейные корректоры динамических характеристик систем автоматического регу-

2. Экспериментально показана эффективность предложенной системы регулирования при изменении во времени параметров объекта управления.
3. Применение предложенного корректирующего устройства позволило реализовать систему регулирования объектами с нестационарными параметрами. Устройство можно добавлять в действующие системы регулирования на базе микропроцессоров без дополнительных затрат на аппаратную часть.

лирования // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 172–176.

4. Скороспешкин М.В., Цапко Г.П. Адаптивный корректор динамических характеристик систем автоматического регулирования // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Труды XII Междунар. научно-технич. конф. студентов и аспирантов. – Т. 1. – М.: МЭИ, 2006. – С. 498–499.

Поступила 01.04.2010 г.

УДК 669.162.28

ТЕХНОЛОГИЯ И СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В МЕТАЛЛУРГИИ

Н.А. Спирын, В.В. Лавров, А.А. Бурькин, А.В. Краснобаев*, А.Г. Быков

ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург
*ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск
E-mail: lv@tim.ustu.ru

Отражены технологические особенности и средства разработки программного обеспечения, использованные авторами в ходе создания современных информационно-моделирующих систем для решения технологических задач в области доменного производства, в частности решения задачи оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов в группе доменных печей.

Ключевые слова:

Технология разработки программного обеспечения, система поддержки принятия решений, доменная печь, технологические задачи в металлургии.

Key words:

Software engineering, decision support systems, blast furnace, technological problems in metallurgy.

В настоящее время все более очевидной становится роль алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области металлургии MES-уровня (*Manufacturing Execution Systems* – системы управления технологией, производственными процессами) современных автоматизированных информационных систем крупнейших металлургических предприятий России. Это определяет потребность в разработке специализированного программного обеспечения информационно-моделирующих систем, в основу которого положен комплекс математических моделей, учитывающих как физику процесса, основы

теории тепло- и массообмена, законы сохранения энергии, так и особенности влияния технологических и стандартных характеристик сырья на показатели производственного процесса. При этом важно обеспечить высокий уровень их интеграции с существующими производственными и корпоративными системами.

Значительную роль в успешном внедрении и использовании информационно-моделирующих систем играет качество разработанного программного обеспечения. Среди наиболее значимых показателей качества современных программных средств выделены функциональность, надежность,