

дели с однокомпонентной моделью с постоянным коэффициентом распределения показало, что разработанная модель является более точной. Разработанная модель при задании соответствующих па-

раметров и входных данных может быть применена при моделировании процесса экстракции при создании систем автоматизированного управления переработкой отработанного ядерного топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Землянухин В.И., Ильченко Е.И., Кондратьев А.Н., Лазарев Л.Н., Царенко А.Ф., Царицына Л.Г. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.
2. Stoller A., Richards R. Reprocessing of nuclear fuel. – Berlin: Springer-Verlag, 1975. – 645 p.
3. Чурсин Ю.А., Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н. Система автоматизированного управления экстракционной колонной // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 5. – С. 35–39.
4. Балашов А.А., Лоссиевский В.Л., Чернышев В.Н., Шваб А.Ф., Шелемин Б.В. Схемы и средства автоматизации радиохимических производств. – М.: Госатомиздат, 1963. – 187 с.
5. Russela P. Thomas and Biodegradation of Tributyl Phosphate by Naturally Occurring Microbial Isolates and Coupling to the Removal of Uranium from Aqueous Solution // Environ. Sci. Technol. – 1996. – № 30. – P. 2371–2375.
6. Карпачева С.М., Захаров Е.И. Основы теории и расчета пульсационных колонных реакторов. – М.: Атомиздат, 1980. – 256 с.
7. Николотова З.И. Экстракция нейтральными органическими соединениями. – М.: Энергоатомиздат, 1976. – 600 с.
8. Liptser R., Robert S. Statistics of Random Processes. 1: General Theory / Ed. by R.S. Liptser, A.N. Shiryayev. – Berlin: Springer-Verlag, 2001. – 427 p.

Поступила 18.03.2009 г.

УДК 66.012-52

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОМ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА ПРОИЗВОДСТВА ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

С.А. Байдали, В.Ф. Дядик

Томский политехнический университет
E-mail: basa@tpu.ru

Предложена структура системы управления аппаратом улавливания фторсодержащих компонентов производства UF_6 . Предложены, программно реализованы и исследованы алгоритмы управления, обеспечивающие согласованную загрузку твердого сырья в аппараты фторирования и улавливания. Доказана возможность применения алгоритмов для автоматизированного управления аппаратом комбинированного типа.

Ключевые слова:

Алгоритм управления, система автоматизированного управления, математическая модель, производство гексафторида урана, узел непрерывной транспортировки.

Введение

Одним из направлений федеральной программы развития энергопромышленного комплекса России на 2007-2010 гг. и на перспективу до 2015 г. является ускоренное развитие ядерной энергетики страны (постановление Правительства РФ от 6 октября 2006 г. № 605). В связи с этим возникает задача повышения производительности и эффективности работы предприятий по производству ядерного топлива для АЭС и улучшения их показателей по безопасности и экологичности, в том числе и сублиматного завода ОАО «Сибирский химический комбинат» (СХК).

Сублиматное производство гексафторида урана (ПГУ) из тетрафторида урана и оксидов урана является сложным объектом автоматизации с дорогостоящим целевым продуктом и рядом особенностей, обусловленных быстротой протекания физико-химических процессов и агрессивностью технологических сред [1, 2].

В 1989 г. была сдана в промышленную эксплуатацию АСУ ТП «СКАТ» производства гексафторида урана на базе программного технического комплекса М6000. В 2004 г. была запущена в промышленную эксплуатацию модернизированная АСУ ТП ПГУ на базе многофункциональных контроллеров. За эти же годы была произведена модернизация самого ПГУ. Была внедрена в эксплуатацию система импульсного пневмотранспорта для транспортировки полупродуктов, выгружаемых из под аппарата комбинированного типа (АКТ) и доставляемых в пламенный реактор (ПР).

В АСУ ТП АКТ, построенной на базе М6000, при контейнерном способе перегрузки из АКТ в ПР цель управления узлом улавливания заключалась в стабилизации на заданном уровне содержания фтор-ионов в полупродуктах, выгружаемых из аппарата. При наличии перегрузки полупродуктов с помощью пневмотранспорта приоритетной стала задача согласования загрузок по оксидам урана в АКТ и

полупродуктам в ПР, что привело к необходимости разработки нового алгоритма управления АКТ.

После внедрения установки пневмотранспорта М1726, управление аппаратом осуществляется в ручном режиме. Разработка алгоритма управления АКТ обусловлена необходимостью автоматизированного управления аппаратом.

Целью данной работы является разработка алгоритма автоматизированного управления АКТ, обеспечивающего максимальное улавливание ценных компонентов из «хвостовых» технологических газов при согласованной загрузке твердого сырья в ПР и АКТ. Проведенная модернизация АСУ ТП ПГУ позволит реализовать разработанный алгоритм управления аппаратом улавливания на современном программном и техническом обеспечении, увеличив точность и быстродействие обработки управляющих воздействий.

Разработка алгоритма управления аппаратом комбинированного типа

Для управления аппаратом улавливания предлагается использовать комбинированный принцип управления, заключающийся в расчете управляющего воздействия по эталонной модели и его коррекции с использованием прямых измерений веса бункеров ПР и АКТ. Таким образом, значение расхода твердого сырья в АКТ будет рассчитываться следующим образом:

$$G_M = G_M^{\text{Модели}} + \Delta G_M,$$

где $G_M^{\text{Модели}}$ – значение расхода твердого сырья в АКТ, рассчитанное по разработанной математической модели ПГУ, кг/ч; ΔG_M – корректирующая составляющая, кг/ч.

На рис. 1 приведена структурная схема алгоритма управления АКТ.

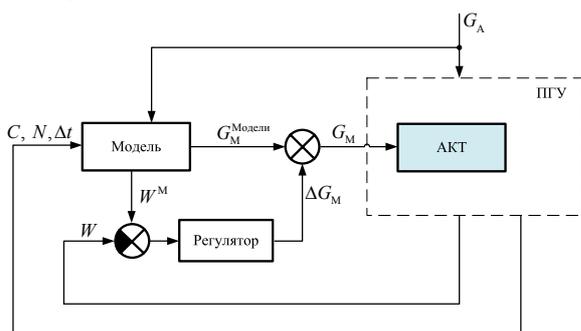


Рис. 1. Структурная схема алгоритма управления АКТ: C – концентрация фтора на выходе ПР, об. %; N – обороты шнека загрузки бункера ПР, об/мин; Δt – цикл управления ПР, с; G_A – расход анодного газа, м³/ч; W , W^M – массы бункеров ПР и АКТ рассчитанные по модели и полученные с технологических весов

Структурная схема модели производства ГФУ представлена на рис. 2. На основании измеренных значений технологических переменных C , N , G_A в модели с заданным циклом управления рассчитывается необходимое значение расхода твердого сырья в АКТ $G_M^{\text{Модели}}$.

Корректирующая составляющая ΔG_M формируется пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором по сигналу рассогласования масс бункеров ПР и АКТ, рассчитанных по модели и измеренных технологическими весами.

В качестве сигнала рассогласования наиболее целесообразным представляется использование двух типов сигналов и, соответственно, двух принципов расчета корректирующей составляющей ΔG_M :

1. Разность общих масс полупродуктов в системе рассчитанных по показаниям тензовесов и по модели.
2. Разность масс бункера ПР между двумя процедурами перегрузки полупродуктов посредством пневмотранспорта, рассчитанных по технологическим весам и по модели.

При реализации алгоритма управления АКТ на микропроцессорной технике корректирующая составляющая рассчитывается по следующему рекуррентному соотношению согласно ПИ-закону управления с использованием экстраполятора треугольного типа [3]:

$$\Delta G_M^i = \Delta G_M^{i-1} + q_0 e_i + q_1 e_{i-1},$$

где ΔG_M^i , ΔG_M^{i-1} – значение корректирующей составляющей на i и $i-1$ шагах; e_i , e_{i-1} – значение сигнала рассогласования на i и $i-1$ шагах;

$$q_0 = K_R \left(1 + \frac{T_{II}}{2T_I} \right); \quad q_1 = K_R \left(\frac{T_{II}}{2T_I} - 1 \right); \quad K_R \text{ – коэффициент}$$

усиления регулятора; T_I – постоянная времени интегрирования регулятора, с; T_{II} – постоянная времени цикла расчета, с.

Расчет параметров регулятора производится на основе критерия оптимального модуля по следующим соотношениям [4]:

$$K_R = \frac{6T^3 + 6T^2 + 3T + 1}{4(3T^2 + 3T + 1) K_0},$$

$$T_{II} = \frac{6T^3 + 6T^2 + 3T + 1}{6T^2 + 6T + 3} \tau,$$

$$T = \frac{T_0}{\tau},$$

где K_0 – коэффициент передачи АКТ; T_0 – постоянная времени АКТ, с; τ – время запаздывания АКТ, с.

Параметры объекта управления (K_0 , T_0 , τ) определялись по приведенной на рис. 2 математической модели ПГУ.

Для проверки предложенного алгоритма управления АКТ использовалась модель ПГУ.

Входными параметрами модели являются значения с трендов:

- концентрация фтора C , об. %;
- количество оборотов шнека N , об/ч;
- расход анодного газа G_A , м³/ч.

На основании входных параметров и результатов, полученных по математической модели ПГУ,

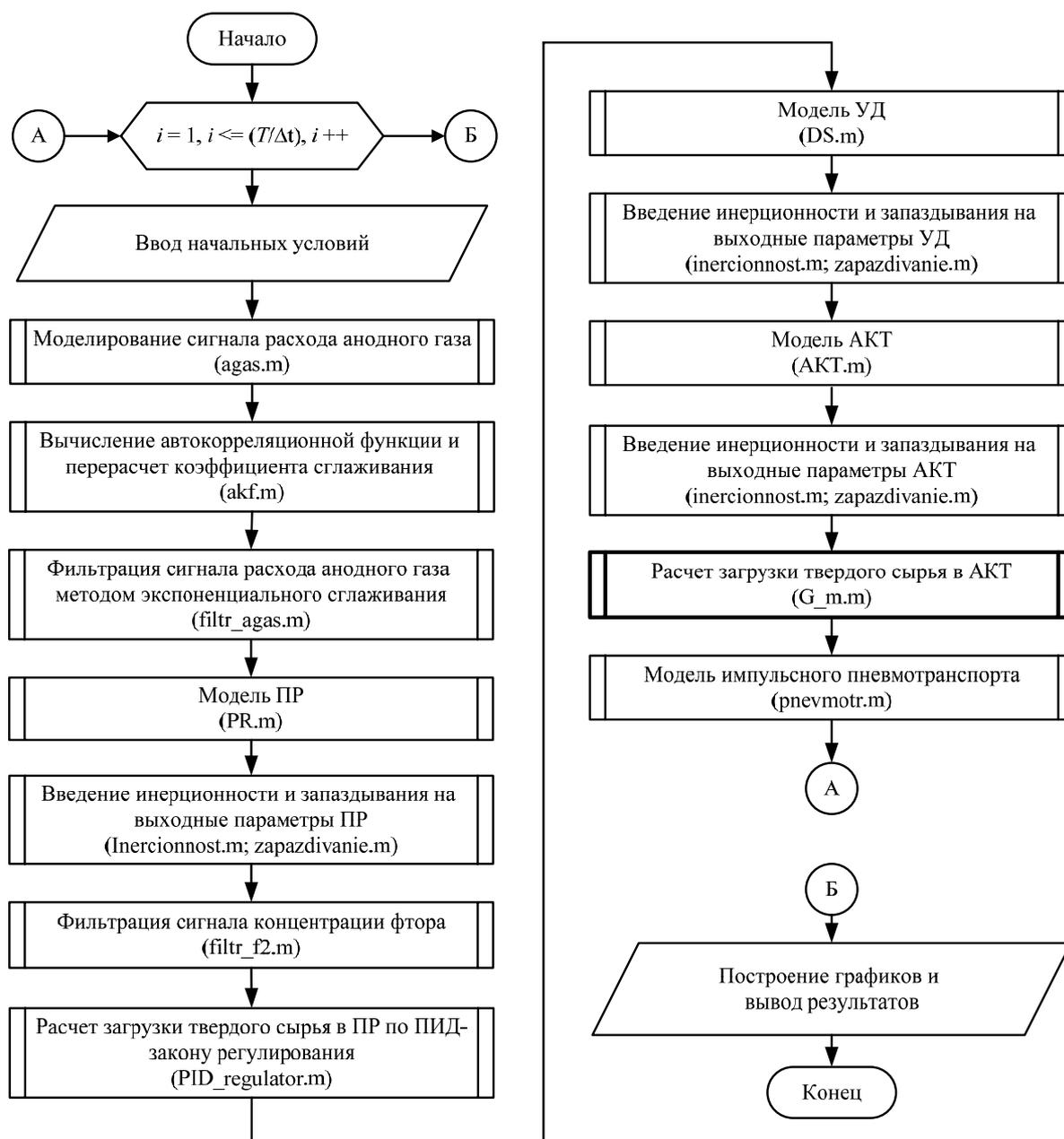


Рис. 2. Структурная схема модели производства гексафторида урана. ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный; УД – узел десублимации

происходит расчет веса W^M по модели и вычисление значения расхода твердого сырья в АКТ $G_M^{Модели}$.

Алгоритм управления, основанный на использовании сигнала разности общих масс полупродуктов, подразумевает вычисление на каждом цикле программы общей массы полупродуктов системы по непосредственным измерениям и по значениям масс бункеров в модели:

$$W_{сист}^{весы} = W_{ПР}^{весы} + W_{АКТ1}^{весы} + W_{АКТ2}^{весы},$$

$$W_{сист}^{мод} = W_{ПР}^{мод} + W_{АКТ1}^{мод} + W_{АКТ2}^{мод},$$

где $W_{ПР}^{весы}$, $W_{АКТ1}^{весы}$, $W_{АКТ2}^{весы}$, $W_{ПР}^{мод}$, $W_{АКТ1}^{мод}$, $W_{АКТ2}^{мод}$ – массы полупродуктов в бункере ПР, в 1-м, 2-м бункерах

под АКТ измеренные тензовесами и рассчитанные в модели.

Рассчитанные значения масс полупродуктов системы записываются в соответствующие массивы, после чего находятся средние значения общей массы полупродуктов системы по показаниям тензовесов $\bar{W}_{сист}^{весы}$ и модели $\bar{W}_{сист}^{мод}$ за N циклов управления. Разность этих средних значений

$$\Delta W_{сист} = \bar{W}_{сист}^{мод} - \bar{W}_{сист}^{весы}$$

будет являться сигналом рассогласования для цифрового регулятора, осуществляющего коррекцию управляющего воздействия на загрузку твердых продуктов в АКТ по ПИ-закону управления.

В случае положительной разности $\Delta W_{\text{сист}}$ последует увеличение загрузки твердого сырья в АКТ. Если разность $\Delta W_{\text{сист}}$ отрицательна, то последует уменьшение загрузки твердого сырья.

Подобное утверждение справедливо, т. к. значение управляющего воздействия G_M по модели рассчитывается таким образом, что общая масса полупродуктов системы является величиной постоянной. Следовательно, в случае, если значение этой массы, рассчитанное по тензовесам, будет постоянно уменьшаться, то это приведет, в конечном итоге, к опустошению бункера ПР ниже регламентного значения, в случае же постепенного увеличения массы полупродуктов системы произойдет переполнение бункера ПР. Обе эти ситуации являются аварийными. Таким образом, коррекция управляющего воздействия по данному алгоритму позволит качественно управлять загрузкой твердого продукта в АКТ в автоматизированном режиме.

Исследование алгоритма управления осуществлялось на модели ПГУ в программной среде MATLAB [5]. На первом этапе был смоделирован процесс, характеризующийся постепенным изменением загрузки твердых продуктов в АКТ (сплошная кривая на рис. 3). Данные о весе бункеров записывались в тренды. На следующем этапе данные этих трендов использовались в качестве сигнала тензовесов для формирования сигнала рассогласования. На рис. 3 представлены результаты проведенных исследований.

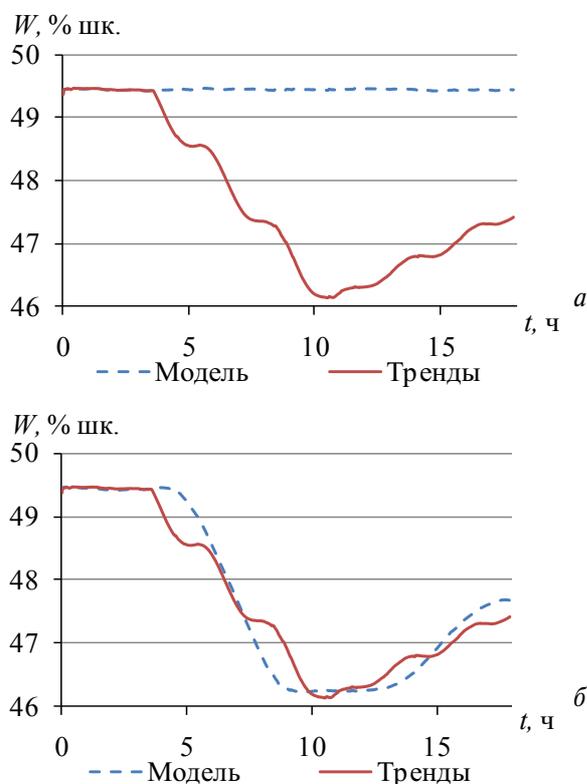


Рис. 3. Графики зависимости массы полупродуктов системы от времени: а) без расчета корректирующей составляющей; б) с расчетом

Из графиков на рис. 3 видно, что при изменении по какой-либо причине массы системы (изменения нагрузки, режима работы и т. п.) использование корректирующей составляющей G_M в алгоритме управления позволяет минимизировать это изменение и поддерживать качество регулирования на необходимом уровне.

На основании полученных результатов моделирования алгоритма, основанного на вычислении общей массы системы, можно судить о том, что коррекция управляющего воздействия по данному алгоритму позволит качественно управлять загрузкой твердого продукта в АКТ в автоматизированном режиме.

Альтернативный алгоритм управления заключается в нахождении разности масс бункера ПР между двумя процедурами перегрузки полупродуктов посредством пневмотранспорта рассчитанных по технологическим весам $\Delta W_{\text{ПР}}^{\text{весы}}$ и по модели $\Delta W_{\text{ПР}}^{\text{мод}}$:

$$\Delta W_{\text{ПР}}^{\text{весы}} = W_{\text{ПР}}^{\text{весы}}(i) - W_{\text{ПР}}^{\text{весы}}(i-1),$$

$$\Delta W_{\text{ПР}}^{\text{мод}} = W_{\text{ПР}}^{\text{мод}}(i) - W_{\text{ПР}}^{\text{мод}}(i-1),$$

где $W_{\text{ПР}}^{\text{весы}}(i)$, $W_{\text{ПР}}^{\text{весы}}(i-1)$, $W_{\text{ПР}}^{\text{мод}}(i)$, $W_{\text{ПР}}^{\text{мод}}(i-1)$ – масса полупродуктов в бункере ПР на i и $i-1$ шагах измеренная тензовесами и рассчитанная в модели.

Разность найденных значений

$$\Delta W_{\text{ПР}} = \Delta W_{\text{ПР}}^{\text{мод}} - \Delta W_{\text{ПР}}^{\text{весы}}$$

будет являться сигналом рассогласования для цифрового регулятора.

В случае положительной разности $\Delta W_{\text{ПР}}$ последует увеличение загрузки твердого сырья в АКТ по ПИ-закону управления. Если разность $\Delta W_{\text{ПР}}$ отрицательна, то последует уменьшение загрузки твердого сырья.

На рис. 4 представлены графики зависимости массы полупродуктов в бункере ПР от времени без расчета корректирующей составляющей и с ее расчетом.

Из графиков видно, что коррекция управляющего воздействия позволяет минимизировать расхождение реальных и моделируемых значений масс полупродуктов в бункере ПР на каждом цикле перегруза.

Использование данного алгоритма правомочно, т. к. уменьшение разности $\Delta W_{\text{ПР}}$ приведет, в конечном итоге, к опустошению бункера ПР ниже регламентного значения; в случае постепенного увеличения $\Delta W_{\text{ПР}}$ произойдет переполнение бункера ПР. Таким образом, коррекция управляющего воздействия по данному алгоритму также позволит качественно управлять загрузкой твердого продукта в АКТ в автоматизированном режиме.

Выбор предпочтительного метода расчета корректирующей составляющей ΔG_M определяется достоверностью показаний технологических весов. В частности, анализ трендов выявил трудности использования первого метода, основанного на рас-

чете общей массы полупродуктов в системе, ввиду существенной погрешности показаний весов измеряющих массу бункеров под АКТ. Таким образом, использование этого метода для расчета корректирующей составляющей ΔG_M без повышения точности измерения массы бункеров под АКТ, не представляется возможным. Существенным преимуществом первого метода является его высокое быстродействие в плане коррекции загрузки твердого сырья в АКТ – перерасчет корректирующей составляющей осуществляется с основным циклом управления.

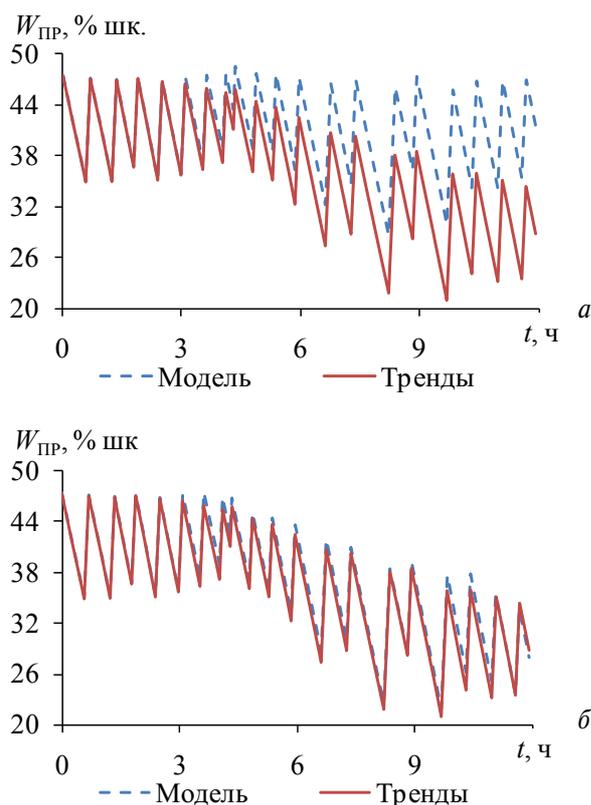


Рис. 4. Графики зависимости массы полупродуктов в ПР от времени: а) без расчета корректирующей составляющей; б) с расчетом

Преимуществом второго метода расчета корректирующей составляющей ΔG_M является его независимость от показаний тензозвесов бункеров под АКТ и, соответственно, отсутствие ошибки в управ-

ляющем воздействии, связанной с погрешностью измерения массы бункеров. Недостатком второго метода является его низкое быстродействие в плане коррекции загрузки твердого сырья в АКТ, обусловленное с зависимостью расчета сигнала рассогласования со временем между двумя ближайшими перегрузками полупродуктов из АКТ в ПР, значение которого в среднем равно 2300 с. Также, для использования этого метода необходима синхронизация момента перегрузки полупродуктов на производстве и в модели.

По результатам исследований, проведенных в данной работе, в рамках модернизации АСУ ТП ПГУ, а также по согласованию с руководством сублиматного завода ОАО «СХК» было принято решение о реализации второго метода и проведения приборной модернизации.

Для качественной работы алгоритма управления необходимо:

- провести тарировку тензоизмерительных устройств бункеров-питателей АКТ;
- установить измеритель уровня радарного типа (ввиду высоких температур и большой запыленности) в бункер загрузки ПР в качестве дублирующего канала измерения веса;
- заменить существующий расходомер переменного перепада давления анодного газа на расходомер вихревого типа для минимизации ошибки показаний расхода.

Выводы

1. Предложена структура системы управления аппаратом улавливания фторсодержащих компонентов производства UF_6 , выбран тип регулятора, рассчитаны его параметры.
2. Предложены, программно реализованы и исследованы алгоритмы управления, обеспечивающие согласованную загрузку твердого сырья в аппарат комбинированного типа и пламенный реактор фторирования при максимальном улавливании ценных компонентов.
3. Доказана возможность применения разработанных алгоритмов для автоматизированного управления аппаратом комбинированного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Береза В.Н., Дядик В.Ф., Байдали С.А. Математическая модель аппарата комбинированного типа для улавливания ценных компонентов из хвостовых технологических газов производства гексафторида урана // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 3. – С. 55–60.
2. Тураев Н.С., Жерин И.И. Химия и технология урана. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2006. – 396 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. – 541 с.

4. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 327 с.
5. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: ПИТЕР, 2001. – 480 с.

Поступила 09.04.2009 г.