

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Посягин Б.С., Герке В.Г. Информационно-аналитические комплексы диспетчерского управления потоками газа Единой системы газоснабжения России как инструмент повышения эффективности управления объектами газовой промышленности // Развитие компьютерных комплексов моделирования, оптимизации режимов работы систем газоснабжения и их роль в диспетчерском управлении технологическими процессами в газовой отрасли: Матер. 1-й Междунар. научно-практ. конфер. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. – Т. 1. – С. 5–16.
2. Кудинов А.В., Марков Н.Г. Геоинформационные технологии в управлении пространственными инженерными сетями. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 176 с.
3. Богдан С.А., Кудинов А.В., Марков Н.Г., Мирошниченко Е.А., Острасть П.М., Родикевич С.С. Автоматизация процессов диспетчерского управления нефте- и газотранспортными сетями // Автоматизированное управление и информационные технологии: Межвуз. сб. научно-техн. трудов. – Вып. 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 56–64.
4. Богдан С.А., Ковин Е.А., Кудинов А.В., Марков Н.Г. Инструментальные средства разработки систем оперативного диспетчерского управления газотранспортными сетями // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7 – С. 56–64.
5. ANSI/ISA-95.00.01-2000 Enterprise-Control System Integration. P. 1: Models and Terminology. http://www.isa.org/Template.cfm?Section=Shop_ISA&Template=/Ecommerce/ProductDisplay.cfm&Productid=2612 (17.10.2007).

Поступила 16.10.2007 г.

УДК 66.012-52

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРАКЦИОННОЙ КОЛОННОЙ

Ю.А. Чурсин, А.Г. Горюнов, С.Н. Ливенцов

Томский политехнический университет
E-mail: _Ju_@sibmail.com

Экстракционная колонна проанализирована как объект управления, разработано ее математическое описание с учетом особенностей технологического процесса. На основе математического описания создана имитационная модель колонного аппарата. Синтезирована система автоматизированного управления плотностью реэкстракта в пульсационной колонне. Проведена оценка качества управления обеспечиваемого системой.

В радиохимическом производстве широкое применение получили экстракционные технологии, использование которых позволяет обеспечить разделение веществ. Для аппаратного оформления этих технологий в переработке отработанного топлива используют пульсационные колонные экстракторы, соединенные каскадно.

Для снижения производственных затрат, повышения безопасности и смены элементной базы управляющих средств в установках по переработке отработанного ядерного топлива (ОЯТ) была поставлена задача по разработке системы автоматизированного управления (САУ) процессом реэкстракции в экстракционной колонне, являющейся частью установки.

В работах [1–3] рассматривается моделирование процесса экстракции в колонных аппаратах, однако, полученные в них результаты не позволяют создать эффективную систему автоматизированного управления. Разработанные ранее модели содержат упрощенные дифференциальные уравнения, решения которых не обеспечивают необходимой точности моделирования процесса.

Научная новизна данной работы заключается в создании модели экстракционной колонны как объекта управления, что позволяет проектировать систему автоматизированного управления, работающие в реальном времени. Установка системы автоматизированного управления экстракционной

колонной с процессом реэкстракции урана является принципиально новым техническим решением. Создание качественной системы автоматизированного управления процессом реэкстракции позволит повысить его безопасность, улучшить технико-экономические показатели производства.

Исследуемый объект (рис. 1) представляет собой уникальную установку для переработки облученного ядерного топлива по экстракционной технологии [4], она включает 5 экстракционных тарельчатых пульсационных колонн (ЭК).

Головная экстракционная колонна ЭК1 предназначена для экстракции урана и плутония и вымывания из органической фазы продуктов деления нисходящим потоком азотнокислого водного раствора. В колонне ЭК2 происходит дальнейшая промывка экстракта для удаления высокоактивных продуктов деления, а в колоннах ЭК3 и ЭК4 – реэкстракция плутония и урана. Колонна ЭК5 предназначена для промывки экстрагента

В колонну ЭК4 поступают водный поток – ВФ (сплошная фаза) и поток органической фазы – ОФ (дисперсная фаза). Поток ВФ подается с помощью насоса, а его расход регулируется локальным контуром стабилизации. Водная фаза удаляется из нижней отстойной зоны ЭК4 встроенным пульсасосом в виде реэкстракта урана. Давление в ресивере стабилизируется локальным контуром с помощью вентиля.

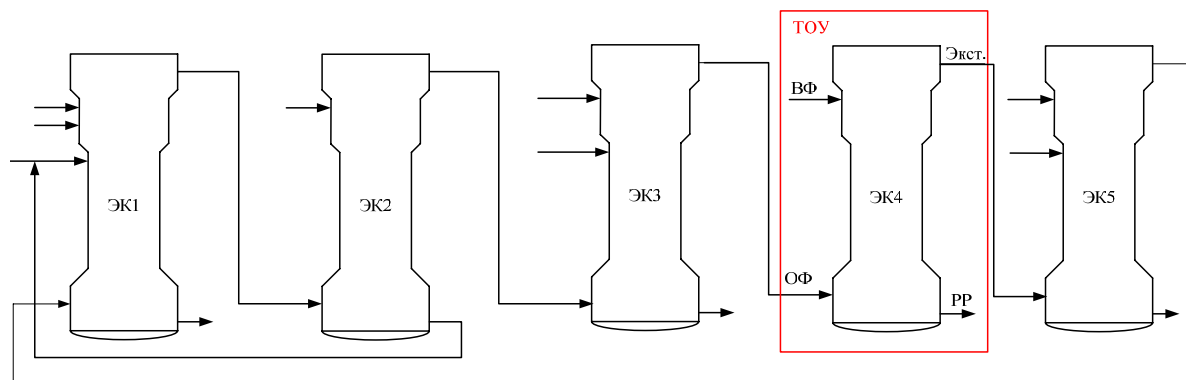
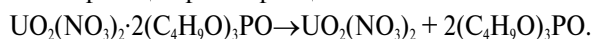


Рис. 1. Упрощенная схема экстракционного каскада. ВФ – водная фаза, ОФ – органическая фаза, РР – реэкстракт, Экст. – экстрагент

Работа колонны ЭК4 в ручном режиме влечет за собой увеличение расходов на реагенты. При избыточном поступлении водной фазы дорогостоящая органическая фаза может уноситься вместе с водной фазой в реэкстракт. В противном случае при недостаточном поступлении водной фазы, металл будет идти в экстрагент. Стабилизация плотности органической фазы, а, следовательно, и концентрации урана на заданном уровне, позволит уменьшить экономические потери. Именно это и обуславливает выбор колонны ЭК4 в качестве объекта управления для разрабатываемой системы автоматизированного управления.

Рассматривая каскад в целом, видно, что расход потока ОФ влияет на технологические процессы во всех колоннах, поэтому не может рассматриваться как управляющее воздействие для ЭК4. Использовать его в качестве управляющего нельзя, поэтому для управления выбираем изменение расхода водной фазы.

Приведем описание ПУРЕКС (plutonium-uranium extraction)-процесса, происходящего на данной установке. В ПУРЕКС-процессе для очистки и разделения урана и плутония используются экстракционные методы. Исходным материалом служит растворенное облученное ядерное топливо $UO_2(NO_3)_2$. В качестве экстрагента используется 30 %-ный (по объему) раствор три-н-бутилфосфата (ТБФ) $(C_4H_9O)_3PO$ в разбавителе типа «керосин»; высаливатель – азотная кислота. Разделение основано на экстрагируемости нитратов уранила и четырехвалентного плутония, и неспособности продуктов деления и трехвалентного плутония переходить в органическую фазу [5]. В нашем случае протекает реакция реэкстракции:



В колонных реакторах наибольшее распространение получили следующие методы моделирования [6] процесса экстракции/реэкстракции [7]: теория подобия, гидравлическое моделирование и математическое моделирование.

Нами был использован метод математического моделирования. Данный метод используют при проектировании целого ряда процессов химической технологии, но практическая применимость метода для массообменных аппаратов затрудни-

тельна вследствие необходимости предварительно определения общего коэффициента массопереноса и коэффициентов продольного и радиального перемешивания в фазах [5, 7]. Поскольку в настоящее время нет надежной методики расчета этих параметров, и их приходится определять экспериментально, применение методов математического моделирования для процессов массообмена ограничивается частными случаями. При этом используют однопараметрическую диффузионную модель с учетом перемешивания в обеих фазах [5].

Уравнения неустановившейся во времени конвективной диффузии с переходом вещества из одной фазы в другую имеют вид [4, 5, 8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = -U_1 \frac{\partial x}{\partial h} + D_1 \frac{\partial^2 x}{\partial h^2} + W, \\ \frac{\partial y}{\partial t} = U_2 \frac{\partial y}{\partial h} + D_2 \frac{\partial^2 y}{\partial h^2} + W, \end{cases} \quad (1)$$

где U_1, U_2 – скорости течения фаз; D_1, D_2 – коэффициенты диффузии жидкостей; h – высота колонны;

$$W = \beta_1 a(x^* - x) = \beta_2 a(y - y^*),$$

где β_1 и β_2 – коэффициенты массопереноса от одной фазы к другой; a – поверхность соприкосновения двух фаз на единицу объема; x^*, y^* – равновесные значения концентраций урана в органической и водной фазах.

Коэффициент диффузии D жидкостей настолько мал, что уже при малых скоростях жидкости конвективный перенос вещества значительно преобладает над молекулярной диффузией. Для упрощения выражения (1) обычно пренебрегают членом уравнения, содержащим D :

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = -U_1 \frac{\partial x}{\partial h} + \beta_1 a(x^* - x), \\ \frac{\partial y}{\partial t} = U_2 \frac{\partial y}{\partial h} + \beta_2 a(y - y^*). \end{cases} \quad (2)$$

Упрощенное уравнение конвективной диффузии (2) – уравнение в частных производных в первом приближении описывает процессы в противоточных колоннах [5, 7–9]. Однако данное уравнение

предполагает, что скорости U_1, U_2 постоянны. В разрабатываемой нами модели скорости меняются в зависимости от времени, координаты и концентрации урана. В этой связи уравнения системы (2) становятся нелинейными дифференциальными уравнениями, аналитическое решение которых затруднено.

Система (2) не может с достаточной точностью описывать процесс реэкстракции в колонне ЭК4. Скорости течения фаз не только не постоянны во времени, но также различаются по высоте колонны. Для получения достоверных результатов описанную выше систему следует дополнять уравнениями, описывающими эту зависимость. Чтобы исключить из уравнений производную по высоте, используется ряд ступеней. Для каждой из ступеней решается свое уравнение материального баланса. Ступени соединяются последовательно. Данный метод называется аналитическим методом расчета по ступеням извлечения [5, 10].

При разработке модели приняты следующие допущения.

1. Для сплошной фазы используется модель идеального вытеснения [7]. Расход реэкстракта равен расходу входной водной фазы. Использовать данную модель позволяет то, что отношение высоты рабочего объема колонны к его диаметру достаточно велико (более 20).
2. Азотная кислота не переходит в органическую фазу. Не учитывается влияние концентрации азотной кислоты на процесс реэкстракции урана. Данное допущение работает, т. к. концентрация кислоты в водной фазе очень мала (не превышает 0,01 %).
3. На каждой ступени колонны устанавливается равновесие между содержанием растворенного вещества в обеих фазах [4, 5].

4. Скорость экстракции очень велика, инерционность реэкстракции незначительна, и поэтому не учитывается (равновесие устанавливается мгновенно) [5].
5. Интенсивность пульсаций жидкости одинакова во всех ступенях (используется модель идеального вытеснения).
6. Поскольку температурные изменения в колонне имеют большую инерционность, можно считать, что температура жидкости в колонне постоянна. Температуры всех входных и выходных потоков одинаковы, теплообмен между фазами и окружающей средой не учитывается.

В модели рассматривается только процесс реэкстракции урана. Процессы, связанные с осколками деления не учитываются, т. к. их концентрация пренебрежимо мала. Также не рассматривается унос части ТБФ вместе с водной фазой.

Входными параметрами колонны являются потоки и концентрации сплошной и дисперсной фаз, а также физические параметры ступени (диаметр, высота, частота и амплитуда пульсаций). Для колонны заданы коэффициенты разделения по высоте, исходя из которых вычисляется распределение концентраций урана в дисперсной фазе для каждой ступени. Из статического режима работы колонны находятся начальная скорость дисперсной фазы и выходная концентрация урана в сплошной фазе.

Упрощенный алгоритм работы ступени приведен на рис. 2.

Вначале идет расчет объемов, занимаемых сплошной и дисперсной фазами, а также расчет выходных потоков этих фаз. Полученные данные позволяют рассчитать, пользуясь аналитическим методом расчета по ступеням извлечения [5, 10],

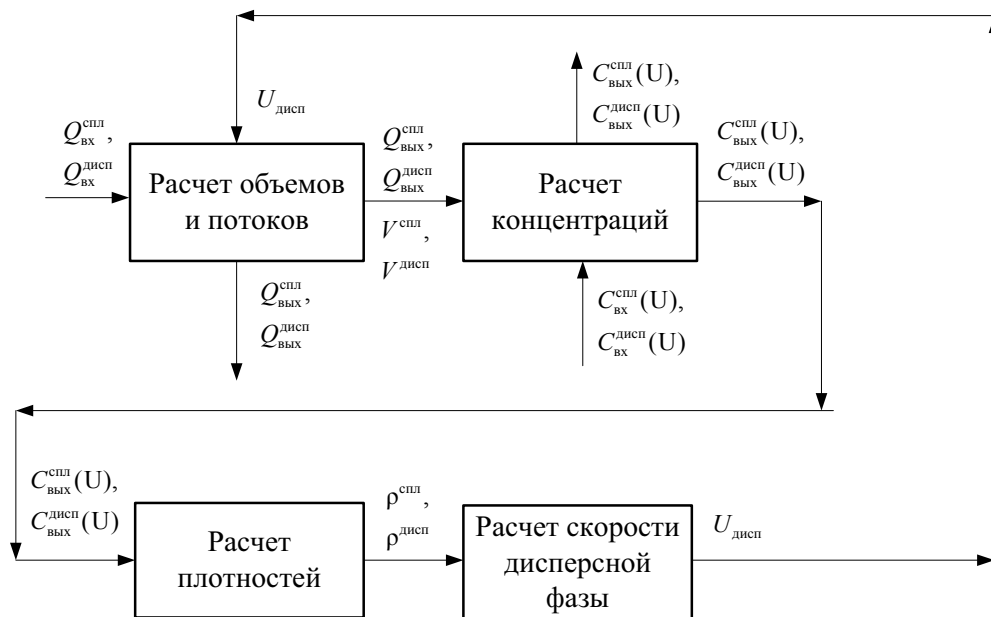


Рис. 2. Упрощенный вид модели ступени колонны. $Q_{вх}^{спл}, Q_{вх}^{дисп}, Q_{вых}^{спл}, Q_{вых}^{дисп}$ – входные и выходные потоки сплошной и дисперсной фаз; $V^{спл}, V^{дисп}$ и $\rho^{спл}, \rho^{дисп}$ – объемы и плотности сплошной и дисперсной фаз; $C_{вх}^{спл}(U), C_{вых}^{спл}(U), C_{вх}^{дисп}(U), C_{вых}^{дисп}(U)$ – входные и выходные концентрации урана в сплошной и дисперсной фазах; $U_{дисп}$ – скорость дисперсной фазы

изменение концентраций урана и кислоты в обеих фазах в ходе численного решения дифференциального уравнения материального баланса. Для полученного состояния системы находятся плотности фаз, и пересчитывается скорость дисперсной фазы, которая влияет на расходы фаз и будет нужна для последующих итераций расчета.

Буйковый измеритель плотности находится несколько ниже последней из ступеней, поэтому для получения достоверных результатов необходимо учитывать время запаздывания $t_{\text{зап}}$ дисперсной фазы в нижней отстойной зоне (НОЗ). Из-за наличия НОЗ колонна получает запаздывание порядка 1000 с, которое меняется в ту или иную сторону в зависимости от скорости движения фаз:

$$t_{\text{зап}} = \frac{V_{\text{НОЗ}}}{Q_{\text{сп}}},$$

где $V_{\text{НОЗ}}$ – объем НОЗ; $Q_{\text{сп}}$ – расход сплошной фазы.

Для выявления необходимого количества ступеней в имитационной модели проводились эксперименты с увеличением количества ступеней и вычислялась среднеквадратичная погрешность между текущим переходным процессом и предыдущим.

Установлено, что для получения достоверных результатов необходимо и достаточно иметь десять ступеней. Дальнейшее увеличение количества ступеней не приводит к уменьшению среднеквадратичной погрешности.

Проведено расчетное построение графиков зависимости распределения концентрации урана по высоте колонны после изменения отдельных параметров технологического процесса. На данный момент экспериментально проверена адекватность полученных результатов моделирования. Для дальнейшего уточнения работы модели данные эксперименты будут продолжены.

В настоящее время проводится модернизация созданной модели, а именно реализация следующих датчиков: буйкового уровнемера, нейтронного индикатора отклонения уровня (уровень в пульскамере) и измерителя концентрации металла. Модель учитывает влияние температуры и азотной кислоты на протекание химической реакции. Это позволит усложнить структуру системы управления, использовать усложненные алгоритмы регулирования, повысить качество системы.

Разработанная имитационная модель процесса рекстракции в колонне ЭК4 является нелинейной, т. к. в дифференциальных уравнениях, описывающие экстракционную ступень, входит произведение самой функции и ее производной, поэтому требуется ее линеаризация. Для построения линейной модели необходимо выяснить, в каком диапазоне изменения переменных полученная имитационная модель является линейной. Для этого на модели проведены соответствующие эксперименты. По управляющему каналу (расход водной фазы) подавались ступенчатые воздействия различной амплитуды.

Анализ результатов показывает, что при нелинейности в пределах 15 % по сравнению со статической характеристикой модель линейна при изменении расхода сплошной водной фазы (управляющая координата) в диапазоне $\pm 15\%$ от начальной точки. Измеряемая (регулируемая) координата меняется в диапазоне $(-0,8; +1)\%$.

Следовательно, имитационную модель ЭК4 можно заменить линейной в окрестностях рабочей точки в диапазоне $\pm 15\%$ от регламентного значения расхода ВФ.

Для создания системы регулирования нас будет интересовать передаточная функция по расходу водной фазы (остальные функции могут понадобиться при расчете регулятора на компенсацию возмущений по данным каналам).

Составим структурную схему системы автоматизированного управления.

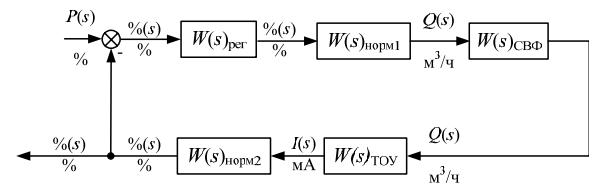


Рис. 3. Структурная схема САУ $W(s)_{\text{пер}}$, $W(s)_{\text{норм1}}$, $W(s)_{\text{норм2}}$, $W(s)_{\text{СВФ}}$, $W(s)_{\text{ТОУ}}$ – передаточные функции регулятора, нормирующих преобразователей 1 и 2, локального контура стабилизации расхода ВФ, технологического объекта управления (ТОУ) соответственно

Для упрощения дальнейших расчетов все элементы кроме регулятора объединим в одном элементе – обобщенном объекте.

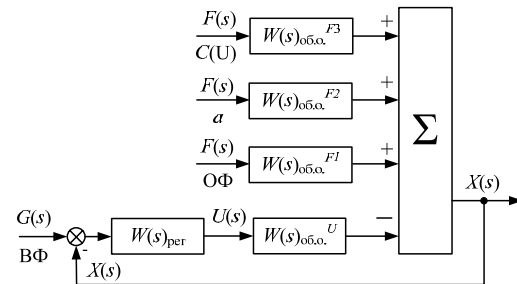


Рис. 4. Упрощенная структурная схема САУ. $W(s)_{\text{пер}}$, $W(s)_{\text{об.о.}}^{F1}$, $W(s)_{\text{об.о.}}^{F2}$, $W(s)_{\text{об.о.}}^{F3}$, $W(s)_{\text{об.о.}}^U$ – передаточные функции регулятора, обобщенного объекта по возмущениям и управлению соответственно

По управляющему каналу линеаризованная модель является аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием. Исходя из выше изложенного, остановим свой выбор на регуляторах типа ПИ (пропорционально-интегральный) и ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный), как наиболее универсальных.

Для расчета переходных процессов замкнутой САУ использован программный продукт «SarSintez», разработанный на кафедре электроники и автоматики физических установок ТПУ. Кроме расчетов переходных процессов замкнутой САУ по возмущающему воздействию данный программный продукт

позволяет определить время регулирования и динамический коэффициент перерегулирования.

Экспериментальное исследование САУ ЭК4 проводилось на компьютерной модели системы, разработанной в пакете Matlab/Simulink V. 6.5 [11]. На вход системы подавались возмущения по всем каналам и оценивалось качество регулирования. На рис. 5–8 приведены графики, полученные в результате исследования модели. Все воздействия подавались в момент времени $t_0=600$ с.

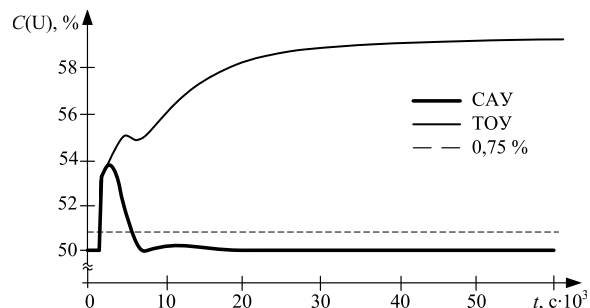


Рис. 5. Реакция САУ и ТОУ на изменение расхода ОФ на 15 %

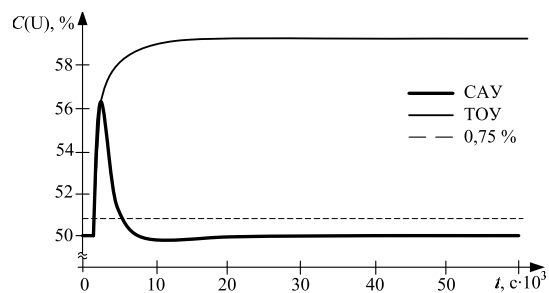


Рис. 6. Реакция САУ и ТОУ на изменение концентрации урана в ОФ на 15 %

Синтезированная САУ показывает результаты, удовлетворяющие предъявляемым требованиям. Значительное время регулирования при изменении амплитуды пульсаций связано с отличием передаточной функции ТОУ по управлению и по данному возмущению. Для уменьшения времени регулирования в данном случае следует вводить более жесткие требования к стабильности амплитуды пульсаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Семенов Е.Н., Карелин А.И. Математическая модель неравновесного экстракционного процесса в колонном аппарате // Журнал прикладной химии. — 1997. — Т. 70. — Вып. 9. — С. 1526–1528.
- Карелин А.И., Семенов Е.Н. Особенности экстракционных процессов, реализуемых в колонном аппарате // Журнал прикладной химии. — 1997. — Т. 70. — Вып. 11. — С. 1852–1854.
- Кондаков В.М., Семенов Е.Н., Матюха В.А., Козырев А.С., Рябов А.С., Носков М.Д., Истомин А.Д. Математическое моделирование переходных процессов в каскаде экстракционных колонн // Известия Томского политехнического университета. — 2002. — Т. 305. — № 4. — С. 139–146.
- 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.
- Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 399 с.

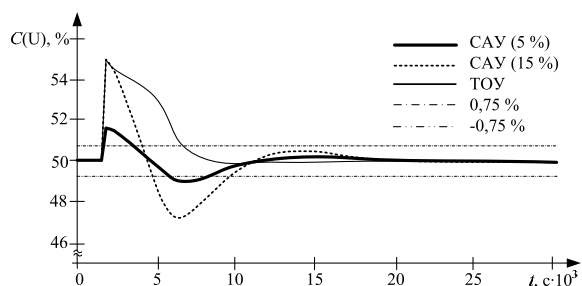


Рис. 7. Реакция САУ и ТОУ на изменение амплитуды пульсаций в колонне на 5 и 15 %

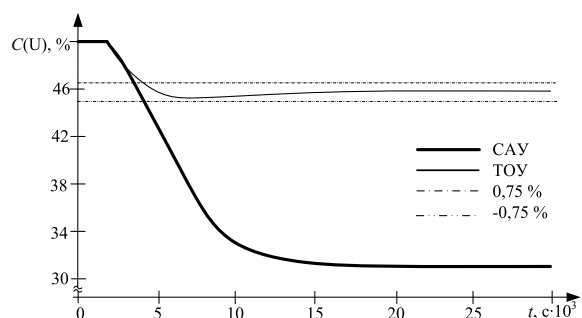


Рис. 8. Реакция САУ и ТОУ при изменении уставки на 4 %

В результате выполненной работы решены следующие задачи.

- Проведен анализ процесса реэкстракции в колонне ЭК4.
- Создана имитационная модель колонны ЭК4.
- Разработана САУ колонной ЭК4.
- Имитационная модель и САУ реализованы в виде компьютерной модели в программном пакете Matlab/Simulink V. 6.5.
- Проведено экспериментальное исследование САУ.

Система автоматизированного управления процессом реэкстракции в реэкстракционной колонне внедрена на Радиохимическом заводе Сибирского химического комбината, что позволило значительно улучшить технико-экономические показатели, повысить безопасность и надежность производства.

- Столер С., Ричардс Р. Переработка ядерного горючего. — М.: Атомиздат, 1964. — 647 с.
- Карпачева С.М., Захаров Е.И. Основы теории и расчета пульсационных колонных реакторов. — М.: Атомиздат, 1980. — 256 с.
- Кафаров В.В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. — М.: Высшая школа, 1991. — 400 с.
- Багров В.Г., Белов В.В., Задорожный В.Н., Трифонов А.Ю. Методы математической физики. Специальные функции. Уравнения математической физики. — 2-е изд., испр. и доп. — Томск: Изд-во «НТЛ», 1999. — 771 с.
- Михайлов В.П. Дифференциальные уравнения в частных производных. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1983. — 424 с.
- Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя. — М.: СОЛОН-Пресс, 2002. — 768 с.

Поступила 07.12.2006 г.