

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ В КОЛОННЕ

**А.Д. Хренков, Ю.А. Чурсин, А.А. Денисевич**

*Томский политехнический университет, г.Томск*



Представлена модель многокомпонентного процесса экстракции в пульсационной колонне. Проведены исследования модели на соответствие реальному объекту. Полученные результаты показали, что модель адекватна реальной установке по переработке ядерного топлива.

**Ключевые слова:** экстракция, многокомпонентная модель, экстракционная колонна, коэффициент распределения, экстракт, материальный баланс, реэкстракт, экстрагент.

**Keywords:** extraction, multi-component model, extraction columns, the coefficient of distribution, extract, material balance, reextract, extractant.

Проблема надежного качественного и эффективного управления технологическими процессами, в частности, в области разрабатываемых инновационных производств ядерного топливного цикла (ЯТЦ) имеет важное экономическое значение, поскольку ее решение способствует ускоренному развитию атомной энергетики и энергосбережению и отвечает политике Правительства Российской Федерации, направленной на ускоренное развитие атомного энергопромышленного комплекса России. Решение этой проблемы позволит повысить производительность и эффективность производств ЯТЦ в целом, улучшить их показатели по безопасности и экологичности.

Развитие ядерной энергетики потребовало создания реакторов с более высоким температурным потенциалом для производства перегретого пара. Твэлы энергетических реакторов существенно отличаются от твэлов реакторов для производства плутония. Данные твэлы изготавливают из термостойких соединений  $UO_2$ ,  $PuO_2$  или смешанных уран-плутониевых оксидов ( $UO_2 \cdot PuO_2$ ). Для реакторов-размножителей на быстрых нейтронах перспективно топливо на основе карбидов  $UC$ ,  $PuC$ ,  $(U, Pu)C$  и нитридов  $UN$ ,  $PuN$ ,  $(U, Pu)N$ . Это топливо имеет большую по сравнению с оксидами теплопроводность [1]. Отработанное ядерное топливо (ОЯТ) после энергетических реакторов ВВЭР-1000 и РБМК в России в промышленных масштабах не перерабатывалось. Вместе с тем увеличение количества отработанного ядерного топлива диктует необходимость его регенерации, что является основной задачей радиохимической технологии переработки отработавших тепловыделяющих элементов (твэлов).

Это обстоятельство привело к необходимости изменения PUREX-процесса, используемого при переработке топлива. Для применения PUREX-процесса к пере-

работке отработанного топлива энергетических реакторов потребовались многолетние усилия больших коллективов специалистов в разных странах мира.

Современные технологии переработки отработанного ядерного топлива требуют контроля и учета всех основных экстрагируемых компонентов. В процессе разработки автоматизированных систем управления экстракторами данное требование привело к необходимости создания модели процесса многокомпонентной экстракции. Разработка такой модели позволит создать систему управления, которая будет учитывать влияние всех основных компонентов, участвующих в процессе [2].

«Выполняемые работы поддерживаются грантами ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. в рамках реализации мероприятий 1.2.2. и 1.3.2. НИР «Радиохимия. Химия высоких энергий»: ГК № П427 от 31.07.2009 «Исследование и разработка системы автоматизированного управления экстракционными процессами на радиохимическом производстве», ГК № П299 от 24.07.2009 «Компьютерное моделирование, автоматизированное управление и оптимизация радиохимических производств».

### **МОДЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ**

Для моделирования процесса экстракции в колонне необходимо определить-ся с задаваемыми параметрами, входными, выходными переменными.

Выходными переменными модели являются

- распределения концентрации моделируемых компонентов по высоте колонны;
- выходные потоки по высоте колонны;
- плотности, объемы фаз по высоте колонны.

Нахождение данных величин позволит управлять процессом экстракции (ре-экстракции), следить за соблюдением технологии и безопасностью протекания технологического процесса.

Помимо входных и выходных потоков компонентов существуют дополнительные параметры, влияющие на ход процесса экстракции (реэкстракции).

Геометрическими параметрами для моделирования колонны являются

- высота колонны (может меняться в произвольных пределах);
- внутренний диаметр реакционной зоны (должен быть меньше внешнего диаметра);
- внешний диаметр реакционной зоны (отношение внешнего диаметра к высоте колонны должно быть не менее восьми).

Данные параметры влияют на объем реакционной зоны и скорость процесса.

Параметрами технологического процесса являются

- частота пульсаций (задается в соответствии с регламентом);
- амплитуда пульсаций (задается в соответствии с регламентом);
- применяемая насадка (определяет способ нахождения скорости дисперсной фазы).

Данные параметры влияют на площадь контакта фаз, а также скорость дисперсной фазы.

Параметры моделирования:

- количество ячеек по высоте (обычно не менее десяти);
- время моделирования (зависит от постоянной времени колонны);
- шаг времени моделирования (зависит от подаваемого воздействия).

Данные параметры влияют на точность моделирования и устойчивость нахождения решений для моделирования.

Входными переменными для модели являются входные потоки сплошной и дисперсной фаз и входные концентрации компонентов в фазах.

Поток дисперсной фазы не должен превышать потока сплошной фазы. Диапазон изменения входных переменных, при котором модель остается адекватной, должен быть не менее 15%. Однако недопустимо изменение входных переменных, приводящее к «перевороту» (плотность легкой фазы становится больше, чем плотность тяжелой) колонны.

Начальными условиями моделирования являются

- входные и выходные потоки фаз;
- входные и выходные концентрации компонентов в фазах;
- начальные распределения концентраций компонентов;
- коэффициенты массопередачи.

Реализуемые моделью параметры процесса экстракции (реэкстракции):

- распределения концентрации урана и азотной кислоты по высоте колонны в каждый момент времени;
- выходные потоки по высоте колонны в каждый момент времени;
- плотности, объемы фаз по высоте колонны в каждый момент времени;
- показания датчиков в каждый момент времени.

Модель – это мысленно представляемая или материально реализованная система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна замещать его так, что ее изучение дает новую информацию об этом объекте [3].

По уровню, «глубине» моделирования модели бывают эмпирические – на основе эмпирических фактов, зависимостей, теоретические – на основе математических описаний и смешанные, полуэмпирические – использующие эмпирические зависимости и математические описания.

Процесс моделирования является итеративным. В случае неудовлетворительных результатов осуществляется возврат к одному из ранних этапов, который мог привести к разработке неудачной модели. Уточнение модели происходит до тех пор, пока не будут получены приемлемые результаты.

Математический подход к моделированию [4], довольно часто применяемый при разработке моделей экстракционных аппаратов, имеет ряд недостатков вследствие того, что исследователь моделирует не реальный объект, а только математическое описание реального объекта. Необходимая информация в этом случае получается после постановки серии вычислительных экспериментов с математическими моделями. Основными недостатками при этом являются

- низкая адекватность математической модели реальному объекту;
- проблемы, связанные с решаемостью математических моделей из-за наличия в них разрывных функций;
- непригодность математических моделей для большинства объектов с переменной структурой.

При имитационном моделировании (при отсутствии строгого и формально записанного алгоритма) главную роль играют уже технология и средства моделирования [5].

Имитационные модели [6] применяются для более сложных объектов, не имеющих аналитического описания (или оно слишком сложно для использования в ЭВМ). Имитационная модель адекватно описывает зависимость выходных переменных от входных, включая возмущения. При этом объект рассматривается как «черный ящик» с неизвестным принципом действия и структурой. Для технических систем с известной структурой имитационные модели составляются для отдельных ее частей. Если для некоторых из этих частей возможно получить аналитичес-

кую модель, в целом получится комбинированная имитационно-аналитическая модель системы.

В работе имитационное моделирование реализуется на ЭВМ, потому что исходное математическое описание любой динамической системы представляет собой совокупность дифференциальных, алгебраических, логических, разностных уравнений, описывающих физические процессы в отдельных функциональных элементах системы. Для формирования модели требуемого аппарата используется блочный принцип формирования моделей [7] с применением специализированных программно-технических комплексов.

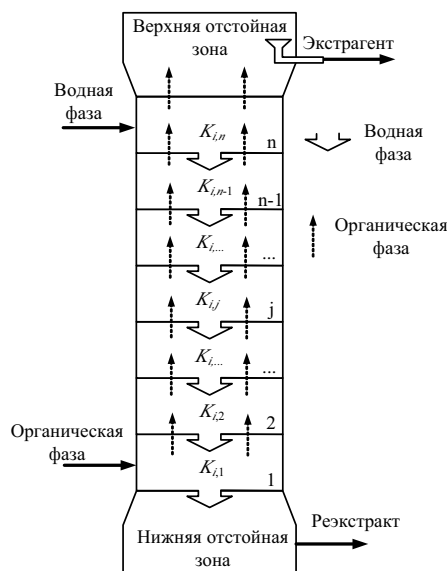
Все экстракционные колонны имеют схожую структуру и отличаются друг от друга только геометрическими параметрами, применяемыми насадками, технологическими условиями процесса. Это позволяет обобщить знания, полученные в результате предыдущих работ и использовать их в данной работе. Для дальнейшего моделирования необходимо задать

некоторые допущения, которые в определенном диапазоне не нарушают принципов моделируемого процесса и позволяют использовать представленный математический аппарат.

При разработке модели были приняты следующие допущения:

- для сплошной фазы используется модель идеального вытеснения [7], т.к. отношение высоты колонны к ее диаметру достаточно велико;
- в каждой ячейке устанавливается равновесие между содержанием растворенного вещества в обеих фазах [8–10];
- скорость экстракции очень велика, инерционность реэкстракции незначительна и поэтому не учитывается (равновесие устанавливается мгновенно) [8, 11, 12];
- ввиду использования модели идеального вытеснения для раствора, находящегося в колонне, интенсивность пульсаций жидкости одинаковая во всех ступенях.

Рис. 1. Перемещение фаз в исследуемой колонне:  $K_i$  – коэффициент распределения  $i$ -го компонента в  $j$ -ой ступени между водной и органической фазами



Перемещение участвующих в процессе экстракции (реэкстракции) компонентов в модели колонны ЭК4 представлено на рис. 1. Реализуемая модель состоит из экстракционной зоны, которая может включать в себя промывную зону (1, ..., n ячейки), и нижней отстойной зоны (НОЗ).

Для моделирования процессов экстракции, реэкстракции и промывания (с наличием дисперсной фазы) разработана универсальная структура ячейки. Ячейка представляет собой некий объем, в котором происходит мгновенная экстракция, а массоперенос описывается дифференциальными уравнениями материального баланса.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ЯЧЕЙКИ

Описание процесса экстракции одного из компонентов в элементарном объеме в динамическом режиме выражается системой уравнений, основанной на уравнении материального баланса,

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(X_j^{out} \cdot V_x + Y_j^{out} \cdot V_y) = \sum X_j^{in} \cdot Q_x^{in} + X_{k,j} \cdot Q_k + Y_j^{in} \cdot Q_y - X_j^{out} \cdot Q_x^{out} - Y_j^{out} \cdot Q_y, \\ X_j^{out} = K_p \cdot Y_j^{out} \end{cases} \quad (1)$$

где  $X_j^{out}$ ,  $X_j^{in}$  – концентрации компонента в дисперсной фазе на выходе и входе ячейки;  $X_{k,j}$  – концентрация  $j$ -го компонента, поступающего в  $k$ -том потоке в ячейку;  $Y_j^{out}$ ,  $Y_j^{in}$  – концентрации компонента в сплошной фазе на выходе и входе ячейки;  $V_x$  – объем дисперсной фазы в ячейке;  $V_y$  – объем сплошной фазы в ячейке;  $Q_x^{in}$ ,  $Q_x^{out}$  – входящий и выходящий в ячейку потоки дисперсной фазы;  $Q_k$  – расход  $k$ -го потока, входящего в ячейку;  $Q_y$  – расход потока сплошной фазы;  $K_p$  – коэффициент распределения.

Для удобства данная система используется в интегральном виде

$$X_j^{out} = \frac{\int (X_j^{in} \cdot Q_x^{in} + \sum X_{k,j} \cdot Q_k + Y_j^{in} \cdot Q_y - X_j^{out} \cdot Q_x^{out} - Y_j^{out} \cdot Q_y) dt + C_j}{V_x + V_y \cdot K_{ppopr} \cdot K_{pstj}}, \quad (2)$$

$$Y_j^{out} = X_j^{out} \cdot K_{ppopr} \cdot K_{pstj}. \quad (3)$$

$C_j$  – константа интегрирования, физическим смыслом которой является полная масса компонента в ячейке:

$$C_j = X_{j0}^{out} \cdot V_{x0} + Y_{j0}^{out} \cdot V_{y0}.$$

Коэффициент распределения  $K_{pj}$  состоит из двух множителей.  $K_{pstj}$  находится в соответствии с концентрациями при текущей концентрации компонента в ячейке в фазах и влиянием других компонентов.  $K_{pj}$  находится в начале моделирования и приводит коэффициент  $K_{ppoprj}$  в соответствие коэффициенту  $K_{pj}$ , который должен обеспечивать

$$K_{ppoprj} = \frac{K_{pj}}{K_{pstj}}. \quad (4)$$

Коэффициент распределения  $K_p$  находится или задается индивидуально для каждого компонента и для каждой ячейки, в которой производится расчет. Обязательным условием выбора  $K_p$  является сохранение материального баланса в ячейке. В случае, если  $K_p$  меняется ввиду каких-либо причин, то распределение потоков происходит следующим образом.

Пересчитывается коэффициент  $K_{pstj}$ :

$$K_{pstj} = f(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n). \quad (5)$$

В данной работе все функции выбора коэффициента распределения заданы в виде семейств кривых и требуемый коэффициент находится интерполированием. Полученный коэффициент подставляется в выражения (2) и (3) и находят новые значения выходных концентраций. Материальный баланс при этом не нарушается.

Расчет изменения во времени динамики потоков и объемов в ячейке производится на основании материального баланса системы.

$$Q_x = Q_{x0} + \frac{V_x \cdot U_x}{h}. \quad (6)$$

Здесь  $Q_{x0}$  – константа, обеспечивающая сохранение материального баланса и вводится ввиду того, что полуэмпирическая формула не позволяет абсолютно точно определить скорость дисперсной фазы.

$$Q_{x0} = Q_{x0}^{in} + \sum Q_{x0k}^{in} - \frac{V_{x0} + U_x}{\Delta h}. \quad (7)$$

Скорости дисперсной и сплошной фаз можно определить по следующим формулам [9]:

$$U_x = 22 \cdot \left( \frac{\rho_x}{\mu_x} \right)^{0,33} \cdot \left( \frac{\rho_y - \rho_x}{\rho_y} \right)^{0,66} \cdot \bar{d}_k, \quad (8)$$

$$U_y = \frac{Q_y}{S - \frac{Q_x}{U_x}}, \quad (9)$$

где  $\mu_x$  – вязкость дисперсной фазы;  $\rho_x, \rho_y$  – плотности сплошной и дисперсной фаз в ячейке;  $S$  – площадь сечения колонны;  $Q_x, Q_y$  – расходы сплошной и дисперсной фаз.

Средний диаметр капель выражается формулой [9]

$$\bar{d}_k = 0,135 \cdot F \cdot \left( \frac{\sigma}{\rho_y} \right)^{0,6} \cdot (f \cdot a)^{-1}, \quad (10)$$

где  $a$  – амплитуда колебаний;  $\sigma$  – межфазное поверхностное натяжение капли ( $\sigma$  равно от 18 до 24 дн/см);  $f$  – частота пульсаций;  $F$  – проходное (свободное) сечение насадки.

$$F = \frac{4 \cdot b_{\text{отв}}^2 \cdot \sin \alpha \cdot (2 + \cos \alpha)}{\pi D_k^2} \cdot N_{\text{отв}}, \quad (11)$$

где  $b_{\text{отв}}$  – ширина отверстия в насадке (10×20 и 70×140 мм);  $\alpha$  – угол наклона лопаток насадки (от 10 до 45°);  $D_k$  – диаметр колонны (200, 600, 900, 1500 мм);  $N_{\text{отв}}$  – число отверстий в насадке.

Объем дисперсной фазы находится по формуле

$$V_x = V_{x0} + \int (Q_x^{\text{out}} - Q_x^{\text{in}}) dt, \quad (12)$$

где  $V_{x0}$  – начальный объем дисперсной фазы.

Начальные объемы фаз находятся исходя из отношения потоков фаз:

$$V_{x0} = V \cdot \frac{Q_{x0}}{Q_{y0} + Q_{x0}}, \quad (13)$$

$$V_y = V - V_x, \quad (14)$$

где  $V$  – полный объем ячейки.

Влияние азотной кислоты играет немаловажную роль в процессе экстракции, поэтому для получения многокомпонентной модели его следует учитывать при составлении математического описания процесса.

Зависимость коэффициента распределения уранилнитрата от концентрации азотной кислоты выражается графиком, представленным на рис. 2 [15].

Понятие равновесной концентрации некорректно применять для экстракционной колонны, но можно говорить о локальной равновесной концентрации, которую можно определить по экспериментальным полученным данным [11].

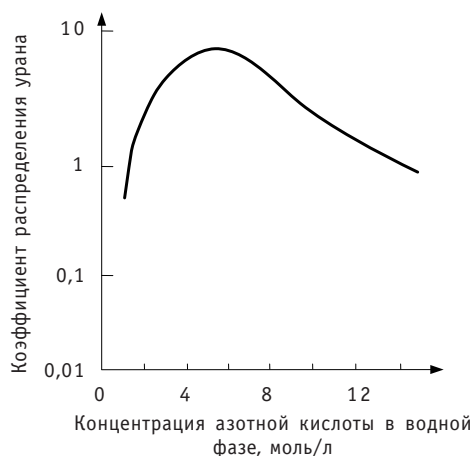


Рис. 2. График зависимости коэффициента распределения от концентрации азотной кислоты

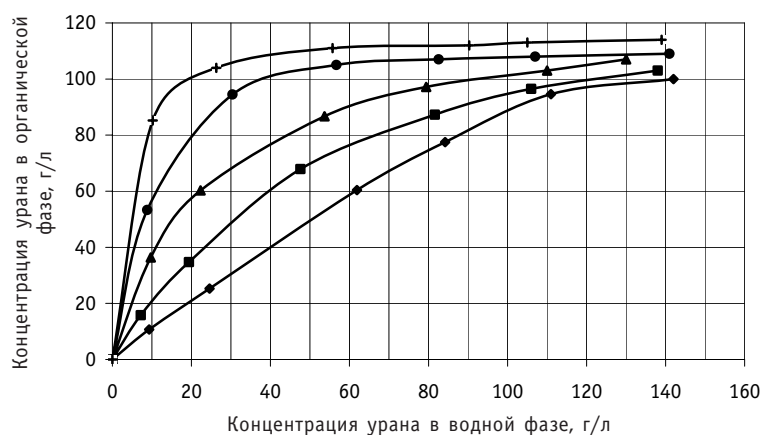


Рис. 3. Зависимости равновесных концентраций урана в водной и органической фазах при различной концентрации азотной кислоты:  $\blacklozenge$  – 0,15 моль;  $\blacksquare$  – 0,5 моль;  $\blacktriangle$  – 1 моль;  $\bullet$  – 2 моль;  $+$  – 4 моль

На рисунке 3 представлено семейство кривых, отображающих зависимость равновесной концентрации урана в водной фазе от равновесной концентрации урана в органической фазе при различной концентрации азотной кислоты.

Так как азотная кислота входит в состав органической и водной фаз, то скорость движения кислоты будет совпадать с потоками и объемами фаз, а также их скоростями.

Азотная кислота поставляет ионы нитрата для высаливания урана и плутония в органическую фазу в экстракторах. Для реэкстракции урана и плутония в водной фазе должна быть небольшая концентрация нитрат-иона. При увеличении концентрации азотной кислоты в водной фазе до 5 моль/л коэффициент распределения урана возрастает, особенно сильно для разбавленных по урану растворов. При кислотности выше 5 моль/л по азотной кислоте дальнейшее увеличение концентрации кислоты снижает коэффициент распределения урана, так как образование комплекса ТБФ с азотной кислотой резко уменьшает концентрацию свободного ТБФ.

Таким образом, для определения степени влияния азотной кислоты на равновесную концентрацию необходимо знать концентрацию азотной кислоты по высоте колонны.

Экстракция плутония происходит примерно так же, как и урана. На экстракцию других компонентов он практически не влияет [11]. Масса плутония в колонне на несколько порядков меньше, чем урана, поэтому влияние на материальный баланс невелико, и отследить его концентрацию с помощью датчиков, измеряющих вес колонны, невозможно. Головная колонна работает в режиме, при котором органическая фаза близка к насыщению. Если наступает насыщение, плутоний перестает экстрагироваться, «проваливается» вниз по колонне и может пройти дальше в рафинат, что по условиям технического регламента недопустимо, так как плутоний является целевым компонентом. Моделирование экстракции плутония важно с точки зрения выбора режима, при котором органическая фаза близка к насыщению, а плутоний гарантированно не попадает в рафинат. Также моделирование экстракции плутония позволяет определить, будет ли он накапливаться в колонне, и тем самым обеспечить безопасность ведения технологического процесса.

Для добавления других компонентов в модель следует придерживаться следующей методики:



- выявить влияние компонента на экстракцию других компонентов;
- определить влияние компонента на плотность и скорость фаз;
- указать ограничения по экстрагируемости компонента;
- задать входные концентрации, коэффициенты экстракции и получить начальное распределение компонента в колонне.

Одним из способов задания начального распределения в колонне является задание входных потоков и концентраций компонентов, а также коэффициентов распределения  $K_p$  в ячейках. При этом распределение компонента в колонне можно представить с помощью последовательно соединенных ячеек, в которых происходит статическая экстракция и выходные концентрации компонентов связаны постоянным коэффициентом.

Задавая входную концентрацию, коэффициенты распределения в ячейках и потоки, можно составить систему (15) размером  $2 \times n$ , позволяющую найти распределение компонента в обеих фазах. Количество ячеек и начальный коэффициент распределения задаются, чтобы получить необходимые выходные концентрации компонента в фазах, а также близкое к предполагаемому распределение концентраций по высоте.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{p1} X_1 = Y_1 \\ K_{p2} X_2 = Y_2 \\ \dots \\ K_{pi} X_i = Y_i \\ \dots \\ K_{pn} X_n = Y_n \\ -q_{1x}^{out} X_1 + q_y Y_2 - q_y Y_1 + q_{1x}^{in} X_0 = 0 \\ \dots \\ -q_{nx}^{out} X_n + q_y Y_0 - q_y Y_n + q_{nx}^{in} X_{n-1} = 0, \end{array} \right. \quad (15)$$

где  $X$ ,  $Y$  – концентрации компонента в сплошной и дисперсной фазах.

### ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОМУ ОБЪЕКТУ

В работе для проверки модели на соответствие реальным объектам моделировались экстракционная (головная) и реэкстракционная колонны установки по переработке облученного ядерного топлива «Утес».

Для наиболее адекватной проверки работоспособности многокомпонентности в модели и оценки возможности ее будущего использования на установках по переработке отработанного топлива было проведено моделирование головной колонны установки «Утес», в которой азотная кислота и плутоний играют очень важную роль. В модели производилось моделирование экстракции урана, плутония и азотной кислоты.

Модель В03 рассматриваемой ЭК заключается в зависимости концентрации урана в экстракте или реэкстракте и его плотности от концентрации урана в сплошной фазе на выходе крайней ячейки. Сплошная фаза, двигаясь со скоростью  $U_y$ , проходит расстояние  $L_6$  до измерителя плотности – буйка (рис. 4), в результате чего показания измерителя плотности отстают от плотности сплошной фазы в точке ввода дисперсной фазы на время  $\tau_3^6$ . Таким образом, получаем выражение для вычисления плотности реэкстракта (с использованием модели идеального вытеснения для вычисления скорости всплытия сплошной фазы в отстойных зонах [13, 14])



$$\begin{cases} \tau_3^6 = \frac{L_6}{U_y} = \frac{L_6 \cdot S_{03}}{Q_y}, \\ \rho_{pp} = \rho_{вф}^{пр}(t - \tau_3^6) \end{cases} \quad (16)$$

где  $\rho_{pp}$  – плотность экстракта(реэкстракта), кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{вф}^{пр}$  – плотность водной фазы на выходе реакционной зоны, кг/м<sup>3</sup>;  $Q_y$  – расход водной фазы, м<sup>3</sup>/с;  $L_6$  – высота установки буйка плотности экстракта, м;  $S_{03}$  – сечение отстойной зоны по жидкости, м<sup>2</sup>.

В колонне ЭК4 имеется возможность установки дополнительного индикатора концентрации металла – показателя концентрации металла (ПКМ-1Д), устанавливаемого в свободной сухой трубе, проходящей через реакционную зону. Датчик ПКМ-1Д состоит из источника  $\gamma$ -излучения «Ирис» и приемника этого излучения –  $\gamma$ -камеры (КГ-11, СКМ-10). Излучение от  $\gamma$ -источника проходит через раствор металла, где частично поглощается, в результате, чем больше концентрация урана в области установки датчика, тем сильнее поглощается  $\gamma$ -излучение и меньше ток  $\gamma$ -камеры. Такой датчик является бесконтактным и позволяет заменить контактный способ измерения концентрации урана с помощью буйкового измерителя плотности. Установка ПКМ в нижней части ЭК4 позволяет контролировать в режиме реального времени концентрацию урана в нижней части колонны (фактически концентрацию урана в реэкстракте).

Показатели концентрации металла моделируются как

$$Cm_1 = Cu(h_{пкм1}), \quad (17)$$

$$Cm_2 = Cu(h_{пкм2}), \quad (18)$$

где  $Cm_1$ ,  $Cm_2$  – показания датчиков ПКМ1 и ПКМ2 соответственно, %;  $Cu(h_{пкм1})$ ,  $Cu(h_{пкм2})$  – концентрация урана в точке подвеса датчиков ПКМ1 и ПКМ2 соответственно.

Для проверки модели на соответствие реальному объекту и для дальнейшей разработки системы автоматизированного управления были смоделированы буйковый измеритель плотности и два показателя концентрации металла, которые могут быть установлены в колонне.

На полученной модели колонны ЭК4 были произведены ряд экспериментов в штатном режиме работы. Для настройки модели использовалось сравнение реакции модели и реального объекта на скачкообразное изменение расхода сплошной фазы (рис. 5а), а затем на вход модели подавались данные трендов с объекта и сравнивались полученные на модели и на объекте результаты (рис. 5б,в,г).

Средняя погрешность моделирования составила 0,5%.

Полученная погрешность моделирования сопоставима с погрешностью измерительных приборов, поэтому модель может считаться адекватной [16].

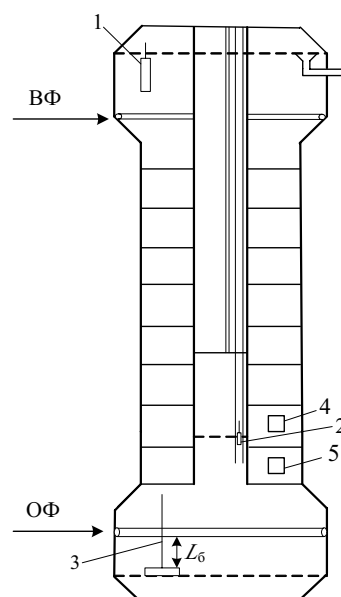


Рис. 4. Основные приборы контроля реэкстракционной колонны ЭК4: 1 – буйковый уровнемер (ГРФ); УБ-Э; 2 – нейтронный индикатор отклонения уровня НИОУ-1М (уровень в пульскамере); 3 – буйковый измеритель плотности; 4, 5 – показатели концентрации металла (ПКМ-1Д)

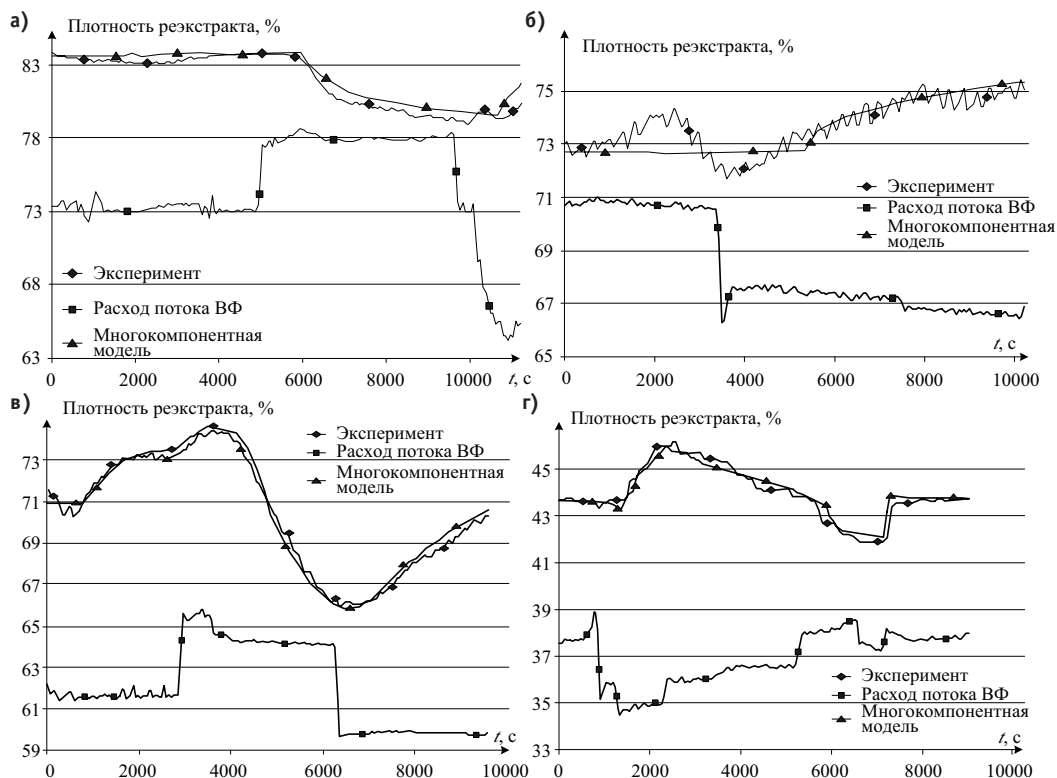


Рис. 5. Проверка модели на соответствие реальному объекту

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имитационная модель построена на основе разбиения экстракционной зоны на последовательно соединенные зоны – ячейки. Для описания процесса в каждой зоне используют дифференциальное уравнение материального баланса растворенного вещества, учитывающее его содержание в обеих фазах для каждой ячейки, и уравнение равновесия по концентрации компонента в дисперсной и сплошной фазах. Математическое описание ячейки позволяет проводить расчеты для любого количества участвующих в процессе экстракции компонентов. Достаточно высокая точность модели реэкстракционной колонны позволила с помощью вычислительных экспериментов установить статические зависимости между основными технологическими переменными во всем диапазоне допустимых значений их изменения.

Итогом работы стало создание многокомпонентной модели процесса экстракции, которая может быть использована для последующего синтеза системы автоматического управления процессом экстракции.

## Литература

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. Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н. Цифровой регулятор для системы управления с исполнительным механизмом постоянной скорости // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 131-134.
3. Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем. – М.: Мысль, 1978. – 523 с.
4. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 438 с.

5. *Казиев В.М.* Введение в системный анализ и моделирование: Кабардино-Балкарский государственный университет, 1998. – 547 с.
6. *Meerschaert, Mark M.* Mathematical Modeling/*М.М. Meerschaert.* – Second edition. – San Diego: Academic Press, 1999. – 351 p.
7. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 742 с.
8. *Столер А., Ридчарс Р.* Переработка ядерного горючего; *пер. с англ. А.П. Зефирова.* – М.: Атомиздат, 1964. – 645 с.
9. *Карпачева С.М., Захаров Е.И.* Основы теории и расчета пульсационных колонных реакторов. – М.: Атомиздат, 1980. – 256 с.
10. *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.
11. Справочник по экстракции. В 3-х т./*Под общ. ред. А.М. Розена.* Т. 1. *Николотова З.И., Карташова Н.А.* Экстракция нейтральными органическими соединениями. – М.: Атомиздат, 1976. – 600 с.
12. *Фрэнкс Р.* Математическое моделирование в химической технологии. – М.: Химия, 1971.
13. *Закгейм А.Ю.* Введение в моделирование химико-технологических процессов. Математическое описание процессов. – М.: Химия, 1971. – 272 с.
14. *Шински Ф.* Системы автоматического регулирования химико-технологических процессов. – М.: Химия, 1974.
15. *Бенедикт М.* Химическая технология ядерных материалов/*М. Бенедикт, Т. Пигфорд;* пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1960. – 528 с.
16. *Ясельский В.К., Кузнецов А.И., Дядик В.Ф.* Обработка результатов измерений. – Томск: Томский политехнический институт, 1977.

Поступила в редакцию 24.12.2009

**УДК 621.039.56**

*Model of a Unit Power Supply under the Scheme of the Transistor Voltage-Source Inverter \ V.V. Rojkov, V.E. Aidaraliev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 8 illustrations. – References, 3 titles.*

This paper contains a complex of models of the basic converting blocks of modern systems of unit power supply of electric equipments which are delivered on the Nuclear Power Plant under plans of prolongation of service life of generating sets. Similar deliveries are often accompanied by very limited technical information on products. Represented paper urged to meet this lack in any measure. The developed complex of models allowing by computer modeling to investigate the basic modes of functioning of blocks in UPS is for this purpose intended. Results of modeling are resulted, recommendations for choice parameters of elements of the power circuit, on diagnostics and adjustment of regulators of control systems by converters – the operated rectifier and the transistor independent inverter are given.

**УДК 681.58**

*Synthesis of Automated Control System of the Complex of Fluoridation and Capture Devices of Uranium Hexafluoride Production \ S.A. Baydali, V.F. Dyadik, A.S. Jurkov, N.S. Krinitsyn; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 12 pages, 1 tables, 8 illustrations. – References, 10 titles.*

The work presents stages of synthesis of cascade two-planimetric automated control system of the complex of fluoridation and capture devices of uranium hexafluoride production. Calculation method of internal and external regulators parameter settings is developed and realized.

Computer research of regulation quality are made with different regulator combinations.

**УДК 621.039.54: 621.039.7**

*Multi-attribute Evaluation and Choice of Alternatives for the Surplus Weapons-Grade Plutonium Disposition Using Utility Function at Functional Dependences of Weight Factors \ V.V. Kosterev, Yu.V. Semenova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 12 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 10 titles.*

Multi-attribute Evaluation and Choice of Alternatives for the Surplus Weapons-Grade Plutonium Disposition Using Utility Function at Functional Dependences of Weight Factors has been made. Investigations of several versions of weighting functions were carried out. Sensitivity analysis was used to explore the robustness of the rankings relative to changes in the weights in more detail. It has been shown that using of weighting functions for the ranking of alternatives enlarges the possibilities of the method of the multi-attribute evaluation, making it possible to consider, for example, decision maker preferences for different alternatives.

**УДК 621.039.54**

*Model of Multicomponent Extraction Process in the Column \ A.D. Hrenkov, Y.A. Chursin, A.A. Denisevich; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 5 illustrations. – References, 16 titles.*

The model of multicomponent process of extraction in pulsating column is presented. Model analysis on adequacy to real apparatus was made. The received results have shown, that the presented model adequacy to the real nuclear fuel-reprocessing apparatus.

**УДК 621.039.566**

*Hydrodynamics of the Heat-Carrier and Behaviour of Impurity in Contour of Repeated Compulsory Circulation RBMK during a Stop of the Block \ V.I. Gorbakov, S.V. Ivanov, O.S. Kuganiyazov, A.I. Zababurin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 6 illustrations. – References, 4 titles.*