

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК: 004.021: 004.92

**КАРРАСКЕЛЬ МАТОС**

**Ильдемаро Рамон**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ  
ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ КАРБАМИДА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЯДОВ ВОЛЬТЕРРА-ЛАГЕРРА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

Минск 2014

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель

**Кузьмицкий И.Ф.**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

**Кулаков Геннадий Тихонович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры тепловых электрических станций «Белорусского национального технического университета»

**Стрижнев Александр Гаврилович**, кандидат технических наук, доцент, начальник сектора 220056 НП ООО «ОКБ ТСП», СКБ-4

Оппонирующая организация

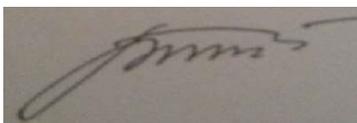
Учреждения образования «Полоцкий государственный университет»

Защита состоится «04» декабря 2014 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Автореферат разослан «03» ноября 2014 г.

Учёный секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент



Ревотюк М.П.

## **КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ**

Мочевина, называемая также карбамидом, представляет собой химическое вещество, наиболее часто используемое в качестве удобрений, а также в качестве полупродукта. Во всём мире карбамид пользуется очень высоким спросом, особенно в области сельского хозяйства.

Карбамид получается несколькими способами, но в настоящее время в промышленном масштабе карбамид обычно производится путем синтеза из аммиака и двуокиси углерода.

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

#### **Связь работы с крупными научными программами (проектами)**

Диссертационная работа связана с научно-техническими задачами и планом работы кафедры «Системы управления» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», а также с Национальным проектом Симона Боливара «Первый социалистический план: экономическое и социалистическое развитие нации (2007 – 2013)» и планом «Второй социалистический план: экономическое и социалистическое развитие нации (2013 – 2019)» Боливарианской Республики Венесуэлы.

Для выполнения первого социалистического плана правительство Венесуэлы во главе с президентом Уго Рафаэлем Чавесом Фриасом 23 сентября 2007 г. совершает нефтехимическую революцию. Нефтехимическая корпорация Венесуэлы PEQUIVEN для выполнения задач нефтехимической революции предложила выполнить 87 проектов в два этапа – (2007 – 2013) и (2014 – 2021). На упомянутых этапах необходима модернизация, построение нефтехимических комплексов и техническая подготовка персонала.

Для технической подготовки персонала правительство Венесуэлы создало в 2005 г. специальную программу, названную «Научная миссия», которая обеспечивает техническую университетскую подготовку на территории страны и за ее пределами. Венесуэла и Беларусь подписали различные соглашения в сфере образования, науки и технологии.

Для того чтобы процесс производства карбамида был эффективным и надёжным, необходимо модернизировать нефтехимические комплексы. Одной из задач такой модернизации, рассматриваемой на примере комплекса по производству карбамида Морон, является использование научного подхода, который позволит посредством создания новой математической модели объекта управления усовершенствовать систему автоматизации.

#### **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является моделирование процесса синтеза карбамида на основе идентификации его динамической модели и формирования алгоритма управления при изменяющихся условиях эксплуатации.

Для достижения сформированной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать технологический процесс производства карбамида в условиях Венесуэлы для определения существенных переменных с учётом имеющегося оборудования;

- исследовать проблемы аналитического моделирования процесса синтеза карбамида;

- разработать методику решения задач идентификации синтеза карбамида на основе структуры Вольтерра–Лагерра;

- разработать алгоритм определения динамических характеристик объекта управления путём аппроксимации ядер функциональных рядов Вольтерра;

- разработать программное обеспечение моделирования процесса синтеза карбамида для различных условий работы оборудования в условиях работы Венесуэлы.

Объектом исследования является процесс синтеза карбамида. Предмет исследования – способы моделирования и идентификации процесса синтеза карбамида в реальном времени в условиях Венесуэлы.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Процесс производства карбамида в комплексе Морон, учитывающий взаимосвязи переменных объекта управления, отличается от других процессов производства карбамида в архитектуре узла синтеза карбамида. Особенности узла синтеза карбамида являются употребления сырья и энергии, а также регулирование качества карбамида на выходе реактора синтеза.

2. Математическая модель динамики процесса производства карбамида включает как кинетику процесса, так и идентификацию динамических характеристик рядами Вольтерра второго порядка. За счёт данной модели достигается высокая точность идентификации выходных параметров процесса производства карбамида, что позволяет впервые исследовать процесс производства карбамида с учётом его нелинейных свойств.

3. Методика решения задач идентификации на основе структуры Вольтерра–Лагерра позволяет уменьшить количество коэффициентов уравнений. Методика идентификации отличается от уже известных тем, что не требует большого объёма вычислений, при этом точность полученного математического описания объекта управления повышается за счёт сохранения структуры модели, полученной идентификацией параметров модели.

4. Методика моделирования процесса производства карбамида на основе структуры Вольтерра–Лагерра для разных режимов эксплуатации в реальном времени позволяет оператору выбирать наилучший режим протекания процесса, а также автоматически управлять синтезом карбамида со ссылочной траекторией.

## **Личный вклад соискателя**

Заключается в поиске, систематизации и анализе научной литературы последних лет, вошедшей в литературный обзор, участии в постановке задач исследования, планировании и проведении экспериментов по снятию динамических характеристик процесса производства карбамида, обработке и обсуждении полученных экспериментальных данных, проведении необходимых расчётов. В публикациях с соавтором вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

## **Апробация результатов**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Международная научная конференция «Информационные технологии и системы» (Минск, 2011); 76-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2012); 48-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2012); II Международная научная конференция «Информационные технологии и системы» (Минск, 2012); 77-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов по итогам НИР БГТУ (Минск, 2013); 49-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2013); III Международная научная конференция «Информационные технологии и системы» (Минск, 2013); 50-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2014).

## **Опубликованность результатов диссертации**

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 9 научных работах. Из них 3 статьи в научных журналах в соответствии с пунктом 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь (общим объёмом 3,86 авторских листа), 2 статьи в сборниках материалов научно-технических конференций и 4 тезиса докладов.

## **Структура и объём диссертации**

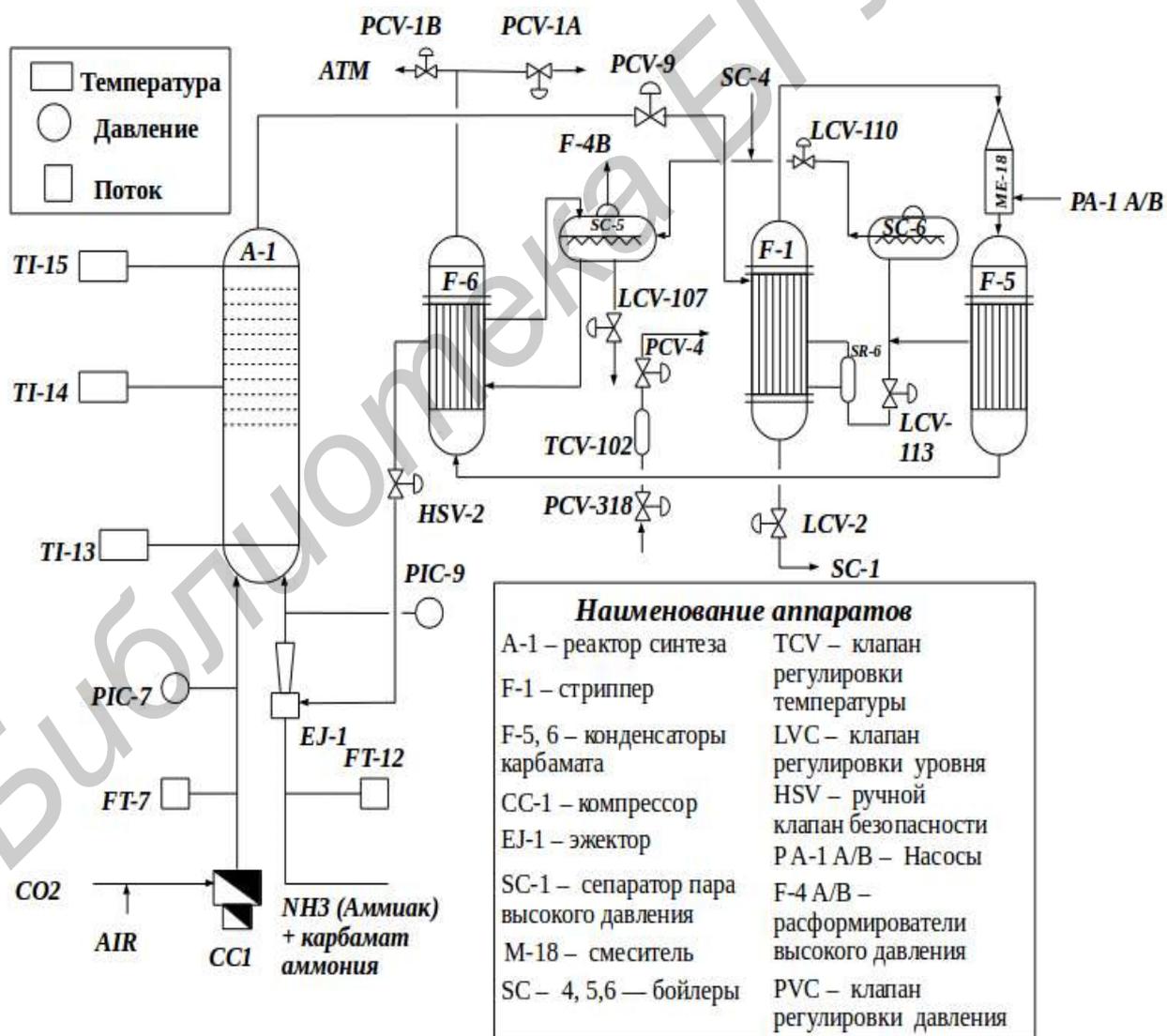
Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объём диссертационной работы составляет 120 страниц, из них 90 страниц текста, 64 рисунка на 25 страницах, 15 таблиц на 9 страницах, 11 приложений на 22 страницах, библиография из 110 источников на 6 страницах, включая 9 публикаций автора.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **первой главе** описан процесс производства карбамида (ПК), который производится синтетическим путём – из аммиака и двуокиси углерода. Синтез карбамида (СК) протекает в две стадии. На первой стадии в результате взаимодействия аммиака и двуокиси углерода образуется карбамат аммония. На второй стадии от карбамата аммония отщепляют воду.

Производства карбамида (ПК) находится в нефтехимическом комплексе Морон, на территории Карабобо, на магистрали Фалькон – Карабобо. ПК в комплексе Морон было разработано предприятием Снампрогетти в 1972 г. с производственным потенциалом в 750 метрических тонн в день приллированного карбамида с содержанием 46 % азота.

Областью исследования в диссертационной работе является узел синтеза при высоком давлении или процесс синтеза карбамида (ПСК) (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Узел синтеза при высоком давлении ПК**

В общем виде в ППК используется следующее сырьё: аммиак при температуре  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ , давлении  $20\text{ кг/см}^2$  (при состоянии насыщенной жидкости и чистоте  $99,9\%$  с  $0,1\%$  воды), двуокись углерода при температуре  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , давлении  $30\text{ кг/см}^2$  (при состоянии насыщенного газа и чистоте  $97 - 98\%$  V/V с инертными газами  $2 - 3\%$ ).

Конечный продукт приллированного карбамида включает в свой состав:  $\text{N}_2 - 46,3\%$ , биурета не более  $1,5\%$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  не более  $0,6\%$ , свободного  $\text{NH}_3$  не более  $150$  миллиардная доля.

Реактор синтеза карбамида (РСК) состоит из цилиндрического корпуса, внутри которого помещены  $10$  перфорированных тарелок. В реактор входят реактивы по следующим фазам: жидкая фаза, состоящая из аммиака и карбамата аммония в растворе; газообразная фаза, состоящая из двуокиси углерода.

Требования к качеству управления позволили классифицировать переменные процесса на основе технологического процесса. Сигналами на входе, влияющими на процесс синтеза карбамида являются (рисунок 1) [9]: FT-7 – поток двуокиси углерода; FT-12 – поток аммиака; PIS-7 – давление двуокиси углерода; PIS-9 – давление аммиака; TI-13 – температура.

На основе факторов, влияющих на ППК определяется роль, которую играют входные сигналы в ОУ. Сигналы потока FT-7 и FT-12 влияют на количество выхода карбамида в РСК, сигналы PIS-7 и PIS-9 определяют концентрацию карбамида на выходе реактора и сигнал TI-13 управляет скоростью образования карбамида.

Выходными сигналами (рисунок 1) являются следующие: REND – процент эффективности работы реактора; UREA – процент концентрации карбамида на выходе реактора ( $30 - 34\%$ ).

Затраты энергии и сырья определяются выходными сигналами процента эффективности реактора, процента концентрации карбамида на выходе реактора и другими факторами, влияющими на ППК.

На основе выполненного исследования технологического объекта управления (ТОУ) можно реализовать моделирование процесса синтеза карбамида (МПСК) с целью наблюдения изменения выходов в зависимости от различных условий работы ОУ.

Для МПСК можно построить аналитические математические модели для качественного анализа химических процессов или разработать методы идентификации для построения динамической математической модели ОУ.

Идеализированная математическая модель общего реактора, описывает изменения концентрации реагента по длине аппарата, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial x}{\partial V} = k_A(x, T), \quad (1)$$

где  $V$  – объем реактора;  $k_A(x, T)$  – аналитическое уравнение скорости расходования компонента А через степень превращения  $x$  и температуру  $T$ .

В реакторе протекает значительное количество реакций и число

дифференциальных уравнений соответствует числу компонентов реакций.

Ввиду недостаточной изученности ПСК, необходимо провести дополнительные исследования динамических характеристик экспериментальным путём (идентификация), являющимся единственной возможностью пополнить информацию об объекте.

Система входа-выхода может быть представлена в рядах следующей формой как нелинейный объект:

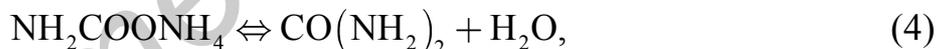
$$y(t) = N_0[u_0] + N_1[u(t)] + \dots + N_p[u^p(t)], \quad (2)$$

где  $y(t)$  – выход системы;  $u(t)$  – сигнал входа промышленного процесса;  $N(t)$  – оператор нелинейной системы;  $p$  – порядок модели рядов.

В ходе анализа исследуемого ПСК установлено, что наибольший интерес для исследования в данной работе представляет собой узел СК. В этом узле рассматриваются самые важные стадии химических реакций СК.

На эффективность работы РСК вместе с концентрацией карбамида в выходе реактора влияют технологический процесс и такие факторы, как температура в реакторе, давление в реакторе.

Во **второй главе** составлена аналитическая модель для качественной оценки свойств ОУ. Протекающие реакции в РСК выражены как



Баланс массы для двуокиси углерода, карбамата и карбамида вычисляется исходя из уравнений (3) – (5) и равняется:

$$\frac{dB}{dz} = A_r r_B = A_r k_{1F} \left( C_A^2 C_B - \frac{C_C}{K_1} \right), \quad (6)$$

$$\frac{dC}{dz} = A_r r_C = A_r \left[ k_{1F} \left( C_A^2 C_B - \frac{C_C}{K_1} \right) - k_{2F} \left( C_C - \frac{C_D C_E}{K_2} \right) \right], \quad (7)$$

$$\frac{dD}{dz} = A_r r_D = A_r k_{2F} \left( C_C - \frac{C_D C_E}{K_2} \right). \quad (8)$$

где потоки компонентов обозначены как А –  $\text{NH}_3$  (аммиак), В –  $\text{CO}_2$  (двуокись углерода), С –  $\text{NH}_2\text{COONH}_4$  (карбамат аммония), D –  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  (карбамид) и E –  $\text{H}_2\text{O}$ . Другие параметры уравнений (6) – (8):  $A_r$  – площадь реактора,  $r_i$  – скорость реакции компонентов,  $k_{iF}$  – коэффициенты скорости прямой реакции,

$K_i$  - коэффициент равновесия реакции и  $C_i$  – концентрации компонентов веществ.

Согласно данным конструкции реактора (таблица 1), начальному потоку (таблица 2) и начальным кинетическим характеристикам реакции (таблица 3) можно определить кинетическое поведение образования карбамида в жидком состоянии РСК (рисунок 2). Дифференциальные уравнения баланса массы (6) – (8) решались методом Эйлера.

Таблица 1 – Данные конструкции реактора

| Длина, z | Диаметр, d | Объём, V          | Темп., T | Давление, P              |
|----------|------------|-------------------|----------|--------------------------|
| 35 м     | 1,6 м      | 75 м <sup>3</sup> | 175 °C   | 150 кг / см <sup>2</sup> |

Таблица 2 – Потоки начального питания

| F0A (кг / ч) | F0B (кг / ч) | F0D (кг / ч) | F0E (кг / ч) |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 51979        | 20000        | 0            | 1469         |

Таблица 3 – Кинетические данные

| K1  | K2   | k01 (с <sup>-1</sup> ) | k02 (с <sup>-1</sup> ) | E1 (дж / моль) | E2 (дж / моль) |
|-----|------|------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| 2,5 | 65,6 | 2,07x10 <sup>10</sup>  | 9x10 <sup>11</sup>     | 139500         | 98500          |

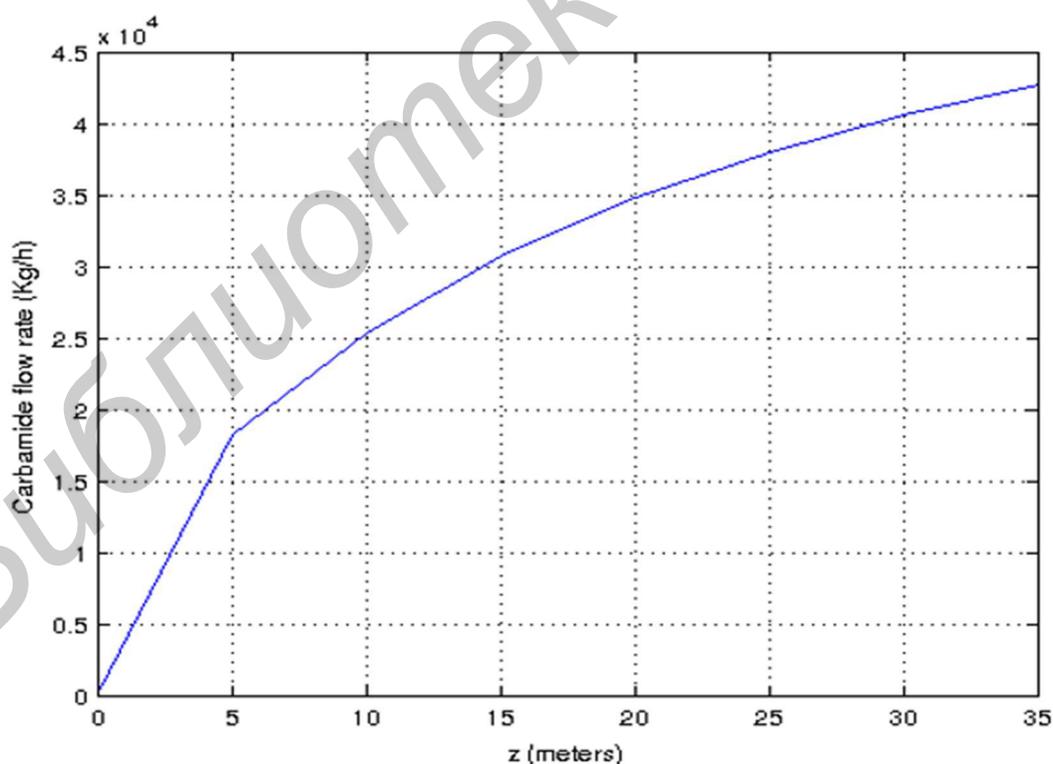


Рисунок 2 – Образование карбамида в реакторе

Даже на основе идеализированной модели существенно усложняется качественный анализ нестационарного режима процесса, не говоря о

детализации явлений на уровне отдельных тарелок реактора.

Анализ кинетических уравнений показал, что математические модели на их основе не отражают в полном объёме динамику происходящих процессов, что требует проводить идентификацию динамических характеристик процесса синтеза карбамида [8].

Исследовано качественное поведение важных переменных процесса в химическом равновесии. В ходе исследования процесса было установлено, что одним из основных показателей качества являются уравнения степени превращения реакции карбамида (5), поэтому на основе разработанной модели кинетики ППК определена зависимость степени конверсии от концентрации образующихся продуктов реакций, протекающих в РСК как в расплаве, так и в паровой фазе. [7].

В **третьей главе** использована структура Вольтерра–Лагерра для идентификации параметров модели ПСК при помощи экспериментальных данных, которые соответствуют динамическим характеристикам объекта управления во время его эксплуатации.

Выбран метод идентификации, учитывающий особенности ОУ, с использованием функциональных рядов Вольтерра второго порядка для учёта нелинейного поведения ОУ в дискретной форме:

$$y_s(k) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^m h_1^{s,j}(k-i) u_1(i) + \sum_{j=1}^q \sum_{i_1=1}^m \sum_{i_2=1}^m h_2^{s,j}(k-i_1, k-i_2) u_j(i_1) u_j(i_2). \quad (9)$$

где  $q$  – количество входов,  $s$  – выход системы,  $p$  – порядок модели рядов Вольтерра,  $m$  – затухающая память модели. Ядра модели рядов Вольтерра второго порядка выражены как  $h_1(k-i_1)$  и  $h_2(k-i_1, k-i_2)$ , а  $u(i_1)$  – вход системы.

Для уменьшения количества требуемых коэффициентов рядов Вольтерра в уравнении (9) используются многочлены Лагерра. Для определения ядра Вольтерра, принимая во внимание, что они суммируются в интервале памяти  $[0, m-1]$ , используем полную основу  $\varphi_{nf}(j_i)$  обобщённых многочленов Лагерра и размерность  $NL$ . В результате получаем ядра Вольтерра в виде линейно независимых переменных от многочленов Лагерра.

Система рядов Вольтерра в усечённой форме  $NL$  на основе ортогональных многочленов Лагерра и количество выборок  $NS$ , полученных на основе структуры модели Вольтерра–Лагерра второго порядка исследуемого динамического многомерного объекта, представлена следующим уравнением:

$$y_s(k) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^{NL} C_1^{s,j}(i) l_i(k) + \sum_{j=1}^q \sum_{i_1=1}^{NL} \sum_{i_2=1}^{NL} C_2^{s,j}(i_1, i_2) l_{i_1}(k) l_{i_2}(k), \quad (10)$$

где

$$l_i = \sum_{j_i=1}^{NS} \varphi_i(k) u(k-j_i) \quad (11)$$

Необходимыми данными для идентификации коэффициентов диагональной модели Вольтерра–Лагерра второго порядка являются: количество фильтров Лагерра (NL) равно 5 и количество выборок (NS) равно 180. Они значительно уменьшают количество коэффициентов модели ОУ (уменьшение коэффициентов на 50 %). Модель для эффективности работы реактора выражена следующим видом:

$$\begin{aligned}
 \text{REND} = & \begin{bmatrix} -0,06 \\ -0,07 \\ -0,06 \\ -0,50 \\ -0,20 \end{bmatrix}^T [L_1(k)]^1 + \begin{bmatrix} 49,17 \\ 99,82 \\ 51,17 \\ 8,48 \\ 0,59 \end{bmatrix}^T [L_1(k)]^2 + \begin{bmatrix} -160,12 \\ -66,62 \\ 5,43 \\ 27,78 \\ 9,73 \end{bmatrix}^T [L_1(k)]^3 + \dots \\
 & \dots + \begin{bmatrix} 105,17 \\ 91,25 \\ 40,33 \\ -0,97 \\ -3,86 \end{bmatrix}^T [L_1(k)]^4 + \begin{bmatrix} 42,30 \\ -29,68 \\ -42,10 \\ -20,62 \\ -3,91 \end{bmatrix}^T [L_1(k)]^5 + \begin{bmatrix} -0,39 \\ -0,80 \\ -0,41 \\ -0,07 \\ -0,01 \end{bmatrix}^T [L_2(k)]^2 + \dots \\
 & \dots + \begin{bmatrix} 0,19 \\ 0,07 \\ -0,01 \\ -0,02 \\ -0,10 \end{bmatrix}^T [L_2(k)]^3 + \begin{bmatrix} -0,12 \\ -0,10 \\ -0,04 \\ -0,003 \\ 0,002 \end{bmatrix}^T [L_2(k)]^4 + \begin{bmatrix} -0,04 \\ 0,02 \\ 0,04 \\ 0,02 \\ 0,003 \end{bmatrix}^T [L_2(k)]^5, \quad (12)
 \end{aligned}$$

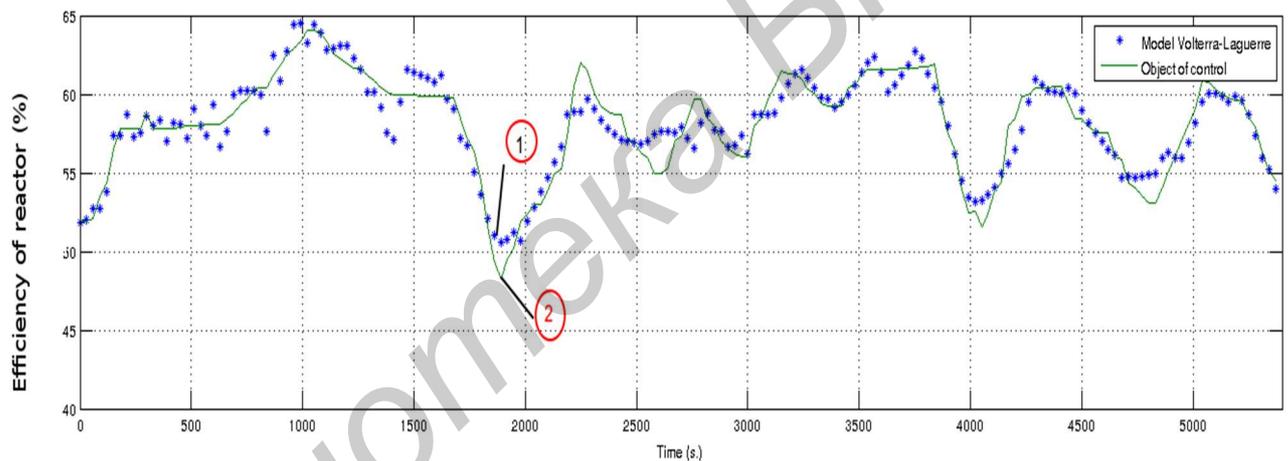
а для концентрации карбамида:

$$\begin{aligned}
 \text{UREA} = & \begin{bmatrix} -0,06 \\ -0,06 \\ -0,09 \\ -0,05 \\ -0,01 \end{bmatrix}^T [L_1(k)]^1 + \begin{bmatrix} 44,84 \\ 82,03 \\ 47,62 \\ 14,25 \\ 2,55 \end{bmatrix}^T [L_1(k)]^2 + \begin{bmatrix} -168,36 \\ -72,82 \\ -24,71 \\ -4,82 \\ -4,29 \end{bmatrix}^T [L_1(k)]^3 + \dots \\
 & \dots + \begin{bmatrix} 219,63 \\ 105,67 \\ 40,34 \\ 7,09 \\ 1,34 \end{bmatrix}^T [L_1(k)]^4 + \begin{bmatrix} -44,21 \\ -33,97 \\ -14,67 \\ -0,33 \\ 2,93 \end{bmatrix}^T [L_1(k)]^5 + \begin{bmatrix} -0,36 \\ -0,66 \\ -0,38 \\ -0,11 \\ -0,01 \end{bmatrix}^T [L_2(k)]^2 + \dots
 \end{aligned}$$

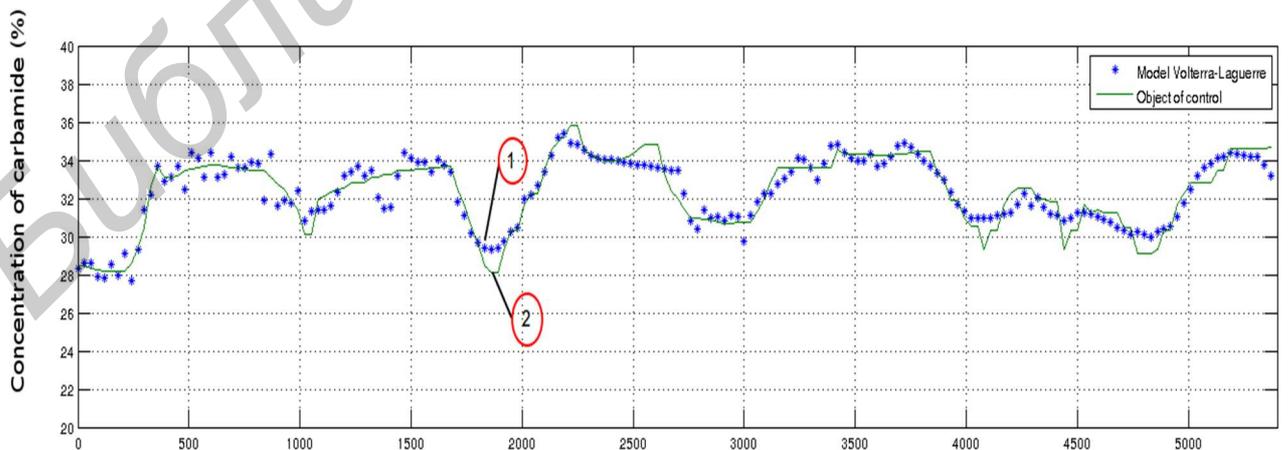
$$\dots + \begin{bmatrix} 0,20 \\ 0,08 \\ 0,02 \\ 0,01 \\ 0,01 \end{bmatrix}^T [L_2(k)]^3 + \begin{bmatrix} -0,26 \\ -0,12 \\ -0,04 \\ -0,01 \\ -0,001 \end{bmatrix}^T [L_2(k)]^4 + \begin{bmatrix} 0,04 \\ 0,03 \\ 0,01 \\ 0 \\ -0,0032 \end{bmatrix}^T [L_2(k)]^5, \quad (13)$$

где  $[L_1(k)]^r = [l_1(k) \dots l_5(k)]^T$  – фильтры Лагерра первого порядка,  $r$  – индекс сигнала входа и  $[L_2(k)]^r = [l_1^2(k) \dots l_5^2(k)]^T$  – фильтры Лагерра второго порядка. Фильтры вычисляются при помощи уравнения (11) и  $[u(k)] = [FT7(k); FT12(k); PIC7(k); PIC9(k); TП3(k)]$  – вектор входов системы.

Аппроксимация между моделью и ОУ является допустимой (рисунок 3), принимая во внимание, что модель была значительно упрощена.



а



б

а – эффективность реактора; б – концентрация карбамида; 1 – модель объекта; 2 – ОУ

**Рисунок 3 – Реакция диагональной модели и сигналы выхода ОУ**

Для повышения точности идентификации разработан алгоритм на основе структуры Вольтерра–Лагерра, упрощающей количество коэффициентов без потери качества, за счёт увеличения количества фильтров [3, 6].

Разработанный алгоритм идентификации позволил значительно повысить точность аппроксимации динамических характеристик объекта управления, снизив:

- относительную ошибку идентификации эффективности реактора с 9 до 2 % согласно диагональной структуре Вольтерра–Лагерра второго порядка [3];
- относительную ошибку идентификации концентрации на выходе реактора с 5 до 0,5 % согласно диагональной структуре Вольтерра–Лагерра второго порядка.

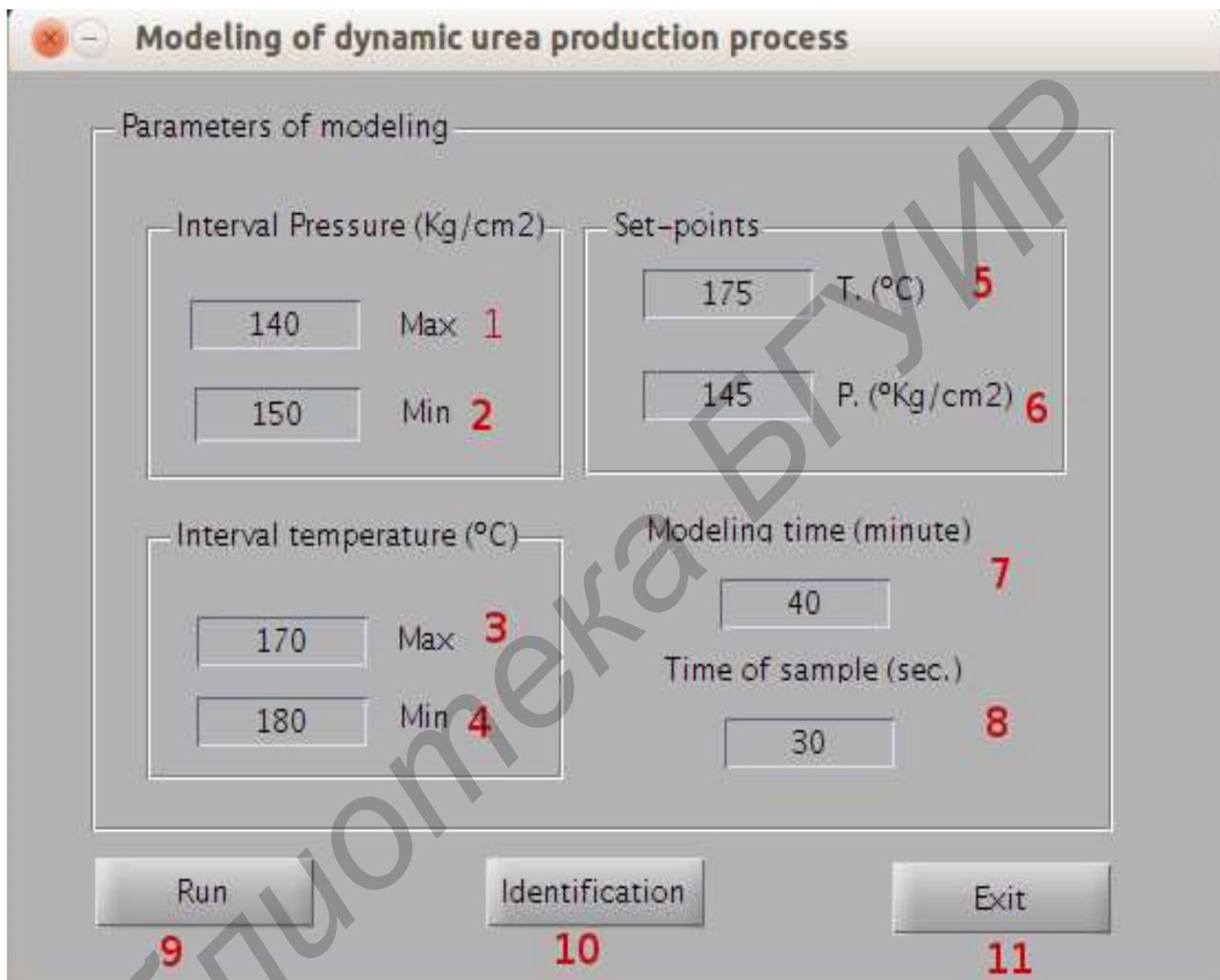
В четвёртой главе смоделированы разные условия работы реактора синтеза карбамида, поэтому необходимо предложить графический интерфейс для настройки (программу) и моделирования процесса производства карбамида (рисунок 4). Для создания интерфейса обеспечения использовалась MATLAB 8.1.0.604 (R2013a) с ЭВМ ACER-V3 на платформе UBUNTU 14.04 LTS с процессором INTEL@ core i7-3630M CPU @ 2.40 GHz x 8 и с памятью 8 GB.



1 – моделирование динамических характеристик ОУ; 2 – моделирование кинетических характеристик СК; 3 – вход в моделирование; 4 – выход программы

**Рисунок 4 – Графический интерфейс пользователя**

Для моделирования динамических характеристик ПСК необходимо выбрать опцию «Dynamic of urea production process» 1 и затем нажать кнопку «Ассерт» 3 (рисунка 4). После чего на экране, показанном на рисунке 5, появятся параметры, необходимые для моделирования динамических характеристик объекта управления.

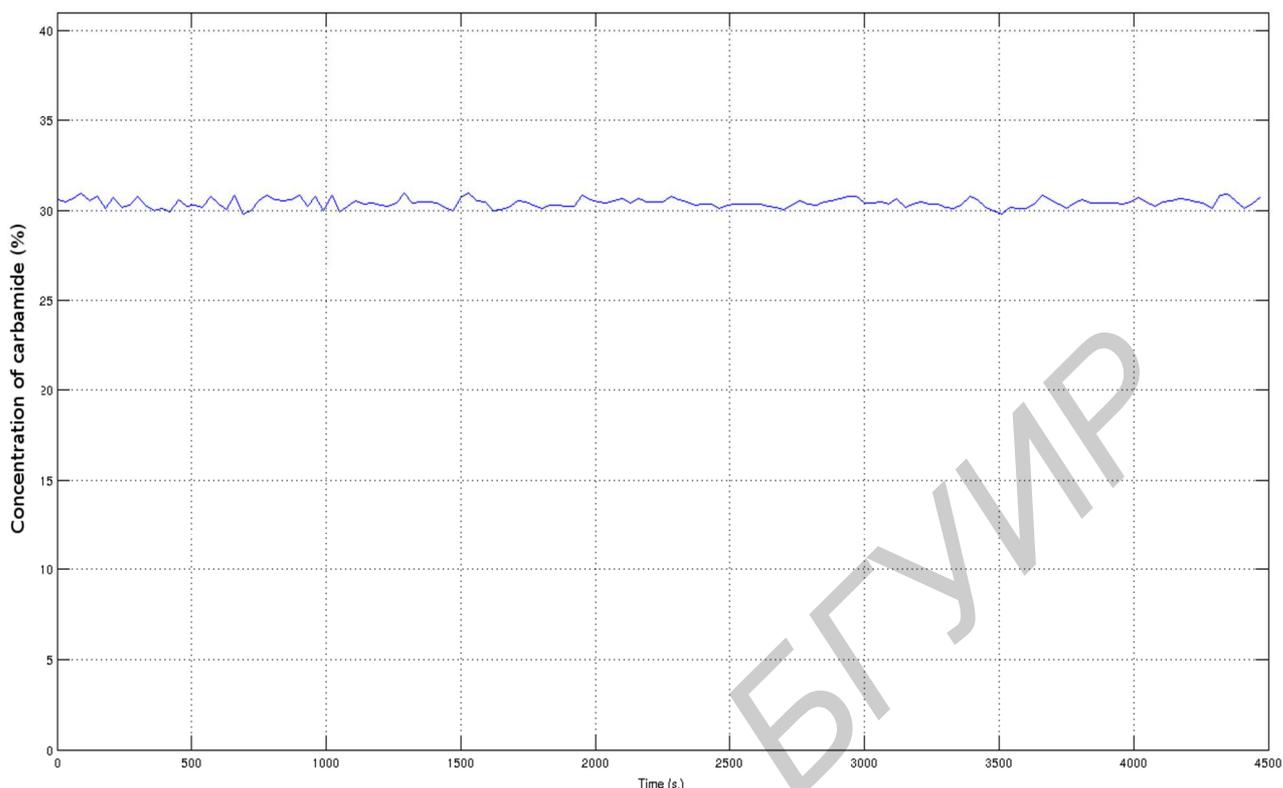


1 – максимальное давление; 2 – минимальное давление; 3 – максимальная температура; 4 – минимальная температура; 5 – температура работы; 6 – давление работы; 7 – время моделирования; 8 – время выборки; 9 – начало моделирования; 10 – идентификация модели ОУ; 11 – выход программы

**Рисунок 5 – Интерфейс настройки параметров моделирования**

При моделировании ПСК необходимо сделать анализ поведения РСК, когда имеются благоприятные условия давления и температуры и соблюдается время нахождения компонент в реакторе.

Температура в интервале 170 – 175 °С позволяет работать в благоприятных условиях из-за того, что поддерживается концентрация карбамида (рисунок 6) согласно данным функционирования и, таким образом, поддерживается эффективность работы реактора.



**Рисунок 6 – Концентрация карбамида на выходе реактора при температуре**

Более высокая температура увеличивает соотношение преобразования  $\text{CO}_2$ , что приводит к уменьшению потребления сырья. С другой стороны, высокая температура работы реактора увеличивает уровень коррозии, а также повышает давление равновесия.

Математические модели могут применяться в различных областях системы управления, таких, как предсказание, анализ и дизайн контроллера, моделирование, оптимизация и датчики «software» или статические оценки.

Узлы управления ПСК в нефтехимическом комплексе Морон в основном оснащены пропорционально-интегрально-дифференциальными регуляторами. Эти регуляторы (контроллеры) в основном работают при постоянных заданных значениях. В работе предлагается система NMPC (No-linear Model Predictive Control) управления с прогнозирующими нелинейными моделями.

NDMC, основанная на усечённых моделях Вольтерра–Лагерра второго порядка, включает в себя работу ядер первого и второго порядка, для которой ядра рядов Вольтерра должны быть спроектированы на основе ортогональных функций таким образом, чтобы ядра первого и второго порядка были заменены в согласии с используемыми параметрами в динамической матрице, как указывается далее:

$$h_i = a_i; \quad h_{ii} = b_i, \quad (14)$$

$$a_i = \sum_{r=0}^i (C_1 \varphi_1(r) + C_2 \varphi_2(r) + C_3 \varphi_3(r) + C_4 \varphi_4(r) + C_5 \varphi_5(r)), \quad (15)$$

$$b_i = \sum_{r=0}^i (C_{11} \varphi_1^2(r) + C_{22} \varphi_2^2(r) + C_{33} \varphi_3^2(r) + C_{44} \varphi_4^2(r) + C_{55} \varphi_5^2(r)). \quad (16)$$

Исходя из предыдущих уравнений, ответ нелинейной системы с прогнозируемым видом будет выражен как

$$Y(k+n) = \sum_{i=0}^{PH} (a_i u(k+i+n) + a_i u^2(k+i+n)), \quad (17)$$

где  $h_i$  – ядра первого порядка;  $h_{ii}$  – ядра второго порядка;  $\varphi_i$  – фильтры Лагерра;  $Y$  – выход системы;  $U$  – вход системы и  $PH$  – горизонт прогнозирования.

В уравнении (18)  $a_i$  и  $b_i$  выражены на основе многочленов Лагерра коэффициентами  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}$  и  $C_{55}$  из уравнений (16) и (17), которые должны быть получены на основе процесса идентификации, используя структуру Вольтерра–Лагерра. В общем виде модель выражена как

$$Y(k+n) = Y_+ + Y_-, \quad (18)$$

где  $Y_+$  – будущие члены;  $Y_-$  – прошлые члены.

Тогда

$$Y(k+n) = \sum_{i=0}^m a_i u(k+m-i) + \sum_{i=m+1}^{PH} a_i u(k+m-i) + \sum_{i=0}^m b_i u^2(k+m-i) + \dots \\ \dots + \sum_{i=m+1}^{PH} b_i u^2(k+m-i) + \sum_{i=1}^m d(k+m-i). \quad (19)$$

Дана ссылочная траектория  $R_F$  для ПСК. Предлагается целевая функция, включающая основные переменные, которые необходимо минимизировать

$$J = \sum_{k=1}^{PH} [Y_i - R_F]^2 + \sum_{i=m+1}^{PH} \lambda [u(k-i)]^2, \quad (20)$$

где  $\lambda$  – весовой параметр для управляющего воздействия  $u$ .

Уравнение (21) можно выразить как

$$J = [G[U] + C - R_F]^T [G[U] + C - R_F] + \lambda [u(k-i)]^T [u(k-i)]. \quad (21)$$

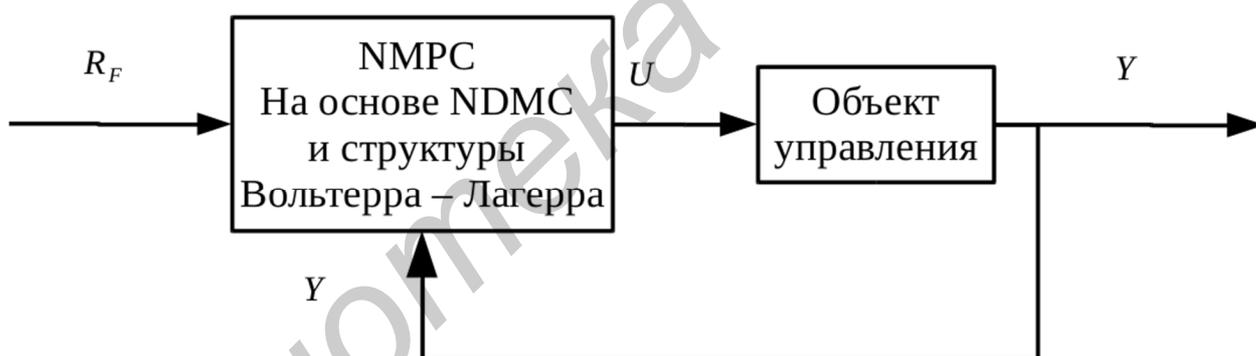
Из условия  $dJ/dU = 0$ , и учитывая, что квадратичные изменения малы, имеем оптимальный закон управления:

$$U = \text{inv}(G^T G + \lambda I) G^T (R_F - C), \quad (22)$$

где

$$U = [u(k); u(k+1); \dots u(k+m-1)]. \quad (23)$$

На основе структуры, показанной на рисунке 7, и уравнения (23), можно получить контроллер NMPC для ПСК, который соответствует одному из приложений полученной модели для ОУ.



**Рисунок 7 – Предлагаемая структура для управления на основе контроллера NMPC**

Разработанное программное обеспечение для имитационного моделирования ПСК будет использоваться в качестве тренажёра для операторов АСУТП производства карбамида в условиях работы Венесуэлы [8].

Имитационное моделирование показало высокую достоверность результатов и соответственно возможность использования полученной модели для прогнозирования результатов оперативного управления производством.

Предложен новый алгоритм управления синтезом карбамида на основе нелинейной модели с упреждающим управлением (NMPC), изменяющимся по ссылочной траектории с учётом режима эксплуатации.

Приведены экономические аспекты, при которых можно применять полученные результаты для модернизации нефтехимического комплекса Морон с целью улучшить процесс производства карбамида.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в разработке новых методик моделирования и идентификации процесса производства карбамида с помощью многоканальной структуры, определяющей динамические характеристики объекта управления. Созданные методики моделирования и идентификации позволяют использовать новые альтернативные методы управления на основе полученной модели в процессах производства карбамида в отличие от используемых в Венесуэле.

В диссертационной работе на основе технологического процесса производства карбамида в комплексе Морон в Венесуэле определены важные переменные управления: давление, поток и температура реактора синтеза.

Основное внимание уделено выбору рациональной модели, основанной на экспериментальных данных реальных процессов в реакторе, разработке алгоритма и программного обеспечения идентификации динамических характеристик процесса синтеза карбамида.

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. На основе анализа процесса производства карбамида было выявлено наличие большого числа входных и возмущающих воздействий в диапазоне изменения параметров при существовании зависимостей выходных переменных процесса производства карбамида. Для обеспечения эффективного режима процесса синтеза карбамида появилась необходимость разработки новой системы управления на основе моделирования и идентификации объекта управления с обеспечением минимума потребления ресурсов и увеличением качества конечного продукта с учётом динамических свойств объекта [1, 5].

2. Впервые предложена математическая модель процесса производства карбамида с учётом взаимосвязи входных переменных (давления, потока и температуры), позволяющая дополнительно измерять концентрацию карбамида на выходе реактора и эффективность реактора синтеза карбамида [2, 8, 9].

Математическое описание современного процесса синтеза карбамида представлено в виде модели с пятью входными и с двумя выходными переменными. В результате исследования выявлена необходимость учёта кинетики реакций и нелинейных зависимостей между выходными и входными переменными. На этом основании выбрана наиболее подходящая структура модели для описания процесса производства карбамида и составлено математическое описание динамики процесса на основе интегральных рядов Вольтерра, что позволило впервые описать динамику процесса синтеза карбамида [1, 5, 6].

3. Разработана методика идентификации, которая в отличие от известных не требует большого объёма вычислений, при этом точность полученного математического описания объекта повышается за счёт используемой структуры модели [2, 3, 4, 5].

В диссертационной работе методика идентификации на основе усечённой диагональной модели Вольтерра–Лагерра второго порядка для аппроксимации и описания нелинейных процессов синтеза карбамида отличается от известных

методик уменьшением количества параметров. Показано, что при правильном использовании в модели ортогональных свойств функции Лагерра обеспечивается высокая точность аппроксимации процессов, что подтверждается экспериментальными исследованиями. В частности установлено, что относительная ошибка идентификации выходного сигнала эффективности реактора составляет 1 %, а относительная ошибка идентификации выходного сигнала концентрации карбамида на выходе реактора составляет приблизительно 0,5 % [2, 3, 4].

4. Разработаны алгоритмы определения параметров модели Вольтерра–Лагерра и программа в среде MATLAB для экспериментальных исследований с учётом реальных условий протекания процесса синтеза [5, 6]. Показано, что предложенная модель работоспособна при изменении внешних условий. В частности, на основе полученной модели процесса производства карбамида показано влияние на выходные переменные изменения интервала температуры, интервала давления и время прохождения через реактор.

5. С целью улучшения процесса производства карбамида предлагается замена установленных ПИД-контроллеров на управление с прогнозирующими моделями на основе полученной модели. Предложенная структура системы с замкнутой обратной связью на основе NMPC (Nonlinear Model Predictive Control) позволяет управлять процессом производства карбамида со ссылочной траекторией, изменяющейся во времени режима эксплуатации РСК [1, 7].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Учитывая простоту реализации предложенной модели синтеза карбамида и методику идентификации, можно считать, что они целесообразны для практического применения в технике моделирования, идентификации и управления процессами синтеза карбамида в условиях работы Венесуэлы.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**

### **Статьи в научных журналах**

1. Карраскель, И. Особенности идентификации динамики химических реакторов на основе рядов Вольтерра / И. Карраскель, И.Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, физ.-мат. науки и информ. – 2012. – Вып. 153. – С. 113 – 114.

2. Карраскель, И. Идентификация процессов синтеза карбамида и полиэтиленфталата / И. Карраскель, И.Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, физ.-мат. науки и информ. – 2013. – Вып. 162. – С. 104 – 108.

3. Карраскель, И. Оценка качества идентификации динамических параметров процесса производства карбамида / И. Карраскель, И.Ф. Кузьмицкий // Доклады БГУИР. – 2014. – Вып. № 5(83). – С. 50 – 55.

## Статьи в материалах научно-технических конференций

4. Карраскель, И. Методика решения задач идентификации производства мочевины методом ряда Вольтерра / И. Карраскель, И.Ф. Кузьмицкий // Информационные технологии и системы 2012 (ИТС 2012): материалы II Международной научной конференции, Минск, 26 октября 2012 г. / БГУИР. – Минск, 2012. – С. 56 – 57.

5. Карраскель, И. Особенности определения эффективности реактора синтеза в процессе производства карбамида / И. Карраскель, И.Ф. Кузьмицкий // Информационные технологии и системы 2011 (ИТС 2013): материалы III Международной научной конференции, Минск, 26 октября 2013 г. / БГУИР. – Минск, 2013. – С. 26 – 27.

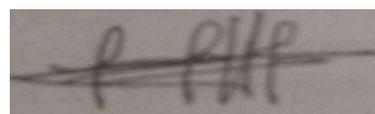
## Тезисы докладов

6. Карраскель, И. Методика решения задач идентификации объекта методом ряда Вольтерра / И. Карраскель, И.Ф. Кузьмицкий // Информационные технологии и управление: материалы 48-й научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР – 2012, Минск, 7 – 11 мая 2012 г./ БГУИР. – Минск, 2012. – С. 108.

7. Карраскель, И. Формирование критериев оптимизации производства карбамида / И. Карраскель, И.Ф. Кузьмицкий // Информационные технологии и управление: материалы 49-й научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР – 2013, Минск, 6 – 10 мая 2013 г. / БГУИР. – Минск, 2013. – С. 54.

8. Карраскель, И. Кинетическая модель процесса производства карбамида / И. Карраскель, И.Ф. Кузьмицкий // Информационные технологии и управление: материалы 50-й научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР – 2014, Минск, 5 – 9 мая 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 88.

9. Карраскель, И. Моделирование процесса производства карбамида / И. Карраскель, И.Ф. Кузьмицкий // Информационные технологии и управление: материалы 50-й научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР – 2014, Минск, 5-9 мая 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 82.



## РЭЗЮМЭ

Караскель Матас Ільдэмара Рамон

### Мадэліраванне і ідэнтыфікацыя працэсаў кіравання вытворчасцю карбаміду з выкарыстаннем радоў Вальтэра–Лагера

*Ключавыя словы:* мачавіна, карбамід, мадэліраванне, ідэнтыфікацыя дынамічных аб'ектаў, структура Вальтэра – Лагера, рады Вальтэра.

*Мэтай дысертацыйнага даследавання з'яўляецца мадэліраванне працэсу сінтэзу карбаміду на аснове ідэнтыфікацыі дынамічнай мадэлі для фарміравання алгарытму кіравання пры змяняючыхся ўмовах эксплуатацыі.*

*Аб'ектам даследавання з'яўляецца працэс сінтэзу карбаміду. Прадмет даследавання – спосабы мадэліравання і ідэнтыфікацыі працэсу сінтэзу карбаміду на аснове даных, атрыманых у рэжыме эксплуатацыі.*

*Навуковая навізна атрыманых вынікаў заключаецца ў наступным: распрацавана матэматычная мадэль для вызначэння кінетычных характарыстык на аснове балансу масы працякаючых кампанентаў у рэактары сінтэзу карбаміду з мэтай разгляду лінейнасцей і нелінейнасцей аб'екта кіравання, распрацавана матэматычная мадэль працэсу вытворчасці карбаміду, адметнай асаблівасцю якой з'яўляецца магчымасць ідэнтыфікацыі дынамічных характарыстык аб'екта даследавання з высокай ступенню дакладнасці, якая дасягаецца за кошт выкарыстання алгарытму ідэнтыфікацыі каэфіцыентаў мадэлі Вальтэра – Лагера, распрацаваны алгарытм апраксімацыі пошуку ядра Вальтэра, заснаваны на мінімізацыі нелінейнай квадратычнай памылкі якасці выкарыстоўваемай мадэлі, заснаваны графічны інтэрфейс карыстальніка для мадэліравання кінетычных і дынамічных характарыстык у розных умовах працы аб'екта кіравання.*

*Асноўныя вынікі дысертацыйнай работы будуць укаранены і выкарыстаны ў хімічных комплексах REQUIVEN, а таксама ў тэхналагічных праектах згодна планам Баліварыянскай Рэспублікі Венесуэлы.*

## РЕЗЮМЕ

Карраскель Матос Ильдемаро Рамон

### **Моделирование и идентификация процессов управления производством карбамида с использованием рядов Вольтерра-Лагерра**

*Ключевые слова:* мочевины, карбамид, моделирование, идентификация динамических объектов, структура Вольтерра – Лагерра, ряды Вольтерра.

*Целью диссертационного исследования* является моделирование процесса синтеза карбамида на основе идентификации динамической модели для формирования алгоритма управления при изменяющихся условиях эксплуатации.

*Объектом исследования* является процесс синтеза карбамида. *Предмет исследования* – способы моделирования и идентификации процесса синтеза карбамида на основе данных, полученных в режиме эксплуатации.

Научная *новизна* полученных результатов заключается в следующем: разработана математическая модель для определения кинетических характеристик на основе баланса массы протекающих компонентов в реакторе синтеза карбамида с целью рассмотрения линейностей и нелинейностей объекта управления, разработана математическая модель процесса производства карбамида, отличительной особенностью которой является возможность идентификации динамических характеристик объекта исследования с высокой степенью точности, достигающейся за счёт использования алгоритма идентификации коэффициентов модели Вольтерра–Лагерра, разработан алгоритм аппроксимации поиска ядра Вольтерра, основанный на минимизации нелинейной квадратичной ошибки качества используемой модели, создан графический интерфейс пользователя для моделирования кинетических и динамических характеристик в различных условиях работы объекта управления.

Основные результаты диссертационной работы будут внедрены и использованы в химических комплексах PEQUIVEN, а также в технологических проектах согласно планам Боливарианской Республики Венесуэлы.

## SUMMARY

Carrasquel Matos Hildemaro Ramon

### **Modeling and identification of a urea production process control using Volterra-Laguerre series**

*Keywords:* urea, carbamide, modeling, identification of dynamic objects, the structure of Volterra - Laguerre series Volterra.

The purpose of the dissertation research is the modeling of the urea synthesis on the basis of identification of a dynamic model for the formation of the control algorithm under varying operating conditions.

The object of research is the synthesis of urea. Subject of research - ways of modeling and identification of the urea synthesis process based on data obtained during operation.

Scientific novelty of the results is as follows: a mathematical model to determine the kinetic parameters on the basis of the mass balance of the components occurring in synthesis reactor to examine the linear and nonlinear object management, developed a mathematical model of the process of production of urea, the distinguishing feature of which is the ability to identify the dynamic characteristics of the object study with a high degree of accuracy is achieved by using an identification algorithm model coefficients Volterra-Laguerre approximation algorithm developed search kernel Volterra-based nonlinear quadratic error minimization quality model used, created a graphical user interface for the simulation of kinetic and dynamic characteristics in various operating conditions of the object management.

The main results of the thesis will be introduced and used in chemical complexes PEQUIVEN, as well as in technological projects according to the plans of the Bolivarian Republic of Venezuela.

*Научное издание*

**Карраскель Матос Ильдемаро Рамон**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ  
ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ КАРБАМИДА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЯДОВ ВОЛЬТЕРРА-ЛАГЕРРА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

Подписано в печать  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. .

Формат 60x84 1/16  
Отпечатано на  
ризографе.  
Тираж 60 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. .  
Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровка, 6