



Textbook for the Master Programme  
"INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR  
ENERGY SAVING AND ENVIRONMENTAL PROTECTION"

Edited by Y. Panov

## Modelling Technological and Natural Systems


### Моделирование природных и промышленных систем

Под редакцией Ю. Панова

Учебное пособие для магистерской программы  
"ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СФЕРЕ  
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ"



Project  
TEMPUS  
"LLL Training and Master in  
Innovative Technologies for  
Energy Saving and  
Environmental Control  
for Russian Universities,  
Involving Stakeholders  
GREEN MASTER"



Проект  
ТЕМПУС  
"Обучение  
в течение всей жизни и  
магистратура в области  
инновационных технологий  
в сфере энергосбережения и  
экологического контроля в  
российских университетах с  
участием работодателей  
GREEN MASTER"

**Book Series GREEN Master Project**  
*Tempus 530620-TEMPUS-1-2012-1-IT-TEMPUS-JPCR*

***Chief editors:***

Prof. Vincenzo Bianco (University of Genoa),  
Prof. Nikolay Popov (Tambov State Technical University),  
Prof. Alexander Noskov (Ural Federal University),  
Prof. Nikolay Kornilov (Stavropol State Agricultural University).

	<b>Book Title</b>	<b>Book Editor</b>
1	Green technologies for sustainable development	Prof. Natalia Tarasova
2	Energy efficiency improvement in natural and industrial systems	Prof. Nikolay Popov
3	Basis of thermodynamics and exergy analysis	Prof. Luca Tagliafico
4	Lifecycle of energy, energy management and optimum decision making	Prof. Vladimir Alekhin
5	Energy and environmental audit	Prof. Nikolay Popov
6	Engineering and economic analysis of energy saving activities	Prof. Sergey Fedosov
7	Environmental safety and energy sustainable development	Prof. Nikolay Kornilov
8	Practical application of energy saving technologies	Prof. Viktor Semenov
<b>9</b>	<b>Modelling technological and natural systems</b>	<b>Prof. Yury Panov</b>
10	Glossary for GREENMA project	Angelo Musaio Lilia Mozerova

Проект  
ТЕМПУС 530620–TEMPUS–1–2012–1–IT–TEMPUS–JPCR  
«Обучение в течение всей жизни и магистратура в области инновационных технологий в сфере энергосбережения и экологического контроля в российских университетах с участием работодателей «GREENMA»

*Редакционный совет серии учебных пособий проекта «GREENMA»:*  
*профессор В. Бьянко, Университет г. Генуи, Италия;*  
*профессор Н. Корнилов, Ставропольский государственный аграрный университет;*  
*профессор А. Носков, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина;*  
*профессор Н. Попов, Тамбовский государственный технический университет*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ**

*Учебное пособие*

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области химической технологии и биотехнологии для студентов, обучающихся по направлению 241000 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии (квалификация/степень-магистр)*

Тамбов  
Издательство Першина Р.В.  
2014

УДК 661.665

***Рецензенты:***

кандидат технических наук **А.В. Тарасов**,  
Научно-производственное предприятие «Технофильтр» (г. Владимир);  
доктор технических наук, профессор **Макаров Р.И.**,  
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет».

***Авторы:***

Е.В. Ермолаева, Г.Н. Замараева, В.Т. Земскова, В.А. Лузгачев, Ю.Т. Панов,  
Е.С. Бобкова, В.В. Рыбкин, Н.С. Попов, Чан Минь Тьинь.

***Ответственный редактор:***

д-р техн. наук, профессор **Ю.Т. Панов**.

**М74 Моделирование природных и промышленных систем:** учебное пособие [Текст] / Е.В. Ермолаева, Г.Н. Замараева, В.Т. Земскова и др.; под общ. ред. Ю.Т. Панова и Н.С. Попова. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2014. – 154 с.

Настоящее учебное пособие, написанное преподавателями Владимирского государственного университета (Ермолаева Е.В. (глава 1), Замараева Г.Н. (гlossарий), Земскова В.Т. (глава 2,4-6), Панов Ю.Т. (введение, заключение, глава 8)) совместно с коллегами из Ивановского химико-технологического университета (Рыбкин В.В., Бобкова Е.С. (глава 7)) и Тамбовского государственного технического университета (Попов Н.С., Чан Минь Тьинь (глава 3) и Лузгачев В.А., Чан Минь Тьинь (разделы 8.5, 8.6)), входит в состав серии пособий по специальным дисциплинам проекта «Обучение в течение всей жизни и магистратура в области инновационных технологий в сфере энергосбережения и экологического контроля в российских университетах с участием работодателей GREENMA».

В учебном пособии рассматриваются теоретические основы моделирования технологических и природных систем, теория искусственного интеллекта. Особое внимание уделено созданию статистических и детерминированных математических описаний. Отмечается роль моделирования при оптимизации энерго- и ресурсосберегающих процессов.

Пособие предназначено для магистров, обучающихся по направлению 241000 «Энерго-и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и может быть использовано для подготовки бакалавров и магистров направления 280700 «Техносферная безопасность», 240100 «Химическая технология», а также для аспирантов, преподавателей и научно-технических работников, специализирующихся в области моделирования химико-технологических процессов.

© Коллектив авторов, 2014

© Кобзева С.В., дизайн обложки, 2014

© Изд-во Першина Р.В., оформление, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>Foreword</b> .....	7
<b>Вступительное слово</b> .....	9
<b>Введение</b> .....	12
<b>1. Теоретические основы моделирования технологических и природных систем</b> .....	13
1.1. Цели и задачи моделирования .....	13
1.2. Гидродинамические модели структуры потоков в аппаратах и их роль в составлении математических моделей .....	19
<b>2. Теория искусственного интеллекта</b> .....	26
<b>3. Теория химических реакторов – основа научного подхода к моделированию химико-технологических и экологических объектов</b> .....	32
3.1. Понятие «экологического реактора». Модульный принцип построения моделей природо-промышленных систем (ППС) .....	33
3.2. Классификация моделей распространения примесей в воде, воздухе и почве .....	37
3.3. Постановка задачи автоматизированного моделирования ППС .....	47
<b>4. Математическое моделирование реакторных процессов</b> .....	53
4.1. Кинетические модели и методы определения констант скоростей химических реакций .....	53
4.2. Примеры решения обратных задач химической технологии .....	57
<b>5. Основы создания статистических математических описаний</b> .....	61
5.1. Оценка воспроизводимости результатов эксперимента. Корреляционный и регрессионный анализы .....	61
5.2. Планирование эксперимента и обработка экспериментальных данных в системе Matlab .....	69
<b>6. Создание детерминированных математических описаний</b> .....	74
6.1. Теоретические основы .....	74
6.2. Детерминированные модели энерго- и ресурсосберегающих процессов .....	75
6.2.1. Расчет процесса разогрева прессуемых изделий в переменном температурном поле .....	76

6.2.2.	<i>Математическое описание и расчет экструдера для режима нормальной эксплуатации (с учетом движения материала в зазоре цилиндра) .....</i>	79
6.2.3.	<i>Математическое моделирование процесса охлаждения листа в охлаждающей ванне .....</i>	83
6.2.4.	<i>Тепловой расчет установки периодического действия для термовлажностной обработки .....</i>	86
6.2.5.	<i>Математическое описание теплового режима каландра при обогреве его паром (пусковой режим) .....</i>	91
<b>7.</b>	<b>Моделирование неравновесных процессов в защите окружающей среды .....</b>	<b>95</b>
7.1.	Теоретические основы описания неравновесных систем .....	96
7.1.1.	<i>Функции распределения частиц по поступательным и внутренним степеням свободы.....</i>	96
7.1.2.	<i>Столкновения частиц. Сечение столкновения. Константа скорости реакции.....</i>	98
7.2.	Системный анализ химически реагирующей плазмы.....	101
7.2.1.	<i>Подсистема электронного газа .....</i>	102
7.2.2.	<i>Подсистема колебательно-возбужденных молекул (КВМ) .....</i>	110
<b>8.</b>	<b>Роль математического моделирования при оптимизации технологических и природных систем .....</b>	<b>122</b>
8.1.	Общая постановка задач оптимизации .....	122
8.2.	Математические модели процессов и их роль в решении оптимальных задач .....	123
8.3.	Расчет оптимального режима термообработки при получении пенокарбидов титана .....	124
8.4.	Нахождения оптимального состава композиции при получении вяло-упругих пенополиуретанов.....	131
8.5.	Математическое моделирование биологической очистки сточных вод для обоснования выбора типа управляемого привода воздуходувок.....	134
8.6.	Математическое моделирование вакуум испарителя для утилизации вторичного тепла.....	141
	<b>Заключение .....</b>	<b>146</b>
	<b>Глоссарий .....</b>	<b>147</b>
	<b>Список литературы.....</b>	<b>151</b>