МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. Л. Чечулин

Метод пространства состояний управления качеством сложных химико-технологических процессов

Монография

УДК 519.7; 66.0; 681.5 ББК 22.1; 35 Ч 57

Чечулин, В. Л.

Метод пространства состояний управления качеством сложных Ч 57 химико-технологических процессов: монография / В. Л. Чечулин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2011. – 114 с.

ISBN 978-5-7944-1774-6

В монографии описано обоснование метода пространства состояний управления качеством сложных химико-технологических процессов. Особенность метода заключается в проецировании параметров процесса в определённое пространство состояний ограниченной размерности, с нормированием его одномерных подпространств, с выделением одного главного параметра качества и одного главного параметра управления. Указаны примеры суперпозиции задач управления. Оптимум управления находится посредством стандартных статистических методов.

В первой главе рассматриваются особенности вертикальной иерархической структуры информационных систем, являющихся инструментом управления качеством.

Во второй главе — ограничения применимых информационных методов управления.

В третьей главе описаны конструктивные результаты, лежащие в основе метода пространства состояний.

В четвёртой главе описано построение метода пространства состояний управления качеством химико-технологических процессов.

В заключительных главах рассмотрены приложения метода к различным процессам химической технологии.

Книга предназначена для научных работников, инженеров, аспирантов, студентов старших курсов.

УДК 519.7; 66.0; 681.5 ББК 22.1; 35

Печатается по решению редакционно-издательского совета Пермского государственного национального исследовательского университета

Рецензенты: д. ф.-м. н., проф., заместитель директора ООО «Лаборатория Аргумент» по научной работе C.~B.Русаков; к. ф.-м. н., доц. каф. математического моделирования систем и процессов ФБГОУ ВПО ПГНИПУ $\Phi e doceeb$ C.~A.

Chechulin V. L.

State-space method quality control of plant chemical processes: monograph / Perm State University. – Russia, Perm, 2011.– 114 p.

ISBN 978-5-7944-1774-6

The book describes the method of justification of the state space governance quality of complex chemical processes. Feature of the method consists in projecting a certain process parameters in the state space bounded dimension, with a valuation of its one-dimensional subspaces, with the release of one of the main parameters of quality and one main parameter control. Are examples of superposition of management tasks. Optimum control is through standard statistical methods.

Chapter 1 discusses the features of a vertical hierarchical structure of information systems, is an instrument of quality management.

Chapter 2 discusses limitations applicable information of methods of control.

Chapter 3 describes the results of the structural underpinning of the method of state space.

Chapter 4 describes the construction of state-space method quality control of chemical and technological processes.

Chapters 5 and 6 we consider the application of the method to different processes of chemical technology.

The book is intended for scientists, engineers and graduate students.

Published by the decision of the Editorial Board Perm State University

Reviewers: deputy director of the «Laboratorya Argument» for research, prof., S. V. Rusakov; docent of department mathematical modeling of systems and processes of Perm State Technical University S. A. Fedoseev

Содержание

Contents	6
Предисловие автора	7
Часть 1. Методологические и математические основания метода	8
Глава 1. Методологические основания.	8
§1. Методологические особенности изложения	8
§2. Онтологические основания.	8
§3. Гносеологические основания.	9
§4. Вертикальное структурирование социально-	
информационных систем	. 10
§5. Стадии научно-инновационного цикла	
§6. Уровни обработки информации в системах АСУ, АСУТП	.16
§7. Единство вертикальной структуры экономических	
субъектов.	
Глава 2. Ограничительные теоремы.	.20
§8. Теорема Гёделя о неполноте.	.20
§9. Теорема Маркова об алгоритмической неразрешимости	.22
§10. Теорема Нагорного о неалгоритмизуемости	. 24
§11. Непроецируемость на пространство меньшей	
размерности	.26
Глава 3. Конструктивные теоремы.	
§12. Теорема о размерности пространства состояний	
§13. Теорема о суперпозициях.	.32
§14. Теорема размерности и 4-раскрашиваемость плоских	
графов.	
§15. Теорема о непротиворечивости базовой теории	
§16. Основное логистическое уравнение и задача управления	
§17. Пространство состояний и онтологические основания	
Часть 2. Приложения метода пространства состояний	. 39
Глава 4. Системы управления качеством технологических	
процессов.	
§18. Примеры бытовых процессов	
§19. Процесс сушки.	
§20. Формулировка метода пространства состояний	
Глава 5. Приложения к процессам металлургии титана	
§21. Процесс плавки концентратов в рудно-термических печах.	
§22. Процесс хлорирования титаносодержащей шихты	
§23. Процесс очистки четырёххлористого титана от ванадия	
§24. Процесс производства диоксида титана	
§25. Процесс вакуумной сепарации губчатого титана	
Глава 6. Примеры приложения метола пространства состояний	74

§26. Процесс флотационного обогащения руд	74
§27. Процесс производства формалина и учёт старения	
катализатора	78
§28. Процесс получения алифатических аминов	
Дополнение.	
§29. Некоммутативность диаграммы программного комплекса	
§30. Задачи 5-го уровня управления	
§31. Обзор определений структуры информационной системы	
Послесловие	101
Список литературы	102
Предметный указатель	
Index	

Contents

Contents 6

Foreword by the author 7

Part 1. Methodological and mathematical foundation of the method 8

Chapter 1. The methodological bases of 8 8 1. Methodological features of presents

§ 1. Methodological features of presentation 8

§ 2. Ontological foundation 8

§ 3. Epistemological foundation. 9

§ 4. Vertical structuring social information systems 10

§ 5. Stage of scientific innovation cycle 13

§ 6. Levels of information processing systems, process control, process control system 16

§ 7. The unity of the vertical structure of economic entities. 19

Chapter 2. Limiting theorems. 20

§ 8. Godel's incompleteness theorem. 20

§ 9. Markov theorem on algorithmic unsolvability. 22

§ 10. The theorem of Nagorny nealgoritmizuemosti 24

§ 11. Unproectionness on the space of smaller dimension 26

Chapter 3. The design of the theorem. 27 § 12. A theorem on the dimension of the

state space 27

§ 13. Theorem on superpositions of 33

§ 14. Theorem and the dimension of the 4-colorability of planar graphs 37

§ 15. A theorem on the consistency of the underlying theory. 37

§ 16. The main logistic equation and the problem of controlling 39

§ 17. The state space and ontological grounds 39

Part 2. Applications of the method of the state space 40

Chapter 4. Quality management system processes. 40

§ 18. Examples of household processes 40

§ 19 Drying 40

§ 20. Formulation of the method of the state space 46

Chapter 5. Applications to process metallurgy of titanium 47

§ 21. The process of smelting ore-smelting furnaces concentrates in 47

§ 22. The process of chlorination of titanium charge 50

§ 23. The cleaning process of titanium tetrachloride Vanadium 58

§ 24. The production process of titanium dioxide 59

§ 25. The process of vacuum separation of titanium sponge 63

Chapter 6. Examples of applications of the method of the state space 75

§ 26. The process of flotation of ores 75

§ 27. The manufacturing process of formalin and record the catalyst ages 79

§ 28. The process of obtaining aliphatic amines 85

Supplement. 87

§ 29. Noncommutativity diagram software package 88

§ 30. The objectives of the 5th level of management 89

§ 31. Review the definitions of the structure of the information system. 99

Conclusion 102

Literature 103

Index (Russian) 112 Index 113

Предисловие автора

Данная монография написана на основе одной из прикладных частей курса лекций по теории активных систем, прочитанных в Березниковском филиале Пермского государственного технического университета в 2005/2006 и 2006/2007 учебных годах, а также в 2009/2010 учебном году в Пермском государственном университете студентам специальности «Прикладная математики и информатика».

Основное внимание в книге уделено основаниям построения информационных систем, учитывающим неотделимое присутствие человека в этих системах — человека, обладающего структурированным процессом отражения действительности сознанием, обуславливающим иерархическую структуру социально-информационных систем.

Автор выражает благодарность, прежде всего, Л. П. Чечулину и Ю. П Кирину, ознакомившим автора с предметной областью, а также А. В. Затонскому и С. В. Русакову — за предоставление возможности чтения лекционных курсов.

О порядке изложения

Очередность изложения материала в книге следует последовательности этапов познания:

- і. непосредственное созерцание структурных категорий, связанных с человеком,
- ii. абстрактно-логические и математические утверждения, основывающиеся на п. i.,
- iii. приложение математических конструкций к упорядочению материальных процессов.

Естественно, что созерцательные основания "шире" математики, а математический аппарат "шире" решаемых задач управления.

Изложение построено так, что читать книгу можно в любой последовательности, восполняя при необходимости предварительные знания, ориентируясь по внутренним перекрёстным ссылкам, оглавлению и предметному указателю.

Часть 1. Методологические и математические основания метода

Глава 1. Методологические основания.

Методологические основания применения математических методов связаны с тем, что математический аппарат, как инструмент упорядочения явлений действительности, учитывает наличие субъекта в описываемой системе, причём субъекта, описывающего эту систему и себя самого, как её неотъемлемую часть.

§1. Методологические особенности изложения.

Составляющие действительности таковы: і. материально-вещественная действительность, іі. время и информационные структуры, ііі. сознание человека. Сознание человека непосредственно созерцает истину [57], которая является основанием для математических теорий (абстрактного мышления), которые, в свою очередь, являются инструментом для упорядочения явлений окружающей материальной действительности. Таким образом, в этой последовательности наблюдаются ступени постижения истины: непосредственное созерцание, абстрактнологическое мышление, практика [57].

Изложение материала в этой книге следует этой же последовательности: от непосредственно созерцаемых структур к математическому аппарату, затем к практическим его приложениям в материальной действительности (предметной области). Сначала изложены основания структурирования информационных систем; затем — математические



Рис. 1. Онтологическая иерархия

результаты в виде ограничительных и конструктивных теорем; далее эти результаты в виде метода пространства состояний управления качеством приложены к некоторым классам промышленных процессов химической технологии.

§2. Онтологические основания.

Онтологические основания конструирования информационных систем связаны с тем, что модели и информационные процессы, выносимые во вне при программировании и построении

производственных систем, имеются внутри человеческого сознания, которое, в свою очередь, окружено внешней материальной действительностью (см. рис. 1). При этом при отражении окружающей действительности математический инструмент её описания необходимо описывает и сознание человека, отражает его структурные особенности (как это связано с иерархией математических понятий рассмотрено отдельно [107], [108], [109]). То есть при отражении окружающего мира в сознании результат отражения учитывает структурные особенности человеческого сознания.

С другой стороны, информационные системы конструируются по их образу, находящемуся внутри человеческого сознания, и поэтому тоже отражают во вне его структурные особенности.

Также имеется онтологически обусловленная иерархия видов деятельности:

- і. материально-вещественная деятельность,
- іі. процессная деятельность,
- ііі. социально-структурная деятельность —

эти виды деятельности соответствуют разным уровням деятельности на разных уровнях вертикальной структуры экономических субъектов 1 . Это подробнее описано ниже.

§3. Гносеологические основания.

Гносеологические основания вертикального структурирования информационных систем связаны с наличием "вертикальной" 6-ти уровневой структуры отражения действительности в сознании человека (см. рис. 2). Верхний 6-й уровень отражения является непредикативным (самоссылочным), ему соответствуют ценностные рассуждения (система потребностей человека, 10-ти частная, см. подробнее [115]), определяющая цели деятельности, в том числе цели промышленного производства (см. [115]). Система потребностей соответствует аксиологическим (ценностным) основаниям деятельности, в этой книге подробно не рассматривается, описана отдельно в [115]. Эта гносеологическая структура отражения определяет то, что между целью деятельности (6-й уровень отражения) и её материальной реализацией (1-й уровень) выстраивается определённая иерархия деятельности. Причём в плане взросления человека эта иерархия видов деятельности строится от низших к высшим по мере образования и постепенного достижения высшего, 6-го психологического возраста (особенности взросления и кризисов разви-

_

 $^{^1}$ В терминологии классической советской философии эти виды деятельности соответствуют типам труда: і. — простой труд, іі. — абстрактный труд, ііі. — всеобщий труд.

тия описаны отдельно в [110], [111]).

Эта гносеологически обусловленная структурой отражения действительности иерархия видов деятельности проявляется в вертикальной структуре экономических субъектов.

§4. Вертикальное структурирование социально-информационных систем.

Познание связано с отражением действительности в сознании человека (см. рис. 2). Каждому уровню отражения соответствует определённый уровень абстрактности понятий, формирующийся на соответствующем психологическом возрасте. Каждому уровню (возрасту) соот-

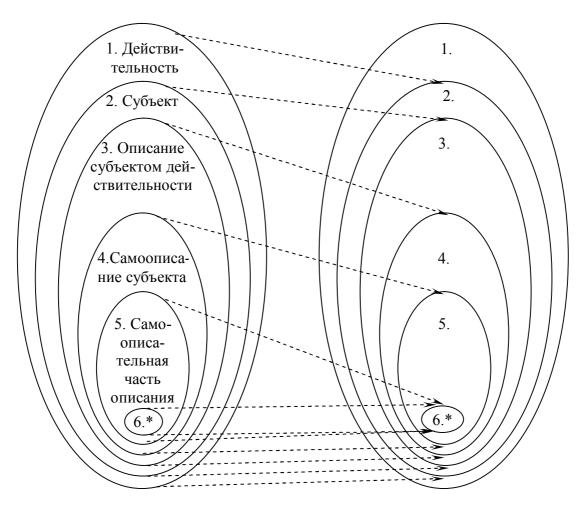


Рис. 2. Схема отражения мира в самосознании: 6* — самоописание субъекта в самоописательной части описания мира

ветствует определённый тип ведущей деятельности, что связано с нали-

чием вертикальной 6-уровневой структуры экономических субъектов (см. результаты Выготского Л. С., Кольберга О., Эриксона Э. [72] [55]). Вертикальная внутренняя структура экономических субъектов (выражающая известный формационный принцип развития экономики и поглощения более высшими социально-экономическими формациями низших [87], но уже в их преобразованном и подчинённом наличной высшей формации виде) на примере крупного промышленного предприятия такова: 1) рабочие, 2) бригадиры (младшие мастера), 3) старшие мастера служб цеха, 4) администраторы (начальники цехов), 5) начальники отделов, 6) директорат предприятия (см. табл. 2).

Особенности внутренней структуры экономических субъектов, связаны с построением информационных систем управления предприятиями.

В вертикальной структуре отражения действительности отмечается, что на высшем 6-м уровне отражения наличествует осознание ценностных (аксиологических категорий), объективно общих для всех субъектов, и этой общностью объединяющих (в основаниях) цели экономической деятельности.

Этому же уровню отражения в истории развития математики (иерархии математических понятий) соответствуют непредикативные конструкции и вероятностные меры (связаны с присутствием человека как определяющего то, что понимается под событием).

Вертикальная 6-уровневая структура деятельности упомянута ранее, детальное описание этой внутренней структуры экономических субъектов (обусловленной определённой структурой человеческого сознания) представлено в табл. 2.

Таким образом, деятельность на данном уровне является преимущественно соответствующей определённому виду ведущей деятельности некоторого психологического возраста, что в целом соединяет систему наличием общих целей, преимущественно соответствующих высшим уровням развития самоосознания.

Такую же внутреннюю структуру имеют и сельскохозяйственные предприятия [96; 100; 121], медицинские учреждения, учреждения сферы образования и т. д.

Конкретизация экономико-формационного принципа

Вышеописанная внутренняя структура предприятий является конкретизацией известного социально философского экономикоформационного принципа [29]. При экономическом развитии и переходе на следующий, более высокий (и более сложный) уровень виды деятельности низших формационных уровней входят в высший в преобразованном и подчинённом общим целям виде, что и наблюдается в со-

Личностное осознание будущей профессии (призвания)²

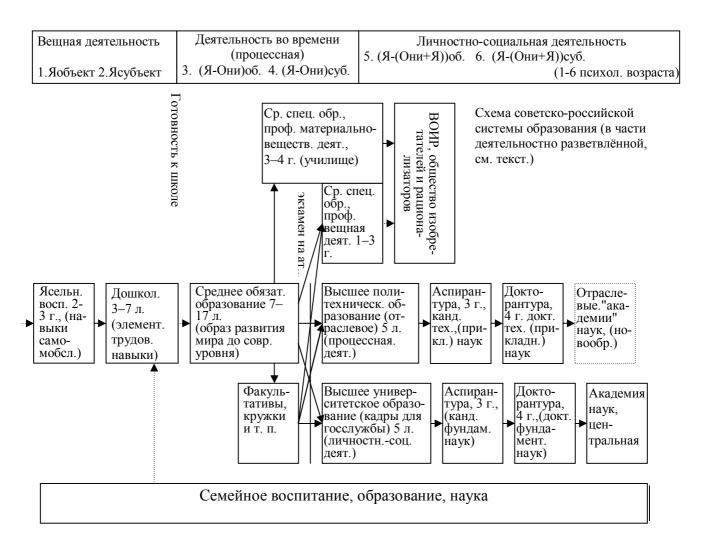


Рис. 3. Схема системы образования

временной 6-уровневой структуре, низшие уровни которой являются преобразованными уровнями предыдущего развития экономического поведения.

С другой стороны, при деградации наблюдается деструкция, низшие уровни выходят из подчинения и образуют структуры, не достигающие по сложности высшего уровня развития (примеры такой деструктуризации в сельском хозяйстве приведены в работе [122], см. также [100]).

Связь со структурой системы образования

Структуре организационных уровней экономической системы со-

ответствуют определённые уровни системы образования, определяющие квалификацию, необходимую для успешной деятельности на том или ином уровне, в системе образования это проявляется как наличие 6 распределённых уровней подготовки кадров.

При выделении а) вещественного труда, б) труда организации производственного процесса во времени и в) труда организации структурных взаимодействий между разными экономическими субъектами итоговая система уровней в системе образования такова:

- а) уровни вещной деятельности:
- 1) обучение на рабочем месте (учебно-производственные комбинаты);
- 2) училища;
 - б) уровни процессной деятельности:
- 3) техникумы (готовящие старших мастеров);
- 4) политехнические институты, политехнические вузы (готовящие ИТР);
 - в) уровни структурно-организационной деятельности:
 - 5) экономические (и отраслевые) институты;
 - 6) университеты (академии).

Поэтому-то в системе образования наличествует горизонталь выбора (в момент окончания 4-го психологического возраста, окончания средней школы, достижения правоспособности выбора профессии, при осознании меры способностей), соответствующая ориентации на ту или иную профессию и уровень в экономической системе, выбираемые по мере способностей [99], [92]. Схема структуры системы образования приведена на рис. 3.

Таким образом, структура всей системы образования в целом соответствует: а) глубинным психологическим закономерностям, б) потребностям в воспроизводстве структуры всей общественной системы (производства), что имеет глубинные основания, связанные со внутренним структурированием самоосознания человека.

Обратным по отношению к образованию при взрослении — движении от низших уровней к высшим — является совершенствование системы (научно-производственный, инновационный цикл), с движением от высших уровней к низшим [97].

§5. Стадии научно-инновационного цикла.

При движении от высших уровней к низшим нововведения проходят те же 6 уровней при достижении конечной цели внедрения и использования в промышленном производстве. Движение по этим уровням соответствует в целом общим стадиям постижения истины: а) непосредственному созерцанию, б) абстрактному мышлению, в) практике [57].

Стадии научно-производственного цикла, начинающегося с высших стадий и продолжающегося к низшим, таковы:

- 6. Фундаментальные исследования (не допускающие планирования, ибо запланировать открытие невозможно).
- 5. Прикладные (отраслевые) исследования на основании фундаментальных достижений (отчасти планируемые).

(Уровни 5, 6 и низшие образуют і-й цикл — цикл научных исследований, подлежащих Госбюджетному финансированию).

- 4. Опытные проектно-конструкторские работы (ОПКР, НИОКР) проектные работы по созданию промышленных образцов.
 - 3. Внедрение, исполнение проекта.

(Уровни 4, 3 и низшие образуют іі-й цикл — цикл проектновнедренческих работ.)

- 2. Пуско-наладочные работы.
- 1. Эксплуатационные работы по обеспечению рабочего режима производства (собственно производственная деятельность).

(Уровни 2, 1 образуют ііі-й цикл — цикл текущих ремонтов и производственной эксплуатации оборудования).

Основным образующим весь этот цикл является этап фундаментальных (не сводимых к исполнению плана) исследований, составляющий і-й этап в постижении истины — непосредственное созерцание; следующие этапы постижения истины (іі. абстрактное мышление и ііі. практика) соответствуют следующим подциклам основного научнопроизводственного цикла. Стадии научно-производственного цикла соответствуют тем организационным уровням производственного предприятия, при взаимодействии с которыми они выполняются (кадровые соответствия по уровню образования — очевидны).

Более развёрнуто стадии научно-производственного цикла представлены в табл. 1.

Таким образом, при описании вертикальной структуры организации экономических субъектов и системы качественных изменений экономики (научно-производственного, инновационного цикла) видно, что изменения обусловлены наличием ценностных ориентиров, сопровождающих фундаментальные исследования (на 6-м уровне отражения). А коммерческое внедрение и сопровождающая его оправданность затрат общественно-необходимого времени (окупаемость) носят лишь служебный характер.

Таблица 1. Содержание и особенности 6 этапов научно-производственного цикла

№ уров- ня	Ступень пости- жения истины	Содержание уровня (изложено по [53])	Организационные особенности
6	созерцание	«Первая стадия охватывает фундаментальные исследования, направленные прежде всего на раскрытие неизвестных человечеству закономерностей, явлений и свойств материального мира», а также на экономное (математическое) описание явлений уже известных.	Основная особенность этапа фундаментальных исследований — непредсказуемость результата (если бы результат был уже известен, незачем было бы и наукой заниматься). Полученный результат "как бы" над имеющимся наличным общественным сознанием, совершенствует его и в него постепенно включается.
5	Непосредственное созерцание	«Вторая — включает прикладные научно- исследовательские работы, которые на основе достижений фундаментальных исследований решают научно- технические проблемы отраслей, производственных объединений и предприятий».	Особенность этапа прикладных работ (допускающих уже содержательное планирование) — невозможность календарного планирования в связи с неопределённостью объёма еще невыполненных работ (частичной неизвестностью результата). Основное содержание работ этого этапа — определение меры экономической эффективности (общественной полезности) конкретного приложения фундаментальных результатов, полученных ранее ² .
4	Абстрактное мышление	«В качестве третьей стадии выступают проектноконструкторские и опытные работы, включающие создание опытных образцов».	Особенность 4-го этапа работ заключается в том, что помимо внедрения новшеств (с высших уровней), значительную часть проектных работ составляют проектные работы по текущим реконструкциям производства (по техзаданиям цехов), т. е. уровни 1—4 образуют цикл реконструкций, не связанных с качественными изменениями, которые обосновываются на уровне 6.

² Фундаментальные и прикладные работы выполнимы большей частью частными лицами при научных институтах, вузах и весьма редко (лишь прикладные работы) — в лабораториях предприятий.

№ уров-	Ступень пости- жения истины	Содержание уровня (изложено по [53])	Организационные особенности	
3 3		«Четвёртая стадия выра- жается во внедрении нов- шества в производство».	Особенность 3-го этапа работ — назначение одного лица, ответственного за конечное исполнение проекта (обычно на производстве — это стар-	
			ший специалист соотв. службы: ст. механик, ст. энергетик и т. п.).	
2	Практическая (материально-вещесвенная) деятельность	«Пятая состоит в производственном воплощении новшества в регулярно производимой продукции» при пуско-наладочных работах.	Особенность 2-го этапа работ — совпадение содержания работ по пусконаладке с текущим техническим обслуживанием и ремонтом оборудования (уровни 1–2 образуют цикл работ по текущим ремонтам и эксплуатации оборудования, не связанный с изменением проектной документации).	
1	Практическая (матер деятел	«На шестой стадии осуществляется деятельность по обеспечению оптимальной эксплуатации, сервисного обслуживания, производства запасных частей», текущего ремонта и т. п.	Особенность низшего этапа работ состоит в том, что нижний уровень является основным, первичным (в ремонтных и эксплуатационных службах) по ведению учёта в потребностях в материалах и оборудовании для обеспечения бесперебойной деятельности производственной системы.	

§6. Уровни обработки информации в системах АСУ, АСУТП.

Аналогичную гносеологически обусловленную структуру имеют и уровни обработки информации в промышленных социально-информационных системах.

Задачи, решаемые на разных уровнях системы АСУП (автоматизированной системы управления производством) и АСУПП (автоматизированной системы управления технологическим процессом), применительно к химико-технологическому процессу, примерно таковы:

³ Основное свойство этого (3-го, (Я–Они) $_{06}$.) уровня (психологического возраста) — ориентация на "подчинение авторитету" [55, с. 157].

Так называемые "венчурные" (от англ. wench — "служанка" [127]) разработки, ограниченные малыми техническими новшествами (без масштабных фундаментальных и прикладных работ, даже без значительных реконструкций, требующих согласованной работы разных служб предприятия и соответствия разных частей проектов), в указанной структуре соответствуют 3-му уровню — назначению одного ответственного за внедрение лица (изобретателя).

- на первых двух уровнях (1, 2, нижний уровень активности) обычные задачи автоматизированного управления (дисциплины «Теория автоматического управления», построения регуляторов, действующих автономно, без постоянного вмешательства человека, [58], [66]);
- на средних уровнях системы (3, 4) задачи обеспечения наблюдаемости за физико-химическими параметрами процесса (расчетными состояниями системы по материальному, кинетическому и энергетическому балансам процесса) и задачи оптимизации процесса в текущем времени (по критерию минимума издержек и ограничениях на качество продукта) по статистической обработке потока данных о процессе и качестве продукта,— задачи особенные для каждого процесса (примеры см. в [42] и в главах 5, 6);
- на верхних уровнях (5, 6) обеспечение равномерности производства, в соответствии с планом (5-й уровень)⁴, и задачи планирования, прогнозирования при оптимизации нормирования прибыли⁵ (эти задачи описаны отдельно в [115]).

Решая информационные задачи, человек переносит на технику те процессы, которые прежде были процессами мышления, т. е. в конечном итоге создаёт системы по образу в нём существовавшему, при этом явное определение общезначимой структуры мыслительных процессов значимо для правильной организации производства⁶. Впервые без гносеологических оснований приближённая 6-уровневая структура информационных уровней выделена ещё в 60-е гг. [120].

_

⁴ выполнение условий соответствия товаропотока плану за отчётный период $[t_0 - t_n, t_0]$:

 $[\]int_{t_0-t_n}^{t_0} (f_{\textit{плана}}(t) - f_{\textit{факта}}(t)) \ dt \to 0 \ , \qquad \text{при} \qquad \text{минимуме} \qquad \text{возмущений}$ $\int_{t_0-t_n}^{t_0} (f_{\textit{плана}}(t) - f_{\textit{факта}}(t))^2 \ dt \to \textit{min} \ .$ 5 Стационарная точка последовательности $x_{i+1} = 1 - x_i^{x_i}$, при $n \to \infty \quad x_n \to 0.3036 \ldots$,

⁵ Стационарная точка последовательности $x_{i+1} = 1-x_i^{x_i}$, при $n \to \infty$ $x_n \to 0.3036...$, $x_0 \in [0, 1]$, описывающей оборот общественного времени, приведённого к 1, причём x — мера времени на производство, (1-x) — на потребление, указывает на стационирующую денежный оборот норму прибыли в 0.3036... от объёма продаж (зарплаты, налоги, акцизные платежи, дивиденды и т. п. исчисляются из прибыли), применявшуюся неявно в виде коэффициента планирования прибыли 0.3 в 70-е -80-е гг. XX в., см. [88], [115].

⁶ Учёт влияния человеческого фактора был определён ещё в 70-е гг. XX в. в курсе на химизацию и автоматизацию народного хозяйства (и означен в документах тех лет).

Таблица 2. Уровни структуры АСУТП, АСУП

Гаоли	Таблица 2. Уровни структуры АСУТП, АСУП					
№ уровня	содержание	А. Наблюдаемые совр. структурные уровни организации промышленных предприятий (соподчинённые социальные).	Б. Уровни структуры АСУТП, АСУП (технико-информационные)ю			
1. Яоб.	вещная деятельность	Рабочие (обслуживающие вещь, промышл. уст.; подчиняющиеся непоср. мастеру).	Датчики, средства измерения, управления.	ровни		
2. Acy6.		Мастера, бригадиры, (материально ответственные лица).	Автоматика локальных контуров управления (контроллеры, схемы локальной сигнализации и т. п.).	ппаратные у		
3. (Я-Они)об.	процессные, во времени (функциональ- ные) отношения	Старшие специалисты, нач. отд. производств. участков цеха (с определёнными, непересекающимися обл. ответственности, и управлянющие рабочими через мастеров, ответств. за управл. отдельн. процессами).	ПЭВМ автоматизиров. рабочих мест. (сбор, хранение, отображение, передача данных), прогр. обеспечение наблюдаемости процесса и оптимизации, упр. качеством продукта (обсчёт моделей в текущем времени).	преимущественно аппаратные уровни		
4. (Я-Они)суб.	процессные, во в ные)	Начальники цехов (едино- личные особенные админи- страторы, ограниченные законодательством, следя- щие за текущей выгодой пр-ва в цехе).	Прогр. и информац. обеспечение систем оптимизации и упр. качеством продукта (инструмент для техрука цеха), систем учёта планиров. (экономисты по пр-ву и труду).	уровни		
5. (Я-(Они+Я))об.	личностно-общественные взаимосвязи	Начальники отделов (организующие при участии сотр. низш. уровней учёт и планирование пр-ва, контроль исполнения плана, связь с иными производств. предпр.).	Прогр. и информац. обеспечение систем учёта и планирования (исполнения плана), прогнозирования, взаимодействия с иными предприятиями.	собственно информационные уровни		
6. (Я- (Они+Я))суб.	личностно-	Директорат, выражающий долгосрочные цели пр-ва, заказывающий прогнозы деятельности, определяющие производственные планы.	Системы экономич. и научно- практич. прогнозирования (по данным систем учёта), выра- ботка согласованного, само- применимого (отчасти) плана.	собстве		



Рис. 4. 6-ти уровневая структура АСУТП.

Информационные уровни промышленного предприятия изображены на рис. 4, см. также §31.

§7. Единство вертикальной структуры экономических субъектов.

Обозначенная выше вертикальная структура экономических субъектов является универсальной (инвариантной) для разных типов экономических субъектов, в том числе для промышленных предприятий, и со своей спецификой для медицинских, образовательных, научных учреждений, учреждений управления, сфер торговли и т. п., ввиду единства оснований её наличия — единства схемы отражения действительности в сознании и иерархии видов деятельности, подробно конкретное описание структуры других, нежели промышленные, экономических субъектов, подлежит отдельному описаниию.

Глава 2. Ограничительные теоремы.

§8. Теорема Гёделя о неполноте.

Предикативные и непредикативные формальные системы

В главе 1 (см. рис. 2) описана структура отражения действительности, высший уровень отражения является непредикативным (самоссылочным). В книге [109] описана теория множеств с самопринадлежностью, основные результаты которой имеют приложение к построению метода управления качеством.

Предикативные формальные системы — это формальные системы, в которых нет самовыводимости утверждений (нет круга, самоссылочности в логическом выводе) 7 .

Теоремы Гёделя

Подробно основания структур с самопринадлежностью и сами эти структуры описаны отдельно [98; 75]. Для понимания этого параграфа достаточно интуитивного представления о несамопринадлежащих $(X \notin X)$ и самопринадлежащих $(Y \in Y)$ объектах.

Теоремы Гёделя доказываются достаточно кратко [103]. Пусть имеется *предикативная* теория T, такая, в которой имеется набор аксиом (схем аксиом) A_i и выводимые утверждения B_i ,

где
$$(A_{il}, ..., A_{in}, B_{jl}, ..., B_{jm}) = B_{j0}$$
, (1) причём выводимое утверждение не содержится в цепи вывода от аксиом

до себя самого, т. е. в левой части формулы (1), которую безотносительно её содержания обозначим через L, $\{A_{il}, ..., A_{in}, B_{il}, ..., B_{im}\} = L$, где $B_{i0} \not\in L$.

Теорема 1 (о недоказуемости непротиворечивости). В предикативной системе недоказуема её непротиворечивость.

Теорема 2 (о неполноте предикативной системы). Предикативная теория неполна.

Схемы доказательств этих теорем одинаковы: непредикативные утверждения о непротиворечивости или полноте предикативной теории T не являются в самой этой теории выводимыми, ввиду того, что эти утверждения в их выводе ссылаются на себя самих.

Пусть C — высказывание о непротиворечивости теории, т. е. в Cутверждается, что все утверждения теории T таковы, что в ней (теории T) не выводимы и их отрицания. И пусть T непротиворечива, т. е. высказывание С выполнимо на всех высказываниях этой теории (важным

⁷ Аксиомы A_i являются самовыводимыми, $A_i = A_i$, поэтому предикативность относится к теоремам B_i , выводимым из аксиом.

для использования семантики самоссылочных высказываний является допущение того, что это высказывание уже истинно), т. е. семантически C выводимо из множества всех высказываний теории, в том числе и из себя самого (раз отрицает собственное отрицание при наличии непротиворечивости),

$${A_i, ..., B_j, ..., C} = C,$$
 (2)

где $C \in L$, что противоречит условиям предикативности системы T $(C \notin L)$. Следовательно, теорема 1 о том, что в предикативной теории недоказуема её непротиворечивость, доказана. \square^8

Пусть F — высказывание о полноте системы, т. е. F утверждает, что в системе T выводимы все утверждения, в том числе и само F, но тогда F, если оно верно, семантически (самоссылочно) выводится и из себя самого

$${A_i, ..., B_j, ..., F} |= F,$$
 (3)

где $F \in L$, что противоречит условиям допущения чисто предикативности теории T ($F \not\in L$). Теорема доказана. \square

Однако предположение о непредикативности теории T являлось лишь начальным условием рассуждений, в связи с доказанными теоремами допускается и иная интерпретация результата — непротиворечивость теории недоказуема в предикативных системах, т. е. доказательства непротиворечивости возможны только с допущением непредикативности (самоссылочности) в семантике рассуждений, как, например, в теории множеств с самопринадлежностью.

Теорема 3. Непротиворечивость и полнота теории недоказуемы средствами самой этой предикативной теории. □

Интерпретация теорем Гёделя

Пусть имеется технологический процесс, известны начальные и граничные условия процесса (это своего рода аксиомы теории), и построена предикативная модель процесса, тогда в силу теорем о неполноте (теорема 2) и недоказуемости непротиворечивости предикативной формальной системы (теорема 1) предикативная модель не будет описывать всех возможных конечных состояний системы; улучшение предикативной модели (по теореме 3) не влечёт разрешения этой проблемы. Таким образом, для организации управления процессом требуется непредикативная система с измерением конечных состояний химикотехнологического процесса⁹.

Этот же самый результат получается и из других соображений.

-

⁸ Знак окончания доказательства теоремы.

⁹ Очевидно, что это имеет место не только для технологических, но и для экономических процессов.

§9. Теорема Маркова об алгоритмической неразрешимости.

Краткая схема доказательства теоремы

Полный вариант доказательства теоремы приведён в [49] (см. также [46], [45], [2]); ниже описана краткая схема рассуждений доказательства теоремы об алгоритмической неразрешимости проблемы тождества слов в полугруппах, для любого числа образующих соотношений в полугруппе.

Дана полугруппа S с бинарной операцией $a \cdot b = c$, $(a \cdot b) \cdot c = (a \cdot b) \cdot c$, обратный элемент в полугруппе отсутствует. Пусть требуется определить тождественность двух слов в полугруппе (двух произведений некоторых наборов элементов полугруппы). Предположим, имеется алгоритм определения тождественности двух этих слов. Тогда для построения алгоритма распознавания тождественности этих слов требовалось бы прежде построить алгоритм распознавания слов меньшей длины. Для слов длиной I, очевидно, такой алгоритм существует,— определимо тождество двух одинаковых элементов полугруппы ($a_1 = a_2$, при a_1 , $a_2 = a$). Далее для слов длины $2 : b_1 a_1$ и $b_2 a_2$ для определения тождественности b_1 и b_2 при определённой уже тождественности $a_1 = a_2 = a$ требовалось бы умножить слова длины $a_1 = a_2 = a$ требовалось бы умножить слова длины $a_1 = a_2 = a$ требовалось бы умножить слова длины $a_2 = a$ 0 справа на обратный к а элемент $a_2 = a$ 1, но обратных элементов в полугруппе нет, поэтому построение алгоритма распознавания тождественности слов (длины, большей чем $a_1 = a_2 = a$ 2 невозможно. Доказана теорема.

Teopema 4. Не существует алгоритма распознавания тождественности двух слов (неединичной длины) в полугруппе. □ 10

Интерпретация теоремы

Ограничения на применимость матметодов для описания сложных химических процессов, следующие из этой теоремы таковы. При описании алгоритмической вычислимости параметров управления в действительных системах управления (химико-технологическими) процессами

_

¹⁰ Количество образующих соотношений в этом варианте доказательства несущественно (т. е. может быть и одно образующее соотношение). Что улучшает результат полученный Адяном в 1960 г. (доказал теорему для 2-х и более определяющих соотношений [2]), улучшившего результат Маркова 1944 г. (доказавшего теорему для случая 3-х и более определяющих соотношений в полугруппе [46], см. также работы Мальцева [45]). В упомянутых доказательствах теоремы об алгоритмической неразрешимости проблемы тождества слов в полугруппах использовалась следующая схема рассуждений: описывались попытки построить конструктивным образом алгоритм для решения этой задачи, но эти попытки построения приводили к противоречиям, из чего следовало утверждение теоремы.

Ход доказательства от противного, использующий предположение, что алгоритм уже существует, применённый в изложенном выше доказательстве, прежде не применялся.

возникают дополнительные условия. Ограничения таковы, что не позволяют алгоритмически вычислять конечный результат (физикохимического) процесса по известным начальным (меры дозировки веществ) и граничным условиям процесса (температурам, давлениям), измеримым во времени.

Метод идентификации систем и попытки построения полных моделей (химико-технологических) процессов оказались малоприменимы для описания действительных систем, что было обнаружено на практике ещё в 60-е гг. ХХ в. [64]. Идентификация оказалась ограниченно применима лишь для расчета параметров контуров управления (2-го уровня АСУТП), но не для стабилизации качества процесса, ввиду неучёта многих факторов: естественного отличия практики от теории при весьма сложном химизме процессов даже обычных реакций неорганической химии. (К тому же при идентификации процесса принимать процесс за "чёрный ящик" с неизвестным содержимым, хотя о химизме процесса достаточно известно,— методологически некорректно).

Кроме того, если в системе химических реакций процесса имеются циклы реакций, то описания процесса системой дифференциальных уравнений неприменимы ввиду того, что функция, описывающая концентрацию компонента, не может быть аргументом себя самой (очевидный математический факт), например цикл $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$, тогда функописывающая концентрацию A. вещества такова: $v_A = v_A(v_B(v_C(v_A)))$, т. е. $v_A(...v_A)$, v_A — функция концентрации вещества Aзависит от себя самой — некорректное применение понятия функции. Практически таков, с циклами реакций, процесс получения формалина, и многие другие процессы сложной химической технологии (например, процесс восстановления четырёххлористого титана магнием). Поэтому остаётся пользоваться описанными ниже в тексте статистическими методами определения параметра управления процессом.

Вполне очевидно, что на практике это ограничение является теоретическим следствием известных с середины XX в. теорем о неразрешимости проблемы тождества слов в полугруппах и ассоциативных системах [45], [49], [46], [2] (это ограничение схематично описано ещё в [80], [81]).

Пусть слово a_1 a_n обозначает левую часть химической реакции, слово b_1 b_n , — правую, где a_i , b_i — буквы в алфавите названий химических элементов, тогда описание одной химической реакции — это установление тождества слов a_1 $a_n = b_1$ b_n , для множества реакций действительного процесса — установление тождества серии из k слов, причём слева к означенным выше словам приписываемы дополнительные подслова F_1 (к левой части), G_1 (к правой части), характери-

зующие физико-химическую составляющую реакции (тепловые эффекты, изменение энтальпии и т. п., определимые по граничным условиям процесса), — такая запись уравнений образует ассоциативную систему (слова некоммутативны — буквы алфавита местами не переменяемы, но ассоциативны — произвольная расстановка скобок в слове не изменяет значения слова). К такой записи применима теорема об алгебраической неразрешимости проблемы определения тождества слов (Мальцев А. И., см. без доказательства в [47, т. 1, с. 215, ст. «Алгоритмическая проблема»]), истолковываемая так, что невозможно по начальным и граничным условиям химико-технологического процесса алгоритмически вычислить результат процесса, а значит, и стабилизировать качество процесса (продукта), что отмечалось практиками в 60-е гг. как недостаточность имевшихся математических методов [64], поэтому (по практическим соображениям и ввиду означенных ограничений) необходим контроль качества готовой продукции, в связи с чем возникает потребность в качественном определении пространства состояний системы управления, для выделения (помимо параметра качества продукта) параметра управления и параметра оптимизации [81], при применении известных результатов теории измеримости и вычислимости неподвижной точки [118], [12].

Поэтому для оптимального управления процессом более корректно применимы методы статистически оптимального управления, описанные ниже.

§10. Теорема Нагорного о неалгоритмизуемости.

Краткая схема доказательства теоремы

Описан краткий вариант доказательства теоремы Нагорного о том, что для построения удвоения слов в некотором алфавите необходим дополнительный по отношения к алфавиту символ.

Теорема Нагорного о том, что построения алгоритма удвоения слова в некотором алфавите А необходим дополнительный по отношения к этому алфавиту символ, известна достаточно давно [48]. О приложениях этой теоремы к анализу ограничений информационных систем писалось в [112], [101], [113]. Эти интерпретации указанной теоремы весьма важны для понимания специфики приложения информационных методов управления к системам, содержащим человека. Опубликованное в [48] доказательство этой теоремы весьма объёмно. Ниже изложен краткий вариант доказательства этой теоремы.

Пусть имеется конечный алфавит A, состоящий из символов a_i ($i \in N$). Попытаемся организовать процесс удвоения слова в этом алфавите.

Имеется слово a_{K1} a_{K2} a_{K3} a_{K4} a_{Kn} , удваивающая процедура копирует символ в начале слова и переносит его в конец слова (за конечный символ слова, на пустое место), получается a_{K1} a_{K2} a_{K3} a_{K4} a_{Kn} a_{K1} . Но для отличения скопированных символов от ещё неподвергшихся процедуре копирования необходим маркер, стоящий между двумя этими множествами символов, а также маркер конца исходного слова. Этот маркер может быть одной и той же буквой 11, тогда процесс удвоения слова выглядит так (маркер — символ "*"):

```
* a_{K1} \ a_{K2} \ a_{K3} \ a_{K4} \ .... a_{Kn} * 
 a_{K1} \ * \ a_{K2} \ a_{K3} \ a_{K4} \ .... a_{Kn} * a_{K1} \ a_{K1} \ a_{K2} \ * \ a_{K3} \ a_{K4} \ .... a_{Kn} * a_{K1} \ a_{K2}
```

 $a_{K1} a_{K2} a_{K3} a_{K4} \dots a_{Kn} ** a_{K1} a_{K2} a_{K3} a_{K4} \dots a_{Kn}$

Последняя строка обозначает останов удваивающей процедуры по достижении одним маркером другого.

Если этот маркер принадлежит алфавиту A, "*" = a_i , то отличить сам маркер от символов удваиваемого слова невозможно. Поэтому маркер — это внешний по отношению к алфавиту A символ. Доказана теорема.

Teopema 5 (теоpema Нагорного, о необходимости внешних символов для удвоения слов в алфавите). Для построении алгоритма для удвоения слов в некотором конечном алфавите A необходим по крайней мере один внешний по отношению к A символ. \square

Основная прикладная интерпретация этого результата, описанная в [112], [101], [113],— невозможность формализации процесса отражения действительности (содержащей и самого человека) в сознании человека ¹².

Интерпретация теоремы

Интерпретация теоремы Нагорного такова. Процесс отражения действительности требует удвоения образа действительности (см. рис. 2), но удвоение для отражения необходимо для всего этого образа, так что внешних символов, по отношению к этому образу, не имеется, следовательно, по теореме 5 отражение неалгоритмизуемо. То есть процесс отражения действительности невозможно представить в виде вы-

В аналогичных теоремах, предшествующих теореме Нагорного, предполагалось, ито эти маркеры — разные симроны (пля управрания слова требовани пра симрона

что эти маркеры — разные символы (для удваивания слова требовали два символа вне исходного алфавита), Нагорный сократил требуемое количество внешних по отношению к исходному алфавиту символов до одного.

¹² Рукопись идеи этого доказательства была случайно найдена среди архивных бумаг автора.

полнения некоторого алгоритма. На это же, с другой стороны, указывает и непредикативность высшего, 6-го, уровня отражения действительности в сознании человека. Это означает, что всё, что следует из структуры отражения действительности в сознании человека (вертикальная 6-ти уровневая структура информационных систем и прочее, см. главу 1), также неалгоритмизуемо, не является результом действия каких-либо алгоритмов. Поэтому наличие такой структуры принимается как данность не только из созерцательных соображений, изложенных в главе 1, но и ввиду невозможности получить основания такого структурирования, как показано выше (алгоритмически), иначе, чем созерцательно.

§11. Непроецируемость на пространство меньшей размерности.

Пусть имеется 2-мерное пространство, и в нём имеются некоторые области со сложной топологической структурой, например круг, см. рис. 5. Тогда очевидно, что спроецировать из 2-мерного пространства в

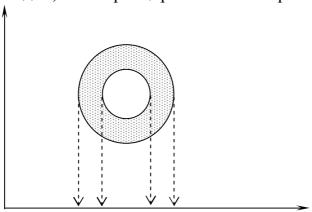


Рис. 5. Непроецируемость с сохранением топологической структуры

одномерное его подпространство этот круг, с сохранением топологической структуры (связности и наличия внутренней "дырки"), невозможно. Рассуждения для трёхмерного пространства и проекций на его одно-и 2-мерные подпространства аналогичны. Имеется теорема, формулировка которой в минимально необходимом случае такова.

Teopema 6 (о непроецируемости на пространство меньшей размерности). В общем случае области 3-мерного пространства не проецируемы с сохранением топологической структуры на его подпространства меньшей размерности. 13 \square

_

 $^{^{13}}$ Доказательство этой теоремы для случая $^{n-1}$ пространства, где $^{n-1}$ натуральное,— очевидно, но выходит за рамки дальнейшего изложения материала.

Глава 3. Конструктивные теоремы.

Изложенные выше ограничительные теоремы указывают на ограничения в применимости математических методов, но не дают оснований для построения метода управления качеством. Конструктивные теоремы тоже своего рода ограничительные утверждения, но они позволили обосновать внесение порядка в процесс управления ¹⁴.

§12. Теорема о размерности пространства состояний.

Подробно теорема о не более чем трёхмерности пространства с ориентированными осями описывается в книге [109], см. также [98]. Для дальнейшего изложения достаточно интуитивного представления о

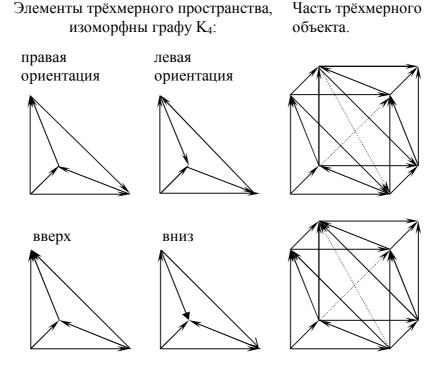


Рис. 6. Структура порядка трёхмерного пространства

множествах и упорядоченных структурах.

Рассмотрим трёхмерные пространства. В трёхмерном объекте возможны ориентации: "левая" и "правая" — по нижней ориентирующей плоскости (без циклов, см. теорему о стягивании циклов); "вверх" и "вниз" (без циклов). При этом плоскости, секущие куб по диагоналям

_

¹⁴ Конечно, можно было обойтись и без этих обосновывающих теорем, сразу решая задачи управления качеством по наитию (как в изложенном далее бытовом примере), можно также обойтись по наитию и без описания вертикальной структуры информационной системы, опять же по наитию, однако обоснования необходимы не для того чтобы обосновать то, что так можно решать задачу, а для того, чтобы обосновать, что иначе, чем она решаема её решать нельзя.

противоположных сторон, не являются ориентированными¹⁵, т. е. координатные оси в таком ориентированном пространстве заданы однозначно (ориентирующие векторы не являются координатными). Объект, содержащий всё трёхмерное пространство,— несамопринадлежащ.

Вышеизложенным показано свойство неоднозначной ориентируемости двухмерных объектов внутри трёхмерных пространств.

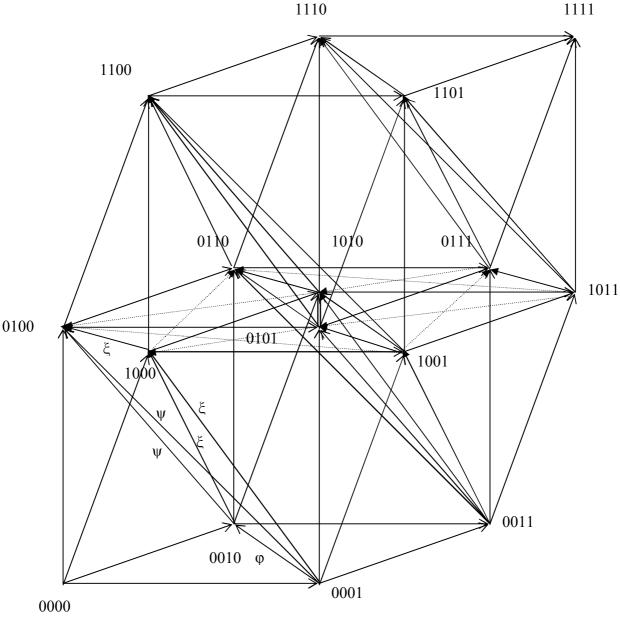


Рис. 7. Фиктивное 4-мерие, противоречие между 0101 и 1010

Теорема 7. В М совершенно однозначно ориентировано лишь

¹⁵ Если бы это было, то ориентация секущей, по диагонали ориентирующей основание куба плоскости, построенная по ориентациям сторон куба, была бы неоднозначна (что и показано на рис. 6, 7 пунктирными линиями).

2-мерное пространство (плоскость).

Доказательство очевидно, см. на рис. 6 ориентацию плоскости, пересекающей основание куба по диагонали.

—

Рассмотрим четырёхмерное пространство.

Ограничение размерности

Основная теорема об ограниченности размерности полностью упорядоченных ориентированных самоподобных объектов (пространств) трёхмерием в теории с самопринадлежностью.

Теорема 8 (о размерности). Пространства с ориентируемыми друг относительно друга осями не более чем трёхмерны (т. е. четырёхмерие — неориентируемо).

Доказательство (изложенное кратко). Как и в трёхмерных пространствах, так и в четырёх- и более мерных пространствах не имеется однозначной ориентации двухмерных подпространств, что проверяемо непосредственным построением (см. рис. 7)¹⁶. На рис. 7 — попытка изображения элемента четырёхмерного пространства (четырёхмерного куба) с нанесением линий ориентации граней всех кубов.

Легко заметить 17 , что грани куба (с вершинами 1000, 1001, 0011, 0001, 0100, 0110, 0111, 1101) ориентированы неоднозначно, например, линия $1000-0110^{18}$ и линия $0100-1010^{19}$ пересекаются, как и в случае трёхмерных пространств.

Однако при попытке полного построения ориентирующих составляющих четырёхмерного пространства и его трёх- и двухмерных подпространств обнаруживается, что в плоскости (1000, 1010, 0111, 1101) ориентирующие линии (объекты) получаются направленными навстречу друг другу от вершины 1010 к вершине 0101 и от вершины 0101 к вершине 1010^{20} , на рисунке эти линии выделены двойной линией ($\|$), поскольку отношение принадлежности однонаправлено, т. е. если $A \in B$ (и $A \neq B$), то $B \notin A^{21}$, такой двунаправленной линии (двунаправленной нити с принадлежностью объектов в ту и в другую сторону) не может быть по определению отношения принадлежности (противоречие), сле-

¹⁹ Проекция ориентаций в плоскости 0010–1000 и 0110–1100.

 $^{^{16}}$ 4-координатный "вектор" ориентирован "векторами", направленными от имевшихся 3-координатных "векторов" к новому — 4-му.

¹⁷ В трёхмерной модели, построенной, например, в "Автокаде", при объёмном вращении (см. рис. 6).

¹⁸ Проекция ориентаций в плоскости 1010–1100 и 0010–0100.

²⁰ Линии пересечения плоскостей, построенных на уже ранее построенных ориентирующих прямых, с означенной плоскостью.

²¹ Не может быть, чтобы $A \in B$ и $B \in A$ (тогда B = A, противоречие с начальным условием $B \neq A$).

довательно, показанный на рисунке объект не существует (как и \varnothing). \square Из изложенного следует, что четырёхмерное пространство — неориентируемо полностью 22 .

Технологическая интерпретация

Любая химическая реакция (химический процесс) вида $A + B \rightarrow C + D$

характеризуется 3-мя параметрами: 1. соотношение масс реагирующих веществ (материальный баланс), 2. скорость реакции (кинетический баланс), 3. энергия, выделяемая или поглощаемая при реакции (энергетический баланс). Таким образом, состояние системы (реакции, процесса) описывается в 3-х мерном пространстве: 1. отклонение дозировок веществ от стехиометрии процесса, 2. отклонение действительной скорости реакции от теоретически расчетной, 3. коэффициент полезного использования энергии на реакцию (или КПД использования энергии реакции). Этого 3-мерия достаточно для описания особенностей процесса. В дальнейшем приложение метода управления качеством для разных групп процессов отличается тем, какой из параметров (материальный, кинетический или энергетический баланс) принимается управляющим параметром.

Интерпретация в методе управления качеством

При интерпретации теоремы о размерности рассмотрены особенности управления качеством физико-химического технологического процесса. Описан общий подход к управлению качеством химико-технологических процессов путём представления их параметров в трёхмерном пространстве состояний.

Установлено, что при наличии одного главного параметра качества процесса и одного главного параметра управления пространство состояний химико-технологического процесса трёхмерно. Это условие является как необходимым, так и достаточным для преставления состояния химико-технологического процесса.

_

²² Практическое приложение эта теорема имеет при истолковании (интерпретации) экономико-математических моделей в плане привязки меры стоимости к трёхразмерной материальной характеристике системы (вещной, временной, энергетический), любой 4-й фактор (например, деньги, оторванные по содержанию от упорядочивающих материальных факторов) дезориентирующ, т. е. денежная мера практически привязываема к 3 упомянутым факторам.

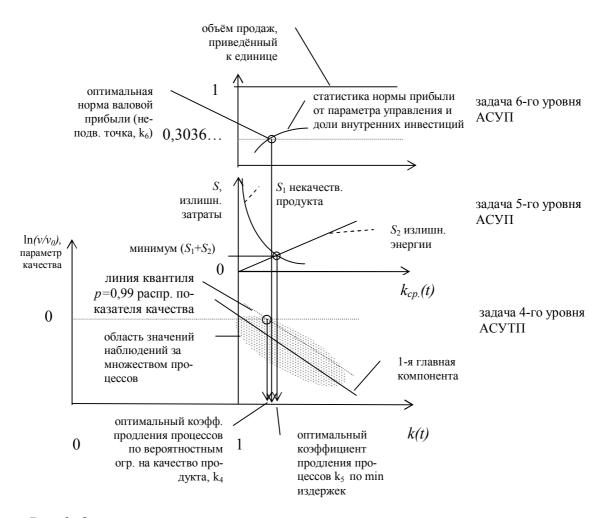


Рис. 8. Оптимизационная статистическая диаграмма управления

Необходимость трёхмерности следует из технологического смысла задачи управления ввиду того, что пространство состояний соответствует трёхмерности параметров процесса: 1) мера качества процесса; 2) параметр управления; 3) экономический параметр.

Достаточность трёхмерности (по вышедоказанным теоремам) следует из того, что математический аппарат описания пространства состояний химико-технологического процесса позволяет, ввиду взаимной упорядоченности вышеуказанных подпространств состояний процесса, оперировать с не более с чем 3-мерными пространствами (пример полной оптимизационной диаграммы в пространстве состояний см. на рис. 8).

Решение задачи управления при фундаментальной обоснованности трёхмерности пространства состояний системы: 1) параметр качества продукта (подпространство X); 2) параметр управления (подпространство Y); 3) экономический параметр (подпространство Z), сводится (при приложении результатов теории измеримости [119] $(X \xrightarrow{f} Y) \xrightarrow{g} Z$, отображение g измеримо, если измеримо f) к построению оптимизаци-

онной статистической диаграммы в трёхмерном пространстве состояний (см. рис. 8, на примере процесса отгонки), вычислению норм подпространств X, Y, Z,— $\|\cdot\|_X$, $\|\cdot\|_Y$, $\|\cdot\|_Z$, перенормировке наблюдений соответственно вычисленных норм, а затем определению по статистической обработке данных оптимума — неподвижной точки оператора управления.

Отображение f — это отображение подпространства параметра качества X в подпространство параметра управления Y, отображение g — это отображение отображения f в подпространство экономического параметра. Оптимум управления находится как управление при получении продукта, соответствующего норме качества с заданной вероятностью при минимальных издержках. В этом заключается основное содержание метода пространства состояний управления качеством химикотехнологических процессов.

Метод пространства состояний управления качеством химикотехнологических процессов является устойчивым вследствие свойств устойчивости применяемых статистических методов и приложим к процессам, допускающим выделение одного определяющего параметра качества и одного определяющего параметра управления.

Результаты приложения теоремы о размерности к построению информационных систем управления технологическими процессами описаны в [81; 85; 102; 123; 105; 132] и далее.

Вертикальная 6-уровневая структура информационных систем управления [80; 82] связана с гносеологическими основаниями, указанными в главе 1.

§13. Теорема о суперпозициях.

Показано, что оператор суперпозиции $(X_1 \rightarrow Y_1) \rightarrow Z_1$ задаёт ориентацию пространств (в том случает если эти пространства одномерны), из чего по теореме об ограничении размерности ориентированных пространств следует, что возможна суперпозиция при не более чем трёх. связанных оператором суперпозиции пространствах. Этот результат распространён и на случай изначальных (неориентированных) пространств произвольной размерности $(X_n \rightarrow Y_k) \rightarrow Z_m$. В прикладном смысле основной результат является обоснованием метода пространства состояний управления качеством сложных химико-технологических процессов.

$$(X \xrightarrow{\varphi} Y) \xrightarrow{\psi} Z \tag{4}$$

неоднократно описывались (см., например, работы [118], [119]).

Вопрос, возможно ли продолжение вложения суперпозиций вида

$$((X \xrightarrow{\varphi} Y) \xrightarrow{\psi} Z) \xrightarrow{\xi} W \tag{5}$$

и т. д., подлежит разрешению. Далее на основании приложения теоремы об ограничении размерности ориентированных пространств (их не более чем 3-мерности, [109], [98]), показано, что допустимы суперпозиции только вида (4), а суперпозиции вида (5) и большей вложенности — невозможны.

Суперпозиция одномерных пространств

Пусть пространства, на которых задан оператор суперпозиции, одномерны и имеют общее начало координат. Рассмотрим оператор суперпозиции

$$((X_I \xrightarrow{\varphi} Y_I) \xrightarrow{\psi} Z_I) \xrightarrow{\xi} W_I . \tag{6}$$

Тогда отображения φ , ψ , ξ задают ориентации этих пространств (см. рис. 9, 10, 12).

Рассмотрим структуру ориентированного 4-мерия подробнее (см. рис. 7). Элементарный 4-мерный объём, или объём, задаваемый на базисных векторах, с учётом ориентации,— это ориентированный 4-мерный куб [109], [98], (см. рис. 7). Отображения задают ориентации граней куба и секущих плоскостей.

Как указывалось ранее [109], [98] (выше, в теореме об ограничении размерности ориентированного пространства), 4-мерная ориентация невозможна, ввиду того, что между вершинами 0101 и 1010 имеется противоречивая ориентация (одновременно в два направления). То есть

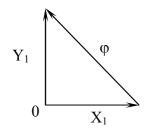


Рис. 9. Отображение φ задаёт ориентацию 2-мерия

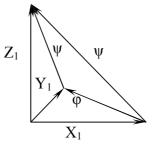


Рис. 10. Отображения ф и ψ ориентируют 3-мерие

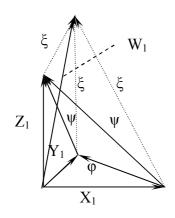
отображение ξ в (6) не может иметь места. Из этого следует, что суперпозиция (6) для 4-х пространств — невозможна. Доказана теорема.

Teopema 9 (об ограниченности суперпозиций для одномерных пространств). Для одномерных пространств X_i , имеющих общее начало координат в суперпозиции отображений φ_i ,

$$(((X_1 \xrightarrow{\varphi_1} X_2) \xrightarrow{\varphi_2} X_3)...)^{\varphi_{n-1}} X_n \quad n \leq 3 ;$$

иная формулировка теоремы:

Теорема 9' (о том же). Для одномерных пространств, имеющих



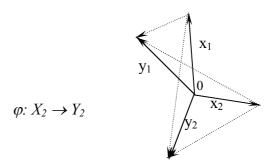


Рис. 11. Отображение φ задаёт ориентацию между 2-мерными пространствами X_2 и Y_2

Рис. 12. Отображения φ , ψ , ξ ориентируют 4-мерие

общее начало координат, суперпозиция $((X_I \xrightarrow{\varphi} Y_I) \xrightarrow{\psi} Z_I) \xrightarrow{\xi} W_I$ невозможна, возможна суперпозиция только для 3-х пространств, например, $(X_I \xrightarrow{\varphi} Y_I) \xrightarrow{\psi} Z_I$. \square

Суперпозиция многомерных пространств

Если пространства, на которых задан оператор суперпозиции, многомерны, то рассуждения аналогичны.

Например, пусть даны два 2-мерных пространства с общим началом координат X_2 и Y_2 , тогда ориентация их друг относительно друга задаётся отображением $\varphi: X_2 \to Y_2$, как указано на рис. 11 (x_1, x_2, y_1, y_2 — базисные вектора соответствующих пространств). Базисные вектора неориентированных пространств X_2 и Y_2 на рис. 11 можно поменять местами — ориентация никак не изменится; ориентация, задаваемая отображением φ , действует между пространствами.

Легко видеть, что если задаётся суперпозиция отображений на пространствах произвольной (ненулевой) конечной размерности

$$((X_n \xrightarrow{\varphi} Y_k) \xrightarrow{\psi} Z_m) \xrightarrow{\xi} W_r \tag{7}$$

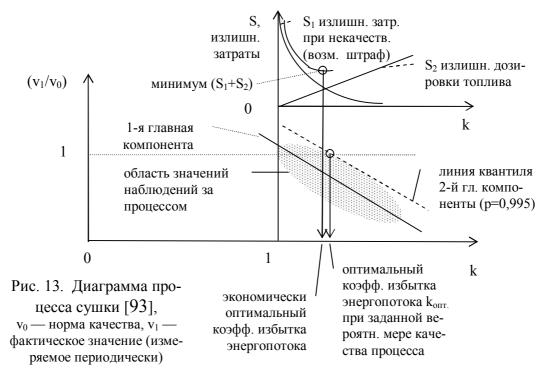
(где $n, k, m, r \in \mathbb{N}$), то элементарный объём, выстроенный на базисных векторах этих пространств, будет содержать ориентированное 4-мерие (ориентированный 4-мерный куб), аналогично изображённому на рис. 7. Поэтому, как при рассуждениях в доказательстве теоремы 9, из невозможности ориентированного 4-мерного куба следует невозможность суперпозиции на 4-х пространствах. Доказана следующая теорема.

Teopema~10~(об ограниченности суперпозиций). Для пространств $X_i~($ произвольной конечной размерности, отличной от 0), имеющих общее начало координат в суперпозиции отображений $\varphi_i~,$

$$(((X_1 \xrightarrow{\varphi_1} X_2) \xrightarrow{\varphi_2} X_3)...) \xrightarrow{\varphi_n} X_n \quad n \leq 3$$
;

иная формулировка теоремы:

Tеорема 10' (о том же). Для пространств X_n , Y_k , Z_m , W_r , размерно-



сти которых конечны и отличны от 0 (n, k, m, $r \in N$), имеющих общее начало координат, суперпозиция $((X_n \xrightarrow{\varphi} Y_k) \xrightarrow{\psi} Z_m) \xrightarrow{\xi} W_r$ невозможна, возможна суперпозиция только для 3-х пространств, например, $(X_n \xrightarrow{\varphi} Y_k) \xrightarrow{\psi} Z_m$. \square

Приложение результата

Доказанными теоремами обосновывается метод пространства состояний управления сложными химико-технологическими процессами, неоднократно описанный в его приложениях ранее [114], [93], [79].

При наличии одного главного параметра качества и одного главного параметра управления задача оптимизации сводится к достижению минимума дополнительных издержек на процесс, при заданных вероятностных ограничениях на качество процесса.

Пространство состояний таково: X — параметр качества, Y — параметр управления, Z — экономический параметр. На пространствах (в стандартном случае одномерных) имеется суперпозиция $(X \xrightarrow{\varphi} Y) \xrightarrow{\psi} Z$, найти оптимум (минимум издержек, определяемый отображением ψ) возможно только при определённости отображения φ , для чего применяются стандартные статистические методы.

Наличие теоремы 10 для многомерных пространств фактически обосновывает возможность распараллеливания задач управления (при нескольких параметрах качества и соответствующих им параметрах управления), при этом для каждой подзадачи пространство состояний

также 3-мерно, см. пример такого распараллеливания задач в [114].

Пример оптимизационной диаграммы метода пространства состояний приведён на рис. 13 (из [93]).

Описанные результаты об ограниченности последовательности суперпозиций отображений аналогичны результатам, относящимся к допустимости вращений в не более чем 3-мерном пространстве. Это ещё один ограничительный результат, следующий из теоремы об ограниченности размерности пространств с ориентированными друг относительно друга осями.

§14. Теорема размерности и 4-раскрашиваемость плоских графов.

Минимальный "элемент", образующий пространство размерности n, гомологичен (изоморфен) графу K_{n+1} (полному графу на n+1 вершинах).

По теореме о размерности имеются не более чем трёхмерные вполне упорядоченные структуры, образующий их минимальный элемент изоморфен графу K_4 , граф K_4 — плоский, это значит, что фрагмент трёхмерного пространства (лежащий в пределах координатных осей — "1/8" часть трёхмерного пространства) допускает плоскую проекцию на раскрашиваемую плоскую область: координаты точки задаются относительной цветностью (1, 2, 3 цвета), величиной обратной интенсивности (яркости) задаётся удаление от начала координат — начало координат изображается точкой белого цвета максимальной яркости (при удалении от начала координат добавляется 4-й цвет — "чёрный").

Для четырёхмерных пространств (с образующим графом K_5) такая плоская проекция невозможна (таким образом, вышеозначенный результат связан с теоремой о 4-раскрашиваемости плоских графов [84]).

Однако проекция трёхмерной области на плоскую область не сохраняет непрерывности отображения, таким образом, доступными для наглядного созерцания на плоскости остаются только двухмерные зависимости (см. теорему 7).

§15. Теорема о непротиворечивости базовой теории.

Применение результатов теории множеств для обоснования трёх-мерности пространства состояний допустимо ввиду непротиворечивости теории множеств (подробно непротиворечивость этой непредикативной теории рассмотрена в [109]). Здесь достаточно теоремы о непротиворечивости. Предварительно необходима теорема о недополнимости подмножества в M.

Teopema 11 (о недополнимости объекта в M). M — множество всех множеств. Для любого существующего объекта в M не существует дополнения до M.

Доказательство. Пусть A объект, $A \in M$, возможны случаи:

- 1. $A = \emptyset$, тогда A не объект (\emptyset означает несуществование, но не существующий объект).
- $2. \ A \notin \emptyset$ и $M \notin A$. Попытаемся построить дополнение B к A в M, т. е. попытаемся собрать все объекты, не принадлежащие A, "внешние" по отношению к A, в одно множество B.
- $B = \{[x] \in M \mid x \in \emptyset \text{ или } x \notin A\}, M \notin A,$ значит, $M \in B$, т. е. B = M (по транзитивности принадлежности для самопринадлежащих объектов, $M \in M$) и $A \in B$. Дополнение "поглощает" дополняемый объект. Попытка неудачна. Утверждение теоремы доказано.
- 3. A = M, очевидно, $B = \{[x] \in M \mid x \in \emptyset \text{ или } x \notin A\} = \emptyset$, что означает несуществование (отсутствие) дополнения к M в M. \square

 $\it C$ ледствие. Множество всех объектов $\it M$ невозможно представить в виде объединения двух непересекающихся непустых объектов. $\it M$ неделимо на части.

Teopema 12 (о непротиворечивости). Пусть M — множество всех множеств. Тогда совокупность высказываний, описывающих существующие в M объекты, непротиворечива.

Доказательство

Если высказыванием L описан объект A, то отрицание этого высказывания описывало бы дополнение B к объекту A в M, но по теореме о недополнимости это невозможно, следовательно, высказывания об объектах из M непротиворечивы. 23 \square

Существует, однако, ограничение: эти высказывания об объектах из M не могут быть получены формальным выводом из некоторых аксиом.

т. е. такой, что $\forall \alpha < \beta$, $2^{\alpha} < \beta$, то в теории множеств существует внутренняя модель самой теории множеств, что позволяет доказать непротиворечивость теории множеств в аксиоматике Цермело-Френкеля (ZF), однако существование недостижимых кардиналов не следует из аксиоматики ZF [17], поэтому рассуждения о недостижимых кардиналах в теории множеств без самопринадлежности более гипотезы, чем доказуемые утверждения. При рассмотрении теории множеств с самопринадлежностью выполняются условия, аналогичные свойствам недостижимых кардиналов, и доказуема непротиворечивость теории.

В теории множеств с самопринадлежностью множество всех множеств M совпадает со множеством всех своих подмножеств, но не совпадает со множествами подмножеств любого своего собственного подмножества — Exp(M)=M, но $\forall A \subset M$ $(M \not\in A)$ $Exp(A) \not= M$, $(M \not\in Exp(A))$. То есть утверждение, аналогичное утверждению о недостижимом кардинале, выполнено. Однако непротиворечивость теории множеств с самопринадлежностью доказывается из несколько других соображений, что описано выше.

²³ Известно [17, с. 154–155], что если существует сильно недостижимый кардинал β , т. е. такой, что $\forall \alpha < \beta$, $2^{\alpha} < \beta$, то в теории множеств существует внутренняя модель

Таким образом, используемая теория множеств непротиворечива. С другой стороны, теорема об ограниченности размерности по той же самой схеме доказательства доказываема и без погружения её в теорию множеств, поскольку в доказательстве используются сведения только о взаимной ориентации осей (одномерных подпространств) пространства, и то что одновременная ориентация в два направления невозможна.

§16. Основное логистическое уравнение и задача управления.

Как было сказано выше, место задачи управления качеством — на 4-м уровне информационной системы. Существование решения этой задачи определяется существованием решения задачи управления на более высоких уровнях.

На 6-м уровне, определяющем ценовую политику и отношение себестоимости к цене, решение задачи управления (неподвижная точка), при соответствии потребительских свойств продукции системе ценностей (потребностей), существует и определяется основным логистическим уравнением в его интерпретации (см. подробнее [115], [94]). Решение этого уравнения $x = I - x^X$ определяет оптимальную норму прибыли.

Далее, на 5-м уровне, существует минимум затрат, соответствующий выпуску продукции приемлемого качества.

На 4-м же уровне определяется значение параметра управления, соответствующее норме качества.

Технологические данные для решения задачи собираются на первых 3-х уровнях системы управления.

Таким образом, динамически определяемая статистическими методами неподвижная точка управления существует на 4-м уровне управления ввиду наличия таковой на 6-м уровне управления.

§17. Пространство состояний и онтологические основания.

Представление пространства состояний связано с онтологическими основаниями следующим образом. Параметр качества — вещественно-материальная характеристика процесса (заданная постоянная величина); параметр управления — функция, меняющаяся во времени в зависимости от дополнительных параметров процесса; экономический параметр содержит понятие стоимости, которое является социально определяемой величиной.

Таким образом, прикладная технологическая интерпретация теоремы о размерности согласуется и с исходными онтологическими основаниями.

Часть 2. Приложения метода пространства состояний

Глава 4. Системы управления качеством технологических процессов.

§18. Примеры бытовых процессов.

Легко представить процесс сложной химической технологии, используемый в быту, например, процесс варки картофеля. Параметр качества — определённая мера твёрдости картофеля. Модель изменения твёрдости картофеля построить невозможно ввиду сложности процесса, но даже если бы и имелась таковая модель, то применить её было бы невозможно ввиду неопределимости начальных условий: картофель весьма различен от клубня к клубню и по глубине клубня, измерить все его параметры практически невозможно. Остаётся организовать процесс измерений твёрдости картофеля в ходе его варки (протыкая вилокой).

Итак, 1) параметр качества — твёрдость картофеля, 2) параметр управления — время варки, 3) экономический параметр — сумма затрат на подогрев и упущенной выгоды от недоваренного картофеля.

Процесс останавливается при достижении определённой твёрдости (в заданном вероятностном интервале допустимой твёрдости).

Аналогично этому процессу строятся и системы управления химическими производствами.

§19. Процесс сушки.

Рассмотрим пример: информатизация процесса сушки. Экономия энергии при сушке является одной из важных технологических задач [20]. Изложение следует работе автора [86]. Описание постановки задачи заключается в описании общей структурной организация 6-ти уровней информационной системы технологического процесса сушки хлорида калия, описании содержания решения задачи статистически оптимального управления процессом сушки изменением теплопотока в установку в завистмости от влажности исходного продукта при жёстких ограничениях на качество процесса (предельно допустимую влажность готового продукта). Подробно собственно технологическая часть процесса сушки карналлита описана отдельно, часть автоматизации также описана отдельно [14].

Построение первых трёх уровней АСУТП сложными технологическими процессами в достаточной мере хорошо проработано и является стандартной задачей инженерной квалификации [14] [22]. На аппаратных же уровнях надстраиваемы уровни информационные, позволяющие решать задачи управления качеством процесса (готового продукта). Разработка информационной системы управления качеством со-

стоит из двух частей: а) фундаментальное обоснование метода пространства состояний, привязка метода к конкретной задаче управления постановкой задачи и построение пространства состояний процесса; б) проверка метода на имитационной модели, наборе опытных данных; в) этап внедрения.

Пример описания аппаратной части управления процессом сушки приведён в [59]. Рассмотрим далее информационные уровни.

Описание структуры уровней управления

Структура уровней системы управления производством в части информатизации, для процесса сушки, такова (данное структурирование систем имеет гносеолого-психологическое обоснование, см. главу 1).

- 1. На первом уровне (средства измерения, управления) измерение материального потока веществ в установку (влажного карналлита), измерение влажности исходного продукта (периодическое), измерение потоков газа и воздуха в печь для определения, по составу газа, меры теплопотока в сушильную установку, измерение температуры отходящих газов, измерение прочих параметров, измерение влажности готового продукта (периодическое).
- 2. На втором уровне (контроллеры) обеспечение заданного материального потока влажного карналлита, стабилизация потока газа и воздуха, регулирование потока газа по конечной температуре оттока газов из сушильной установки; регулирование подачи добавок в готовый продукт.
- 3. На третьем уровне (база данных ПЭВМ АРМ) хранение в оцифрованном виде результатов измерений технологических параметров и результатов анализов, отображение данных, управление контурами регулирования оператором с ПЭВМ.
- 4. На четвёртом уровне (решение задачи оптимизации) оптимизация величины теплопотока в установку по снижению материальных затрат топлива при ограничениях на качество готового продукта (влажность), для получения продукта заданного качества при минимальных издержках (краткое описание решения задачи см. ниже).
- 5. На пятом уровне по учёту материальных потоков (с учётом данных 4-го уровня об избытке теплопотока) планирование потребности закупок (по текущему отчётному периоду) на следующий отчётный период топлива и прочих веществ при определяемых за истекший отчётный период характеристиках материального потока исходного продукта.
- 6. На шестом уровне данные по учёту и планированию являются частью данных для общего планирования производства при составлении краткосрочных и долгосрочных прогнозов, учитывающих изменчивость

цен на ресурсы и цены денег, с нормированием доли прибыли и определением доли возможных капиталовложений.

Описание процедуры наблюдения за процессом (уровень 4)

Фундаментально-математическое обоснование метода пространства состояний кратко описано выше. Процедура оптимизации примерно такова. Требуется обеспечить наблюдаемость в текущем времени физико-химических параметров процесса сушки:

- влажности готового продукта (оцифровкой данных анализов),
- и отношения меры теоретических затрат тепла на процесс сушки сырого продукта (определяемым приближённо по влажности исходного продукта, т. к. основные теплозатраты процесса сушки это теплозатраты на испарение воды, затраты на теплопотери относительно постоянны, затраты на нагрев воздуха и хлорида калия незначительны, но также учитываемы в более сложной модели) к действительным теплозатратам, определяемым по расходу топлива.

Пусть $m(\kappa ap \mu a \pi n u m a, H_2 O)(t)$ — мера массопотока сырого продукта,

 $v_1(H_2O)$ — влажность сырого продукта (измеренная величина),

 $v_2(H_2O)$ — влажность готового продукта (измеренная величина),

 $v_0(H_2O)$ — верхняя граница допустимой влажности готового продукта (заданная величина величина),

 t_n — период взятия проб на анализы (ориентировочно 2 часа), $m(mon \pi u sa)(t)$ — мера массопотока топлива в установку,

Q(monлива) — мера теплоты сгорания единицы топлива (в случае сложного состава топлива (природный газ и т. п.) при возможности выполнения покомпонентного анализа топлива теплота сгорания топлива определяема стандартным способом),

 $C(H_2O)$ — мера теплоты испарения воды,

тогда 1-я наблюдаемая величина такова: отношение меры фактической влажности продукта к мере предельно допустимой влажности (характеристика качества процесса),—

$$(v_2/v_0)(t_i) = \frac{v_2(H_2O)(t_i)}{v_0(H_2O)(t_i)} ,$$
 (8)

наблюдаемая для каждого момента времени взятия проб анализа готового продукта (в более точной модели: логарифм отношения меры фактической влажности продукта к мере предельно допустимой влажности

$$-- \ln \left(v_2 / v_0 \right) \left(t_i \right) = \ln \frac{v_2(H_2O) \left(t_i \right)}{v_0(H_2O) \left(t_i \right)} . \tag{9}$$

Вторая величина (характеристика излишних материальных издержек) — это отношение меры фактических теплозатрат на процесс

сушки, определяемых, в 1-м приближении как интеграл от произведения функции меры материального потока топлива на теплоту сгорания топлива за период времени между взятием проб анализов (значения моментов времени взятия проб фиксированное, период равномерный, небольшие действительные отклонения сглаживаются статистической процедурой, либо в более точной модели, подлежат оцифровке значения меры времени взятия проб), к мере теоретически минимальных затрат на процесс, определяемых как интеграл произведения массопотока сырого вещества на меру влажности и на меру теплоты испарения воды за тот же период времени:

$$k = (q_{1}/q_{0})(t_{i}) = \frac{\int_{t_{i}-t_{n}}^{t_{i}} m(mon\pi u \epsilon a)(t) \cdot Q(mon\pi u \epsilon a)(t) dt}{\int_{t_{i}-t_{n}}^{t_{i}} m(\kappa a p \mu a \pi \pi u m a, H_{2}O)(t) \cdot v_{1}(H_{2}O)(t) \cdot C(H_{2}O) dt}, \qquad (10)$$
где $t_{i-1} = t_{i}-t_{n}$.

В первом приближении нижняя (оптимальная) граница передозировки вещества (топлива) определяется при заданной вероятностной мере требуемого качества процесса как проекция на ось меры передозировки (ось k) точки пересечения предельно допустимой меры качества процесса ($\ln(v/v_0) = 0$) с линией квантиля (заданной вероятностной меры) 2-й главной компоненты (о методе главных компонент см. подробнее [4], [65]), наблюдаемого 2-мерного распределения результатов из-

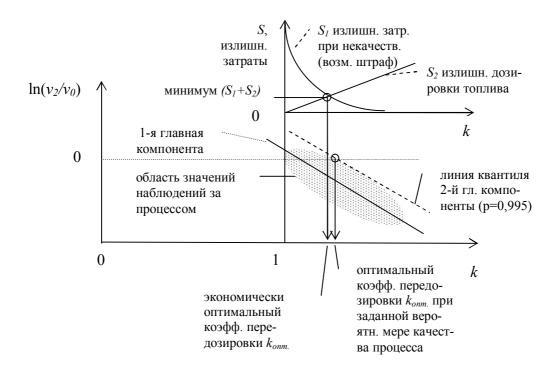


Рис. 14. Оптимизационная диаграмма процесса сушки

мерений параметров качества процесса (меры передозировки и меры качества) (см. рис. 14),

v — наблюдаемая мера качества процесса, v_0 — предельно допустимая норма качества процесса. (В том случае, если мера качества процесса является нежёсткой, если некачественный процесс не влечёт тяжких экологических последствий, оптимизационная процедура минимизирует стоимостные характеристики, определяемые на 5-м уровне информационной системы, — минимизирует общие издержки (см. рис. 14); функции S_1 и S_2 определимы статистически).

Процедура коррекции меры теплопотока в установку по характеристикам качества процесса заключается в поддержании избыточного теплопотока, с заданной вероятностью обеспечивающего получение продукта допустимого качества (вне жёсткой зависимости от температуры оттока газов из установки, этот контур управления требуется только в начальный пусковой период и для отслеживания возможных возмущений, отклонений от равномерности процесса), т. о. оптимальное управление процессом сушки изменением величины теплопотока, для обеспечения получения качественного продукта в кратчайшей форме описано.²⁴

Пример работы алгоритма, протестированный на модели, приведён на следующем рис. 15.

Аналогичным образом выстраиваемы системы управления многими технологическими процессами, причём для каждого особенного процесса задача 4-го уровня, уровня оптимизации,— особенна; однако информационная структура построения химико-технологических систем в достаточной степени общезначима и однозначна, что гораздо упрощает выдачу технического задания на проектирование и программи-

 $^{^{24}}$ Отметим, что параметр управления процессом сушки — сложная величина. В первом приближении параметр управления Y — это мера энергопотока $E_I(t)$ в систему, однако массопоток продукта в систему m(t) — не постоянен, значит, во втором приближении — это отношение меры энергопотока к массопотоку продукта в установку, $E_I(t)$ / m(t), однако и влажность поступающего продукта — не постоянна, значит, в третьем приближении — это отношение энергопотока к потоку влаги в поступающем продукте, $E_I(t)$ / $(m(t) \cdot v_I(t))$, где $v_I(t) \in [0, 1]$, — относительная влажность поступающего продукта, но в последнем приближении для упрощения отсчёта параметра управления — это отношение поступающего в установку энергопотока к энергопотоку теоретически потребному, для того чтобы всю влагу из продукта испарить, $E_I(t)$ / $E_0(t)$ — это коэффициент избытка энергопотка, на практике чуть больший единицы,

 $E_0(t) = (m(t) \cdot v_I(t)) \cdot ((100 - T_I) \cdot c + h)$, где c— удельная теплоёмкость воды, h— удельная теплота испарения.

рование информационной части промышленно-технологической системы. Примеры: процессы хлорирования титаносодержащих шлаков (определение в текущем времени оптимального материального баланса хлора и шихты), процесс получения формалина (определение в текущем времени оптимального материального баланса метанола и кислорода), процесс флотационного обогащения руд, процесс производства алифатических аминов, процесс вакуумной сепарации титановой губки и т. д. Аналогичный метод применим для информатизации процесса сушки хлорида калия.

Применительно же к конкретным разновидностям процесса сушки решение задачи сушки карналлита в технологическом процессе получения магния, или же решение задачи сушки кирпича в технологическом процессе изготовления кирпича, совершенно аналогичны, оптимизационные диаграммы (рис. 13, 15) одинаковы.

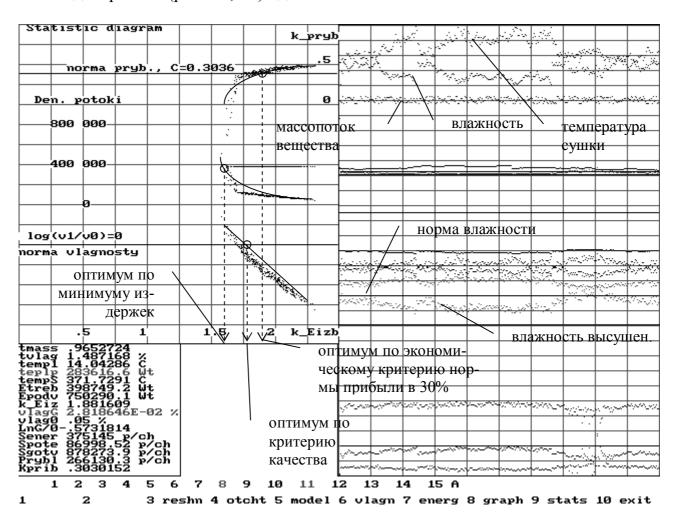


Рис. 15. Функциональные (справа) и корреляционные (слева) диаграммы процесса сушки

§20. Формулировка метода пространства состояний.

Как наглядно видно из примеров, метод пространства состояний управления качеством химико-технологических процессов заключается в выборе пространства состояний системы: 1) параметра качества, 2) параметра управления, 3) экономического параметра; и организации процедуры перенормировки данных о процессе с отображением перенормированных данных в это пространство состояний.

Затем для отыскания оптимума управления (получения продукта заданного качества при минимальных издержках) применяются обычные статистические методы (с учётом принципа малой вариации параметра управления, см. выше с. 68).²⁵

При этом решения задачи управления (на 4-м уровне АСУТП) являются лишь рекомендациями по ведению технологического процесса, выдаваемыми оператору-технологу, контролирующему течение производственного процесса.

Причем для каждого конкретного процесса определение пространства состояний весьма сложная задача, требующая знания предметной области химической технологии.

Далее описываются приложения этого метода к ряду процессов химической технологии.

состояний следует в следующих главах.

_

²⁵ Ввиду вышеприведённых теорем метод пространства состояний, не использующий сведений о функции зависимости управляемых параметров от управления, отличается от известных подходов к управлению (см. напр. [7] [15] [50] [54] [60]), подробное изложение этого — предмет отдельного исследования; более важный в конструктивном плане разбор конкретных примеров приложений метода пространства

Глава 5. Приложения к процессам металлургии титана

В этой главе описаны приложения метода пространства состояний к процессам отдельных технологических переделов производства титана.

§21. Процесс плавки концентратов в рудно-термических печах.

Построение информационной системы управления процессом плавки в рудно-термических печах титановых концентратов основывается на выделении пространства состояний процесса, определении уровней информационной системы и приложении статистических методов для определения оптимума по достижению заданного (с вероятностной мерой) качества.

Химизм процесса

Как практически известно и хорошо описано в литературе [63], [21, с. 25], [9] в первом приближении «основная реакция процесса может быть выражена в следующей форме:

FeO · TiO₂ (концентрат) + C (восстановитель) =

 $= Ti_2O_3$ (шлак) + Fe (чугун) + CO (газы)».

При восстановлении концентрата в процессе плавки важно уменьшение содержания в шлаке железа, что является характеристикой качества процесса (чем меньше в шлаке железа, тем меньше затраты на следующем этапе производства — хлорировании шлака в хлораторе при получении четырёххлористого титана). Для оптимального управления процессом требуется: а) поддерживать оптимальную меру передозировки углерода (относительно стехиометрии процесса), б) получать продукт при минимальных издержках (минимальной длительности и энергоёмкости процесса), в) планировать процесс производства для получения заданного производственным планом количества промежуточного продукта для следующей стадии переработки. Для решения задачи оптимального управления инструментом является информационная система управления процессом.

Уровни информационной системы

Уровни информационной системы (см. описание обоснования в главе 1) с решаемыми на них задачами таковы:

- 1. Измерение параметров процесса: материальных потоков, температур, тока электродов, напряжения, активной и реактивной мощностей (средства измерения и управления); анализ (периодический) сырья, расплава (содержание Fe), готового продукта (содержание Fe).
- 2. Управление локальными контурами, поддержание заданного тока

электродов (активной мощности); оцифровка данных анализов.

- 3. Сбор и хранение результатов измерений в базе данных ПЭВМ АРМ (автоматизированного рабочего места), отображение данных.
- 4. Решение задачи оптимального управления (при обсчёте модели).
- 5. Учёт материальных потоков (контроль за точным исполнением плана), определение экономических показателей производства (чистой материальной себестоимости и т. п.).
- 6. Экономическое прогнозирование на следующий отчётный период (при учёте изменчивости цен на ресурсы, продукт и цены денег) для планирования оптимальной нормы прибыли в 0,3036... от объёма продаж.

Решение задачи оптимизации на 4-м уровне

В 1-м приближении оптимизационные диаграммы таковы (при оптимизации по двум параметрам): 1) минимальная стоимость (длительность, энергоёмкость) процесса, см. рис. 16, 2) оптимальный избыток передозировки восстановителя, см. рис. 17.

При этом функция (экспоненциально регрессионная модель), описывающая содержание железа в расплаве, определима по периодическим (0,5, 1, 2 часа) анализам расплава на содержание железа.

 $v_I(Fe)$ — мера содержания железа в расплаве (периодический анализ и экспоненциально регрессионное приближение функции, см. также [21, с. 106]),

 $v_0(Fe)$ — мера содержания железа в начальном концентрате,

E(t) — энергозатраты на процесс,

 $Q_{\kappa o \mu \mu}$ — масса концентрата, загруженного в печь,

функции S_1 и S_2 вычислимы аналогично вычислению в задаче управления процессом флотации ([78]).

(Возможен и более сложный вариант: расчёт доли содержания железа в расплаве по модели кинетики процесса, учитывающей показания температуры расплава и энергоприток, со статистической коррекцией модельного расчета по факту содержания железа в готовом шлаке: $k_{\kappa opp}(Fe) = v_{meop}(Fe) / v_{\phi a\kappa m}(Fe)$, теоретически расчетная мера умножается на статистически (по множеству процессов усреднённый коэффициент коррекции). Однако метод непосредственных измерений гарантированно точнее).

На необходимость процесса измерений, основанную на теореме

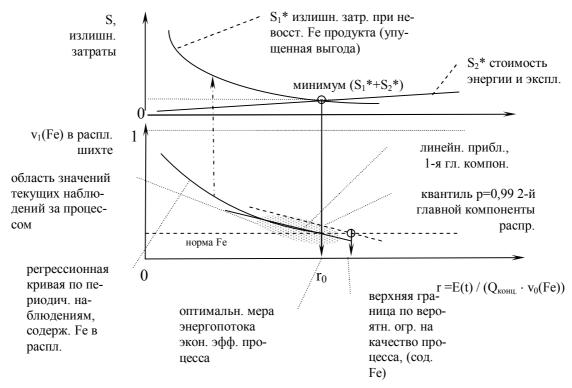


Рис. 16. Диаграмма оптимизации по длительности процессов

об алгоритмической неразрешимости вычисления результатов сложных химико-технологических процессов, было указано при интерптетации теоремы 4.

На рис. 17 оси диаграммы горизонталь — избыток C (относительно стехиометрии процесса, вертикаль — содержание Fe в расплаве в конце процесса, наблюдаемое распределение зависимости конечного содержания Fe от процесса к процессу от меры избытка дозировки C, оптимумы передозировки: в среднем — пересечение 1-й главной ком-

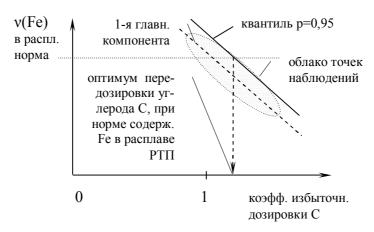


Рис. 17. Схема оптимизации избытка углерода

поненты двумерного распределения с линией нормы содержания Fe; статистически гарантированное качество — пересечение линии нормы содержания Fe с квантилем p=0,95 2-й главной компоненты 2-мерного распределения).

Таким образом, при организации оцифрованного информационного потока данных о процессе, включающем результаты анализов, при использовании простой модели процесса определима оптимальная длительность процесса, позволяющая минимизировать энергозатраты на процесс (см. также [116]).

§22. Процесс хлорирования титаносодержащей шихты.

Описана общая структура системы автоматизации-информатизации технологического процесса хлорирования титаносодержащих шлаков, а также способ оптимизации процесса (соотношений материальных балансов потока дозируемых веществ в текущем времени) по характеристикам качества процесса (периодически анализируемым внутренним состояниям расплава); указаны особенности и ограничения применения матмоделей.

Для снижения потерь продукта и издержек производства процесса хлорирования титаносодержащих шлаков значимо поддержание определённого содержания диоксида титана и углерода в расплаве. Как указано в [9, с. 21]: «химизм процесса хлорирования чрезвычайно сложен и обусловлен многокомпонентным составом шихты и присутствием разных веществ, влияющих на процесс хлорирования», «...технология хлорирования требует постоянного контроля состава шихты и его оперативного корректирования», «использование сыпучей шихты позволяет <относительно> быстро изменять состав хлорируемой смеси по содержанию TiO_2 <в расплаве> и углерода и автоматизировать процесс хлорирования» [там же, с. 27]. «Концентрация хлора оказывает <...> влияние на процесс хлорирования» [9, с. 34].

Потребность информатизации управления соотношениями дозировки компонент заключается в организации сбора статистики результатов анализов расплава относительно состояния параметров дозировки шихты, углерода и хлора, в связи с запаздыванием результатов анализов по отношению к моменту изменения параметра управления, для чего применим известный способ статистически оптимального управления [78], требующий присутствия управляющего субъекта, оператора-технолога, принимающего решение по выбору параметра управления соотносимо с рекомендациями, выдаваемыми информационной системой. Задача построения информационной системы управления процессом хлорирования, как частная, решаема посредством общего способа решения таких задач при использовании предварительного выделения структуры

соподчинённых уровней информационной системы по методологии, описанной ранее в [80] и в предыдущих главах.

Общая схема автоматизации-информатизации процесса по уровням системы такова:

- 1. Система АСУТП обеспечивает измерение расходов дозируемых веществ (косвенно шихты по оборотам дозирующего шнека, хлоргаза), температур (температура хлорирования поддерживается «на верхнем пределе около 800 °С», [9, с. 34]), давлений, концентрации хлоргаза вручную, анализ расплава хлоратора с периодом в 2 часа.
- 2. Контуры управления обеспечивают поддержание текущего технологического режима: массопотоков дозируемых компонент, параметров оросительной системы конденсации и т. д.
- 3. АСУТП снабжена системой сбора хранения и отображения данных, в т. ч. получением данных анализов проб расплава по компьютерной сети из заводской лаборатории.

На указанном аппаратном обеспечении выстаиваемы собственно информационные уровни.

- 4. Решение задач оптимизации управления процессом (подробнее см. далее в этом параграфе), под наблюдением оператора-технолога с выдачей сотруднику рекомендаций по ведению процесса.
- 5. Решение задач учёта и контроля соответствия исполнения плана заданному с 6-го уровня производственному плану. Коррекция оптимальных значений концентраций TiO_2 и C в расплаве по минимуму издержек.

Процедуры оптимизации при поддержании процесса в оптимальном состоянии позволяют планировать подготовку шихты на предыдущей стадии процесса с предотвращением накопления углерода в расплаве (для предотвращения необходимости периодического дожигания углерода дутьём воздуха, приводящего к вскипанию расплава, а иногда и к выбросам газов в атмосферу цеха).

6. Решение задач экономического прогнозирования (в условиях изменчивости цен ресурсов, готового продукта, оплаты труда, цены денег) при нормировании прибыли для определения оптимальной цены и выделяемого на капитальные затраты объема средств,— выработка плана (по заключении контрактов), определяющего задачи 5-го уровня.

Единичные оценки материального разбаланса процесса в текущем времени дают величину в $\pm 20...25$ %. Прогностические оценки улучшения соблюдения материального баланса хлоратора с улучшением точности в 5% соразмеримы с полной окупаемостью затрат на информатизацию процесса.

Описание задачи оптимизации

Модель [77] описывает материальный баланс процесса хлорирования. Модель — главное содержание программного обеспечения, позволяющего оптимизировать дозируемые материальные потоки процесса по 2-м параметрам (содержанию TiO_2 в расплаве и содержанию углерода в расплаве) (для получения максимального выхода продукта на единицу затрат времени, минимизации материальных издержек). Простое обеспечение наблюдаемости за мерой разницы коэффициентов соотношений дозировки веществ от стехиометрии уже значительно облегчает управление процессом сотруднику-технологу, при обеспечении такой наблюдаемости за процессом решаемы и более сложные задачи.

Ключевая задача организации производства — задача 4-го уровня оптимизации процесса в текущем времени, для процесса хлорирования титаносодержащей шихты по двум материальным потокам (хлора /

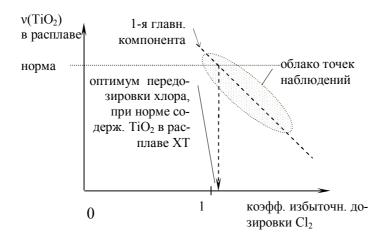


Рис. 18. Схема оптимизации баланса хлора и шихты

шихты, см. рис. 18) и (кислорода окислов / углерода, см. рис. 19),— двухмерная, заключается в том, чтобы:

- а) автоматизированно вычислять коэффициент избытка дозировки компонента относительно стехиометрического соотношения;
- б) по наблюдению характеристики качества процесса (доли содержания в расплаве) определять, автоматизированно, по сбору статистики, коэффициент оптимальной передозировки компонента (для управления подачей хлор-газа и соответствующего заказа смешения шихты с определённым содержанием углерода) при сохранении заданного состава расплава.

Для статистической обработки потока данных применим стандартный статистический метод главных компонент (см. [3], [4]).

Достаточным основанием для практического построения систем оптимизации упомянутого типа (при достигнутом уровне информатиза-

ции) явилась проработанность первых 3-х уровней системы автоматизации процесса и организация оцифровки данных периодических (через 2 часа) анализов состояний процесса и анализов и материальных потоков сырья и готового продукта, для организации информационного потока данных о процессе, отобразимого в текущем времени на диаграмме управления как "облако точек наблюдений", см. рис. 18, рис. 19.

Способ построения систем оптимизации для разных химикотехнологических процессов (флотации, отгонки, хлорирования и т. п.) в достаточной степени одинаков.

Обоснования вычислимости решения

Об ограничениях применимости функционально-дифференциальных математических моделей для описания сложных химических процессов и потребности использования статистических методов упоминалось в предыдущих главах (также см. [95], [124]).

Другие ограничения в использовании математических моделей связаны с недостаточной определённостью задачи измеримыми параметрами, а именно, сложности решения задач означенного типа таковы, что известные методы теории интегральных операторов (даже при попытках регуляризации [41]) не подходят для решения означенного класса задач управления химико-технологическими процессами.

Пусть попытаемся описать задачу управления химико-технологическим процессом посредством интегрального оператора:

$$\int_{t-t_n}^{t} K(t,s) u(s) ds = f(t) , \qquad (11)$$

где t — текущее (действительное) время,

 t_n — период интегрировапния,

s — "внутренняя" переменная по времени для учёта прошлых состояний процесса,

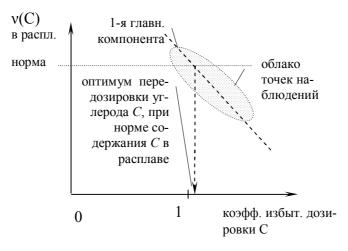


Рис. 19. Схема оптимизации баланса углерода

- u(s) соотношение дозировки 2-х компонент A и B относительно стехиометрии,
- f(t) заданная функция качества (состояния расплава, содержания в нём вещества A),
- K(t, s) оператор, преобразующий соотношение дозировки в состояние расплава (для означенной выше задачи) (система кинетических уравнений реакций), но фактически ввиду наличия многих веществ в дозируемых компонентах,
- K(t, s) = K(t, s, V), где V дополнительные параметры процесса (неизмеряемые, алгоритмически невычислимые и т. п.), таким образом, функция оператора K(t, s, V) не может быть точно определена, что делает постановку задачи в интегральной форме почти бессмысленной. Но задача решается (в терминологии операторных уравнений) следующим образом. Предположим, что есть точное решение операторного уравнения:
- $\overline{A}\,\overline{u} = f_{_{3a\partial ah hoe}}$, где \overline{u} отношение дозировки компонент по стехиометрии процесса, и где наблюдается (вероятностное) распределение двух величин ξ_1 параметра качества в подпространстве X, и $\xi_2(t) = \frac{f_{oeucms.}(t)}{f_{sadanhoe}(t)}$ параметра управления в подпространстве Y; методом

главных компонент, или приближённо, по регрессии $regr(\xi_1 \mid \xi_2)$, фактически определяются параметры распределения невязки относительно гипотетического решения, см. диаграмму выше (рис. 18, рис. 19), и определяется решение (соотношение дозировки) $u_0 = u_0$ ($f_{3a\partial ahhoe}$), таким образом, вероятностным методом, строится псевдообратный оператор A^{-1} к формально неопределимому оператору A.

Решение задачи управления при фундаментальной обоснованности 3-мерности пространства состояний системы:

- 1. параметр качества продукта (подпространство X),
- 2. параметр управления (подпространство Y),
- 3. экономический параметр (подпространство Z)

сводится, при приложении результатов теории измеримости [118], к построению оптимизационной статистической диаграммы в 3-х мерном пространстве состояний (см. рис. 20), вычислению норм подпространств $X, Y, Z, \dots \|\cdot\|_X, \|\cdot\|_Y, \|\cdot\|_Z$, перенормировке наблюдений соответственно вычисленных норм, а затем определении по статистической обработке данных оптимума — неподвижной точки оператора управления, вычислимой на 6-м уровне по следствию из теоремы о вычислимости неподвижной точки оператора (в λ -теории [12]). (Как следствие решения, получаемые на 4-м и 5-м уровнях являются также вычислимыми и при-

ближёнными).

На рис. 18 норма $\|\cdot\|_{XI}$ — это мера содержания TiO_2 в расплаве относительно заданного значения, норма $\|\cdot\|_{YI}$ — это мера дозировки хлора относительно идеальной по стехиометрии процесса.

На рис. 19 норма $\|\cdot\|_{X2}$ — это мера содержания С в расплаве относительно заданного значения, норма $\|\cdot\|_{Y2}$ — это мера дозировки углерода относительно идеальной по стехиометрии процесса.

Фрагмент таблицы расчёта норм $\|\cdot\|_{YI}$, $\|\cdot\|_{Y2}$ см. в табл. 3.

Пример решения задачи оптимизации дозировки, в 1-м приближении, без перенормировок относительно стехиометрии приведён на рис. 21 (из [61]).

Для решения задачи оптимального управления процессом хлорирования титаносодержащей шихты, на современном этапе конструирования АСУТП, достаточно, в первом приближении, решения задачи на 4-м уровне (оптимизации по качеству состояния расплава хлоратора). Практические действительные решения, учитывающие реальные возможности производственных предприятий и разработчиков систем ав-

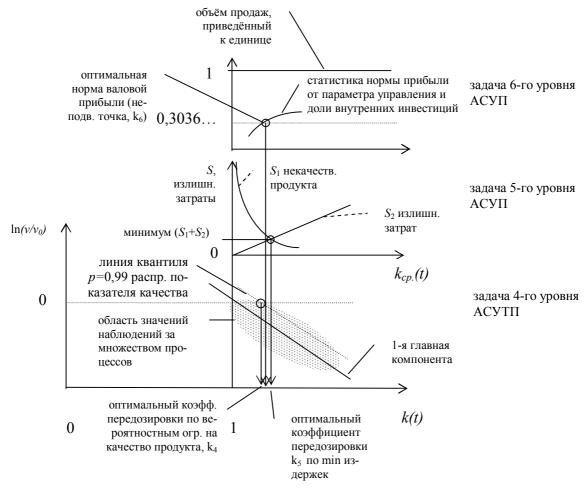


Рис. 20. Общая оптимизационная статистическая диаграмма управления

томатизации, в 1-м приближении, проще фундаментально обоснованного полного решения задачи. Уже при таком простом решении задачи для процесса хлорирования обеспечиваемо снижение вероятности вскипания расплава, чем и повышаема степень безопасности производства.

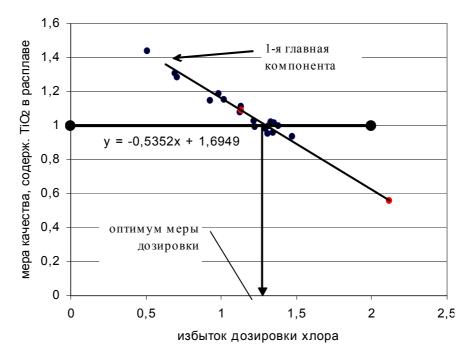


Рис. 21. Пример, основанный на данных, приближенных к реальности (мера дозировки хлора относительна, не связанна со стехиометрией процесса)

Таблица 3. Часть таблицы рассчёта идеальных по стехиометрии дозировок (норм пространств Y_1 , Y_2).

MeO	наимен.	Ti305	TiO2	FeO	Al2O3	MgO	С	CO2	CO				
MeO	М г/моль	223,70	79,90	71,84	101,96	40,30							
MeO	стехиометр	1	1	1	1	1							
MeO	v(i)	<u>0,7315</u>	0,057	0,041	0,048	0,016							
MeO	m(i), г/с	731,5	57	41	48	16	массопоток ц	ссопоток шихты (окислы), измер.					
MeO	у(і), моль/с	3,270048	0,713402	0,570717	0,470767	0,396979		•	•				
CI	стехиометр	6	2	1,5	3	1		хл-г, м3 О2 О2, моль			Анализ хлор-газа, масс.		
CI	у(і), моль/с	19,62029	1,426805	0,856076	1,412301	0,396979	593,1585	847,3693	51,60479	2,303785		CI2	0,7
CI	г/с	1391,196	101,169	60,70094	100,1406	28,14819	хлор	8	1	8,5		02	0,0609
0	стехиометр	2,5	1	0,5	1,5	0,5	•	0,941176	0,117647			CO2	0,01
0	у(і), моль/с	8,175121	0,713402	0,285359	0,70615	0,198489		12,86226	1,607782	14,47004		N	0,186498
0	г/с	261,5941	22,82802	9,131137	22,59597	6,351426	кислород		углерод	173,7996		проч.	0,042602
MeCl	наимен.	TiCl4	TiCl4	FeCI3	AICI3	MgCl2							1
MeCl	стехиометр	3	1	1	2	1							
MeCl	М г/моль	189,71	189,71	162,20	133,34	95,21	отн. шихта/хл	пор-газ	0,437609	2,285145			
MeCI	y(i), моль/с	9,810145	0,713402	0,570717	0,941534	0,396979		на ед. шихты 2,28 ед (массы) х-г.					
MeCI	г/с	1861,102	135,341	92,5698	125,5446	37,79677	хлориды						
MeCl	отн. доли.	0,740287	0,053834	0,036821	0,049938	0,015034							
		0,794121		0,036821	0,049938	0,015034							
MeCl	Т кип., К	410,85	410,85	588,1	466,15	1683,15							
MeCl	Т плавл., К	-23	-23	309	179,7 (взг)	714							
MeCl	Н исп., Дж/моль	16115,05	16115,05	23159,06	18309,68	67050,17		Итого					
р пар	273,15	9382,666	9382,666	429,2799	3591,65	1,82E-06		Массопоток шихты (окислы) Массопоток хлора (расч.)		<u>1000</u>	г/с	(условие)	
		9382,666	9382,666	0	0	0				1877,612	г/с		
		0,794121						Массопоток хлор-газа (расч.)		847,3693	л/с		
		0,911834						Масоопоток углерода (расч.)		173,7996	г/с		
	р отн.	0,130399	0,130399	0,005966	0,049916	2,52E-11		Массопоток	продукта (ра	ісч.)	1996,443	г/с	
отн. моля	рн. поток	1,279232	0,093027	0,003405	0,046998	1E-11		Массопоток титана в продукте		504,0779	г/с		
оценка д	олей	0,657621	0,047823	0,00175	0,02416	5,15E-12		Масоопоток титана в сырье		504,0779	г/с		
оценка д	олей	0,705444		0,00175	0,02416	5,15E-12							
		0,705444		0,036821	0,049938	0,015034							
		0,639461		0,033377	0,045267	0,013628							
TiCl4	m, г/с	1996,443											
Темпера	гура конденсации	0											
потери недоконденс. прод		0,42%											
		8,476352											
остаток		1987,967											

§23. Процесс очистки четырёххлористого титана от ванадия.

Пространство состояний технологического процесса (для широкого класса процессов) имеет следующие одномерные подпространства: 1. мера качества продукта, 2. параметр управления, 3. экономический параметр. Общая статистическая диаграмма управления такова, как указано на рис. 22. Для каждого конкретного технологического процесса определяется содержание отображаемых параметров и нормирование единиц измерения одномерных подпространств (для параметра управления по приближённой модели процесса). 26

Для конкретного примера управления процессом химической техно-

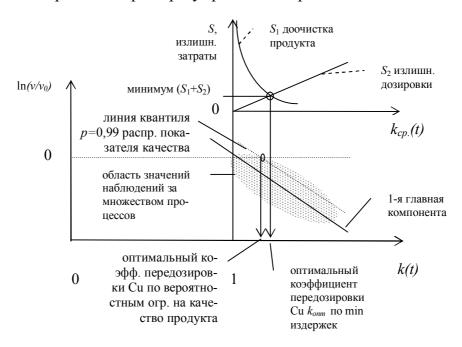


Рис. 22. Оптимизационная диаграмма процесса очистки TiCl₄

логии неполная диаграмма такова, как указано на рис. 22. Уравнение реакции процесса очистки технического четырёххлористого титана от примесей окситрихлорида ванадия медным порошком (см. [70, с. 318], [9]):

$$2VOCl_3 + Cu = VOCl_2 \checkmark + CuCl_2 \checkmark. \tag{12}$$

Ввиду неполного прореагирования меди [9], [63] медный порошок требуется дозировать в установку с некоторым избытком (но минимально необходимым, из соображений минимизации издержек) для получения продук-

²⁶ Определение параметров процесса, выделение его пространства состояний, в общем случае — неформализуемая задача, составляющая содержание инженерного творчества.

та заданного качества (допустимого содержания примеси ванадия в жидком техническом $TiCl_4$). Параметры процесса: 1. содержание ванадия, $v(VOCl_3)$ в очищенном продукте, 2. коэффициент избытка дозировки меди относительно стехиометрии процесса, 3. сумма издержек: $S=S_1+S_2$, S_1 — от передозировки меди, S_2 — дополнительных затрат на очистку технического $TiCl_4$ на следующем переделе низшими хлоридами титана. Величина v_0 — технологически допустимое содержание примеси ванадия в очищенном продукте.

Структура информационных уровней этой системы такова:

- 1. Измерение технологических параметров, устройства управления.
- 2. Локальные контура управления параметрами.
- 3. Базы данных результатов измерений и анализов.
- 4. Статистически оптимальное управление качеством.
- 5. Учёт и планирование, минимизация издержек для коррекции регламента.
- 6. Планирование нормы прибыли и т. п.

Вместо указанных параметров, в ином технологическом случае (горячей штамповки труб), параметры процесса таковы: 1. количество дефектов на единицу объёма (определяемое неразрушающими методами дефектоскопии), 2. отставание скорости деформации заготовки от скорости теоретически допустимой при измеренной температуре заготовки (в случае близкой к линейной зависимости допустимой скорости деформации от температуры, этот параметр — температура заготовки), 3. сумма избыточных издержек на дополнительный нагрев заготовок и упущенной выгоды от некачественного продукта; диаграмма, при другой модели процесса, совершенно аналогична.

Определеяемое в ходе управления процессом решение задачи получения продукта заданного качества при минимальных издержках является статистически оптимальным.

§24. Процесс производства диоксида титана.

По данным о процессе получения диоксида титана парофазным гидролизом показано, что повышенное содержание рутильной формы продукта достигается при высокой температуре процесса, выше 1250 °C, а также указано на более низкое содержание хлора в готовом продукте при повышенной температуре процесса [105], [125].

Как известно, для практического применения TiO_2 (получаемого в промышленности путём парофазного гидролиза из $TiCl_4$ [68]) в промышленности пластмасс и производстве некоторых видов бумаги, значимо, в

какой форме получается продукт — в рутильной или анатазной. Техническими условиями нормируется содержание рутильной формы в готовом продукте не менее 90% (а в некоторых специальных случаях и более — до 95–97%). Теоретические соображения указывают на то, что повышение содержания рутильной формы в готовом продукте связано с повышением температуры процесса: «при нагревании анатаз и брукит необратимо превращаются в рутил соответственно при 400–1000 °C и ~750 °C» [71, с. 593]. По анализу конкретных данных о процессе получения диоксида титана показано, что температура процесса является основным фактором достижения качества готового продукта.

Таблица 4. Некоторые данные о процессе, по [68]

	Содера	жание	Темпера- тура в зо-	•	TiO ₂ , %	Содержание в продукте, %		
№	TiCl ₃	SiCl ₄ *	не реак- ции, °С	рутил	анатаз	Cl ⁻	TiO ₂	
1	5,55	0,02	1000	92,8	7,2	0,17	97	
2	5,55	0,02	700	10,6	89,4	1,07	97	
3	5,55	0,02	600	4,6	95,4	1,24	96	
4	5,55	0,02	600	13,8	86,2	1,1	95,5	
5	4,88	1,9	800	42,1	57,9	0,25	97	
6	4,88	1,9	900	57,5	42,5	0,2	97	
7	4,88	1,9	1050	63,3	36,8	0,12	97	
8	4,88	0,9	700	7,3	92,7	0,6	97	
9	4,88	1,9	700	15,2	84,8	0,55	97	
10	4,88	1,9	600	1,7	98,3	0,97	95	
11	3,11	1,1	860	90,8	9,2	0,15	97	
12	3,11	1,1	1000	95,8	4,2	0,06	97	
13	3,11	1,1	1120	93,1	6,9	0,14	97	
14	3,4	3,4	1000	58,5	41,5	0,12	95	
15	3,4	3,4	1000	62,3	37,7	0,11	98	
16	0,02	0,02	980	86,4	13,6	0,36	98	
17	0,02	0,02	900	85,7	14,3	0,33	97,2	
18	0,02	0,02	940	88,5	11,5	0,29	97,8	
19	0,02	0,02	730	17,4	82,6	0,63	98	
20	0,02	0,02	1000	94,7	5,3	0,17	98,1	
21	0,02	0,02	900	94,1	5,9	0,2	97,1	
	v(TiCl ₃)	v(SiCl ₄)	Т	v(рутил)	v(анатаз)	v(Cl ⁻)		

^{*} низкокипящий дистиллят, содержащий около 80% SiCl₄, остальное — TiCl₄.

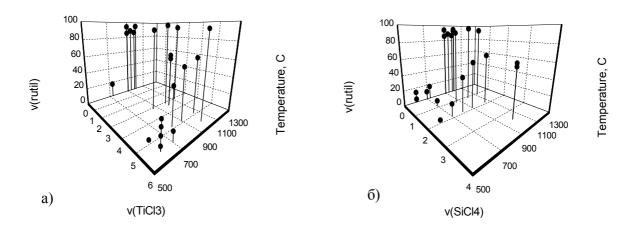


Рис 23. 3-мерное изображение: а) влияние $TiCl_3$ и температуры, б) влияние $SiCl_4$ и температуры на содержание рутильной формы TiO_2 , по данным [68]

Процесс парофазного гидролиза протекает при температуре 550–1400 °C и выше по реакции:

$$TiCl_4(nap) + 2H_2O(nap) = TiO_2 + 4HCl.$$

Мелкие частицы диоксида титана под собственной тяжестью оседают и удаляются из установки, отходящие газы с HCl удаляются на газоочистные сооружения, полная аппаратурно-технологическая схема процесса приведена в [68].

Основные данные о процессе получения диоксида титана, приведённые в работе [68], в которой пытались выявить влияние на качество процесса добавок низших хлоридов титана и четырёххлористого кремния к

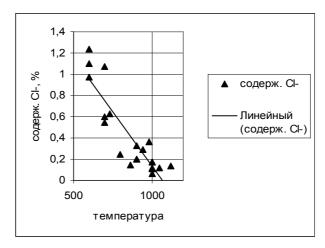


Рис. 24. Зависимость содержания хлора в готовом продукте от температуры процесса

исходным продуктам реакции, приведены в таблице 4.

По приведённым в таблице данным просматривается вероятностно значимая связь между температурой проведения процесса и содержанием рутильной формы TiO_2 в соответствии с теоретическими предположениями, см. рис. 23. Большим температурам соответствует большее содержание рутила, зависимость для линейной модели регрессии — коэффициент корреляции:

corr(T, v(рутил)) = 0,89, соответственно, corr(T, v(анатаз)) = -0,89. На таком фоне зависимости влияние добавок на содержание рутила (анатаза) весьма малозначимо. К тому же эти добавки лишь уменьшают содержание рутила, коэффициенты корреляции — отрицательны: $corr(v(рутил), v(TiCl_3)) = -0,56$, $corr(v(pymun), v(SiCl_4)) = -0,099$, что наглядно видно на 3-х мерных диаграммах, рис. 23 а), б).

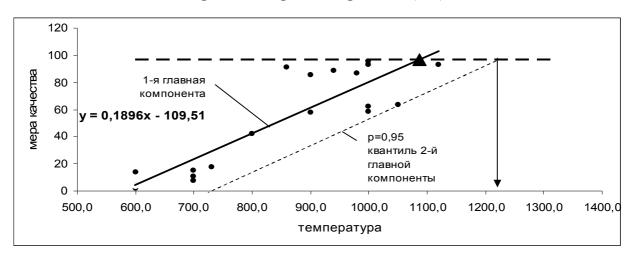


Рис. 25. Определение рекомендуемой температуры процесса методом главных компонент

Выводы, сделанные в [68] о влиянии добавок на содержание рутила в продукте, являются недостаточно обоснованными ввиду ненулевой корреляции между содержанием добавок и температурой процесса (в основном определяющей качество продукта),

$$corr(v(TiCl_3), T) = -0.63, corr(v(SiCl_4), T) = 0.39,$$

т. е. ввиду не очень точной обработки данных эксперимента.

Кроме того, при температуре процесса свыше 1000 °C наблюдается на порядок меньшее содержание в продукте хлора, $C\Gamma$, относительно температуры процесса в 600–700 °C, см. рис. 24, $corr(T, v(C\Gamma)) = -0,889$ (безотносительно влияния добавок). Следовательно, для получения продукта с минимальным содержанием хлора предпочтительнее высокотемпературный режим процесса. Влияние же добавок на содержание хлора, на фоне

основной зависимости, прослеживается с малым уровнем значимости.

Рекомендуемая температура процесса, по анализу данных методом главных компонент (при конкретизации метода пространства состояний), для получения продукта заданного качества с вероятностью p>0,95 составляет свыше 1250 °C, см. рис. 25.

Таким образом, показано, что при высокотемпературном режиме процесса обеспечиваются условия получения рутильной формы TiO_2 , с более чем 90% рутила,— продукта товарного качества. Рекомендуемая температура процесса более 1250 °C. ²⁷

§25. Процесс вакуумной сепарации губчатого титана.

При общности технологической схемы некоторого класса процессов разделения твёрдой и газообразной фаз веществ описана общая структура информатизации управления означенным классом процессов, посредством организации в текущем времени наблюдаемости за характеристикой энергетического баланса процесса (частное применение — процесс вакуумной сепарации титановой губки). Дальнейшее изложение в этом параграфе следует работе автора [91].

Выделение класса процессов

Имеется ряд процессов разделения веществ посредством разделения фаз (твёрдой и газообразной), прерывного типа: вакуумной сепарации, упаривания, сушки и т. п. со свойствами: а) нагрев выполняется электрическими нагревателями, б) температура внутри технологической установки стабилизирована посредством контура управления (при измерении температуры электронными датчиками внутри установки), в) вакуумирование внутреннего пространства технологической установки (равномерное в период времени процесса); такими процессами являются, например, процесс

 $^{^{27}}$ Наличие одного главного параметра качества продукта (содержания рутила) и одного главного параметра управления (температуры процесса), от которого также зависит второстепенный параметр качества (содержание Cl^-), позволяет применять для управления процессом (получения продукта заданного качества при минимизации издержек) метод пространства состояний, применимый к различным классам процессов химической технологии [76].

Более того, по результатам проведённого анализа данных представляется, что перспективен также способ получения диоксида титана из $TiCl_4$ в дуге электрического разряда (при температуре дуги свыше 2500 °C имеющий более простую аппаратурнотехнологическую схему), использовавшийся ранее на ОАО "Ависма" в 80-е – 90-е гг.

вакуумной сепарации губчатого титана [70], процесс кристаллизации [51], процессы сушки [44].

Процесс вакуумной сепарации губчатого титана заключается в отгонке при высокой температуре из блока титановой губки магния и хлорида магния до их практически полного удаления (при вакуумировании); процесс кристаллизации заключается в отгонке из насыщенного раствора вещества воды до практически полной кристаллизации (при вакуумировании); процессы сушки заключаются в отгонке из сырого вещества воды, до практически полного удаления (при частичном вакуумировании).

Формулировка критерия окончания процессов

Описана термодинамическая формулировка критерия определения окончания процесса вакуумной сепарации губчатого титана [83] [74], технологическая часть описана в [10], [63]. Проверены необходимость и достаточность условия наблюдения за энергопотоком в систему (при стабилизации и измерении температуры) для построения формальной процедуры автоматизированного определения момента окончания процесса.

Как известно, по 2-му закону термодинамики [69], [40]
$$ds \ge \frac{dQ}{T} , \qquad (13)$$

где ds — приращение энтропии,

Q — теплота, dQ=E, где E — энергопоток в систему, тогда

$$ds \ge \frac{E}{T} \tag{13'}$$

Если процесс равновесный, то

$$ds = \frac{E}{T} \tag{13"}$$

В системе печи сепарации E и T — наблюдаемые (посредством АСУТП) величины, причём T = const (автоматически стабилизируется). Таким оборазом, при окончании процесса сепарации (окончании испарения Mg, $MgCl_2$), достижении равновесного состояния системы, ds = const (минимум) и, следовательно, по (13'') E = const (энергопоток обусловлен только теплопотерями).

Таким образом, при окончании процесса необходимо наблюдается постоянство энергопотока в систему. ²⁸

²⁸ Чуть более подробные выкладки. Энтропия системы s разделяется на две части: энтропию теплопотерь s_1 и энтропию собственно процесса сепарации s_2 : $s=s_1+s_2$, откуда

Проверим достаточность наблюдения за энергопотоком (правой частью соотношения (29)) для определения момента окончания процесса сепарации²⁹.

Пусть энергопоток в систему постоянен, но процесс ещё не окончен; пусть E=const, возможны случаи:

- А) начало процесса (прогрев и начало испарения, при котором массопоток испаряющегося вещества ограничен максимальной мощностью нагревателей), этот случай ислючаем из рассмотрения³⁰;
- Б) середина и близкий к окончанию период. Скорость испарения вещества определяется парциальным давлением паров этого вещества, при 900 °С p(Mg)=97 мм рт. ст. $p(\text{MgCl}_2)$ =7 мм рт. ст. [63, с. 191], т. о. скорость испарения примесей (при постоянном вакуумировании системы до 4...10 Па) ненулевая³¹, следовательно, в течение процесса масса отгоняемых примесей убывает, значит уменьшается и площадь испарения (уменьшается скорость процесса³²), т. е. энергия, потребная на испарение оставшихся примесей, убывает, следовательно $E \neq \text{const}$ до окончания процесса (противоречие с начальным предположением, что E = const). Значит, показано, что наблюдения за величиной энергопотока в систему (при стабилизации температуры) достаточно для определения момента окончания процесса. E = const (обусловлено только теплопотерями), в случае Б) точно при окончании процесса.

Таким образом, показано, что наблюдения за двумя характеристиками: энергопотоком в систему и температурой в системе (E и T) необходимо и достаточно для выполнения заключения об окончании процесса вакуумной сепарации губчатого титана,— такое утверждение (простой критерий)

²⁹ В более ранних публикациях по моделированию и автоматизации процесса сепарации [6], [25], [32], [33], [26], [30] [36], [62], [128] проверки достаточности наблюдения за энергопотоком не отмечалось.

 $ds=ds_1+ds_2$; $ds_1={\rm const}$ — теплопотери (равновесные, $ds_1=E_{min}/T$) , где E_{min} — энергопоток теплопотерь, const). $ds_2{\geq}(E-E_{min})/T$) , $ds_2{\geq}E_2/T$; при окончании процесса $ds_2=0$, $E_2=0$, т. е. $E={\rm const.}$

³⁰ Конструктивно это исключение оформляется как запуск процедуры определения критерия окончания процесса после 20...25 часов от начала процесса (1/3 длительности) и уменьшении мощности нагревателей (энергопотока) менее чем 0,5 от максимальной мощности.

³¹ Скорость испарения $MgCl_2 > 90$ мг/(сек·см²) при T>900 °C (действительная температура процесса 950–980 °C [63], 1000–1030 °C [70]).

³² См., например, график скорости процесса сепарации в [10, с. 44] (убывающую до 0 при окончании процесса функцию).

является основанием для построения автоматизированной системы определения оптимальной (минимальной) длительности процессов сепарации³³.

Для оптимального (по получению качественного разделения веществ исходной неоднородной смеси, при минимизации энергозатрат) управления такими процессами требуется достаточно точно определять в текущем времени, в связи с непредсказуемостью длительности процесса, ввиду изменчивости состояния исходных продуктов смеси, момент окончания процесса: с одной стороны, для минимизации периода времени, затрачиваемого на процесс (нижняя грань); с другой — для максимизации доли получения качественного готового продукта, т. е. для минимизации доли процессов с недоразделением (недоупариванием, недосушкой), определять коэффициент среднего продления процессов, относительно индивидуальной для каждого процесса нижней грани длительности. Термодинамическая формулировка критерия окончания таких процессов, первоначально сделанная для процесса вакуумной сепарации губчатого титана [83], распространима на весь класс вышеупомянутых процессов.

При окончании процесса необходимо наблюдается постоянство энергопотока в систему. Кроме необходимости в [83] показана, что более важно, и достаточность выполнения означенного условия для определения момента окончания процесса,— наличие такого фундаментального критерия, не описанного ранее (в [36], [31], [128]), позволяет формулировать дальнейшие прикладные математические методы его вычисления.

С другой стороны, по теореме Алесковского (2002 г.) [5] о связи энтропии и информации, $s+I=1,\ dI=-ds$, изменение информации равно с точностью до знака изменению энтропии. Информативно окончание процесса сепарации, при достижении минимума производства энтропии, (dI=0) равнозначно обнулению дифференциала энтропии процесса отгонки примесей (без учёта теплопотерь ds=0), с учётом же того, что теплопотери процесса относительно постоянны, энтропия процесса складывается из двух составляющих: энтропии процесса фазового перехода (испарения) и энтропии теплопотока теплопотерь $s=s_{\phi}+s_{m}$, откуда $ds=ds_{\phi}+ds_{m}$,

Оптимальная передержка относительно определённого момента окончания процесса определяется в этом случае по сбору статистики и определении коэффициента корреляции между характеристикой качества продукта (долей оставшегося $MgCl_2$) и коэффициентом передержки.

 $^{^{33}}$ При окончании процесса E=const, E '=0, для определения окончания процесса достаточно проверки выполнения гипотезы о равенстве 0 математического ожидания величины E '.

окончание процесса соответствует обнулению $ds_{\phi} = 0$, т. е. информативно процесс окончен, когда достигнуто постоянство изменения энтропии, $ds_m = 0$. Далее описан способ вычисления этого информативного критерия.

Необходимым и достаточным условием окончания процесса разделения веществ при разделении твёрдой и газообразной фаз (обусловленных разной температурой плавления, разрушения, 1-го вещества и температурой кипения 2-го вещества (отделяемых веществ), при необязательном вакуумировании) является, теоретически, по 2-му закону термодинамики, стабилизация энергопотока в систему, E = const, практическое же определение этого теоретически определимого момента окончания процесса заключается [91], [83] в том, что «при окончании процесса E = const, E' = 0, и для определения окончания процесса достаточно проверки выполнения гипотезы о равенстве 0 математического ожидания величины E'»,— первой производной от измеримой, прямо или косвенно, величины энергопотока в нагреватели (косвенно — при импульсном управлении, программно вычислимой по известной величине мощности нагревателей и результатам текущих измерений, посредством АСУТП, скважности импульсов управления нагревателями).

Описание математических и алгоритмических процедур вычислений

Гипотеза об окончании процесса проверяема посредством статистического критерия [91], [38, с. 633]: «по статистике t-критерия

$$y = \frac{\overline{E}_{(t_c)_H} - 0}{S(E'(t))_{(t_c)_H} / \sqrt{n}}$$
 (14)

<практически> определим момент теоретического окончания процесса»,

где «
$$\overline{E}_{(t_c)} = \frac{1}{t_c} \int_{t-t_c}^t E'(t) dt$$
 (15)

среднее значение функции E'(t) — изменения энергопотока, на интервале длительностью t_c от текущего момента t до $t-t_c$. Ожидаемое значение E'(t) — известно, M(E'(t))=0. Стандартное отклонение S(E'(t)) вычислимо на интервале $[t-t_c,t]$ относительно 0:

$$S(E'(t))_{(t_c)} = \sqrt{\frac{1}{t_c}} \int_{t-t_c}^{t} (E'(t) - 0)^2 dt .$$
 (16)

Введена перенормировка (16) относительно E_{max} ,— номинального значения мощности нагревателей:

$$\overline{E}_{(t_c)i} = \frac{1}{t_c} \int_{t-t_c}^t \frac{E'(t)}{E_{\text{max}}} dt , \qquad (17)$$

$$S(E'(t))_{(t_c)_H} = \sqrt{\frac{1}{t - t_c}} \int_{t - t_c}^{t} \frac{(E'(t) - 0)^2}{E_{\text{max}}} dt .$$
 (18)

Посредством описанных статистических процедур алгоритмизуема проверка гипотезы о равенстве нулю 1-й производной от энергопотока в установку. Алгоритмизованная процедура определения окончания указанного класса химико-технологических процессов обща для разных процессов указанного класса и, при информатизации соответствующего процесса, подлежит встраиванию в информационную систему (автоматизированного рабочего места технолога).

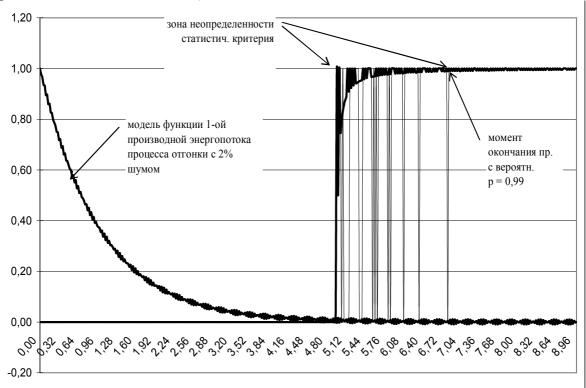


Рис. 26. Результат работы алгоритма определения окончания процесса по модели данных (обозначен момент окончания процесса с вероятностью p=0,99)

Алгоритмы протестированы на модели, описывающей указанные процессы, при зашумленности модели, описывающей изменение функции производной энергопотока (неточности измерений) практическое модельное определение критерия окончания процесса в достаточной мере однозначное (см. рис. 26, 30, 29, также [79]). Система с менее совершенными алгоритмами и совершенно иной формулировкой критерия окончания процесса использовалась на ОАО "Ависма" с 1981 года, см. [36]. Применение статистических методов даёт более простое в вычислительном плане

решение, нежели попытка прямого аналитического моделирования системы посредством системы интегро-дифференциальных уравнений, описанная в [128].

Принцип малой вариации параметра управления

Нахождение оптимума параметра управления можно попытаться записать в операторной форме в виде нахождения неподвижной точки некоторого оператора A, $y=A(x_0,p,y)$, где x_0 —норма качества, p — заданная вероятность её достижения, у — параметр управления. Поскольку оптимум параметра управления (см. рис. 28) находится по выборке значений параметров системы, то выражение перепишется как $y=A_1(x_0,p,< X, Y>)$, где < X, Y > — двумерная выборка. Параметр управления в этом случае можно представить как сумму оптимального значения и отклонений от него, поскольку параметр качества является функцией (при статистической аппроксимации) параметра управления, выражение таково $y=A_2(x_0,p,F(y+\Delta_iy),y+\Delta_iy)$, упрощаем его внося функцию в тело оператора $y = A_3(x_0, p_1, y + \Delta_i y)$. В предположении линейности (или линеаризации в окрестности оптимума) запись такова $y=A_4(x_0,p,y)+A_5(x_0,p_1,\Delta_i y)$, или в иной записи $y=A_4(x_0,p,y)+A_6(x_0,p_1,<\Delta_i Y>)$, где $<\Delta_i Y>$ — некоторый набор отклонений от оптимума параметра управления. Операторы A_5 и A_6 не могут быть обнулены, ибо при этом практически задача не имеет решения, наличие этих слагаемых показывает, что для нахождения оптимума необходима малая вариация параметра управления, которая в данном случае задаётся программно³⁴.

Реализация вариации параметра управления при модельном исследовании процесса выполнена программными средствами, в реальной ситуации программный продукт предназначен для выдачи рекомендации оператору-технологу об окончании процесса в той или иной реторте, в связи с прогностическим достижением заданной меры качества.

Общая технолого-информационная схема управления

Таким образом, при возможности информационного определения окончания указанного класса процессов, по теоретически, термодинамически обоснованному критерию окончания процессов, технологическая и информационная схема построения указанного класса процессов примерно

__

³⁴ Неподвижная точка, соответствующая оптимуму управления, при этом понимается в обычном смысле как результат действия сжимающих отображений, теорему о которых см. в [37].

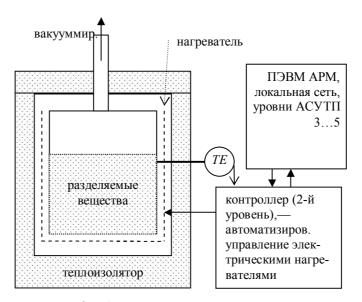


Рис. 27. Аппаратурная схема процесса

одинакова:

- 1) система нагрева с измерением энергопотока (система вакуумирования),
- 2) система стабилизации температуры внутри установки,
- 3) информационно-измерительная система (хранение в ПЭВМ) базы данных о характеристиках процесса,
- 4) псевдопараллельное во времени определение моментов окончаний процессов (при множественности параллельно используемых технологических установок),
- 5) вероятностный учёт меры продукции 2-го сорта для определения на уровне 4 оптимальной передержки процессов относительно алгоритмически определённых моментов окончаний процессов.

Построение уровней системы управления процессом соответствует общезначимой 6- уровневой структуре АСУТП (уровни 1–3 — автоматизационные, уровни 4–6 — информационные):

- 1) измерение (датчики),
- 2) управление локальными контурами (контроллеры),
- 3) сбор и отображение данных (базы данных в ПЭВМ АРМ),
- 4) процедуры оптимизации в текущем времени, при контроле наблюдателя оператора,
- 5) учёт материальных потоков, трудозатрат, меры выполнения плана,
- 6) прогнозирование и планирование доли прибыли.

Например, для исследовавшегося ранее процесса кристаллизации (вакуумированного упаривания) [51], технологическая схема, при изложенной методологии построения информационно-технологической системы, при прерывном процессе, совпадает (за исключением разницы температурного режима) с технологической схемой процесса сепарации (см. рис. 27).

При требованиях получения гарантированно качественного разделения веществ (минимизации доли некачественного готового продукта) при минимизации издержек возникает потребность в постановке и решении задач, уже упомянутой, текущей оптимизации управления процессами, одинаковая для разных процессов, ввиду сходности технологических схем. Решение задач оптимизации предполагает обработку потока не только технологических, но и экономических данных.

Перспективы оптимизации процессов отгонки

Пусть имеется множество пространств, соответствующих множеству отдельных процессов, в каждом из пространств определена единичная мера окончания процесса по алгоритмизованному критерию, а также наблюдаются фактическое время окончания процесса и характеристика качества разделения веществ (логарифмическая, v_0 — предельно допустимая концентрация, v — наблюдаемая), спроецируем эти пространства на одну сис-

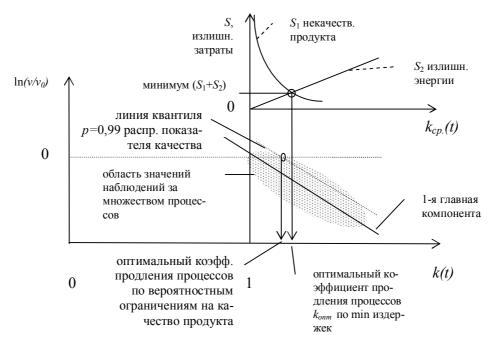


Рис. 28. Оптимизационная статистическая диаграмма управления

тему координат (см. рис. 28). Однако определить оптимальный коэффициент продления простым статистическим методом (подобно тому, как решалась задача 4-го уровня, определения длительности процесса) достаточно точно не представляется возможным; остаётся, используя сведения о стоимости, выполняя усреднения про наблюдаемым (за некоторый предыдущий период) процесса, пространствам определять две функции S_1 — стоимость недополученного продукта (некачественного продукта) и S_2 — стоимость излишних затрат на процесс (энергозатрат), минимум общих излишних затрат $min(S_1 + S_2)$ соответствует оптимальному коэффициенту продления процессов $k_{onm.}$, рекомендуемому оператору-технологу для управления процессами.

При выполнимости оптимизации в общем по характеристикам: а) материального баланса, б) кинетического баланса (производительности), в) энергетического баланса (в данном случае оптимизация выполнима по характеристике энергетического баланса) определению меры оптимальной передержки процессов относительно определённой по критерию минимальной длительности при условии равенства максимума излишних затрат электроэнергии достижимому минимуму излишних затрат от получения некачественной продукции; краткое описание процедур следующее. Пусть, в первом приближении, определена мера продления процессов, например, k = 1, 2, и задана допустимая вероятность получения качественного продукта, p = 0.995 (при определении меры качества, меры допустимого недоразделения веществ), тогда собрана статистика, при данных продлениях процессов по вероятности получения качественного продукта за отчётный период (неделю, месяц, 100–200 точечная совокупность), по определённой фактически вероятности $p_{\phi a \kappa m}$ подлежит уточнению мера продления k, с использованием стоимостно-денежных оценок: если стоимость недополученной качественной продукции S_1 (некачественного продукта с недоразделением веществ) больше, чем стоимость излишне затраченной энергии S_2 , то мера продления процессов k подлежит увеличению, и наоборот, при малом проценте некачественного продукта и большой передержке (малой стоимости недополученного продукта S_1) и значительных излишних затратах энергии S_2 коэффициент продления процессов подлежит уменьшению, очевидным образом процесс последовательных приближений сходится, при коррекции со стороны оператора, к равенству стоимости излишних затрат энергии и стоимости недополученного продукта, равенству, минимизирующему общие денежные затраты

$$S_1 = S_2, \ S_1 + S_2 \to min,$$
 (19)

$$S_1 = S_0 \cdot (1 - p_{\text{набл.}}),$$
 (20)

где S_0 , руб, — стоимость всей произведённой продукции (за отчётный период, n процессов),

 $p_{\text{набл.}}$ — вероятностная мера доли качественного продукта (за отчётный период);

$$S_{2} = C_{_{9H.}} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(\int_{t_{hav,i}}^{t_{\phi a \kappa m.i}} E_{i}(t) dt - \int_{t_{\kappa p.i}}^{t_{\phi a \kappa m.i}} E_{i}(t) dt \right), \tag{21}$$

где $C_{_{^{9H}}}$ — цена энергии (руб. за кВт/ч),

 $t_{\text{нач. i}}, t_{\text{кр. i}}, t_{\phi_{\text{акт. I}}}$ — соответственно моменты времени начала, окончания по критерию, фактического окончания i-го процесса,

 $E_i(t)$ — функция меры энергопотока в i-м процессе в систему.

Средний коэффициент продления процессов:

$$\overline{k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} k_i$$
, где $k_i = \frac{t_{\kappa p.i} - t_{nav.i}}{t_{\phi a \kappa m.i} - t_{nav.i}}$ (22)

— фактический, подлежит корректировке при выдаче практических рекомендаций в соответствии с условием минимизации затрат (19). Примеры обработки данных по процессам см. на рис. 29, 30.

Наполнение информационных уровней в системе управления разными процессами указанного класса процессов одинаково, что упрощает создание переносимого с одной информационной системы на другую программного продукта.

Подробное описание информационной системы приведено в [91]. При информатизации химико-технологических процессов методы построения технолого-информационных схем управления процессами и методы оптимизации по минимизации издержек с ограничениями на параметры качества продукта весьма одинаковы.

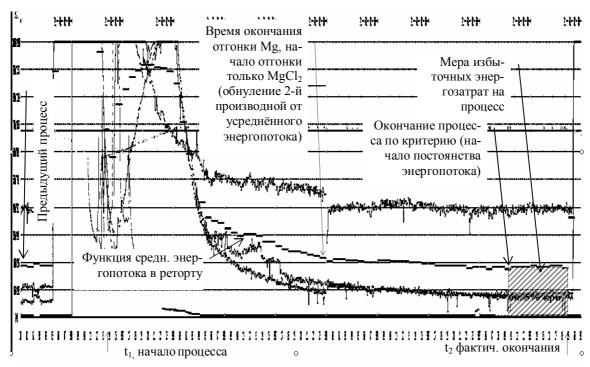


Рис. 30. Графики параметров процесса с нормальным качеством продукта

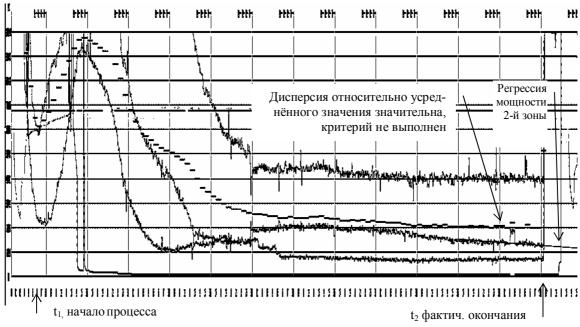


Рис. 29. Графики параметров процесса с полученным некачественным продуктом Длительность процесса ок. 80 час. При окончании процесса мощность нагревателя 2-й зоны ещё снижается и при окончании процесса не становится постоянной, т. е. в середине реторты — ещё неотогнанный остаток. В таких обстоятельствах требуется оканчивать процесс по достижении постоянства энергопотоков нагревателей всех 3-х зон. На графиках функция энергопотока в реторту — среднее по 3-м функциям, соответствующим 3-м зонам нагрева.

Глава 6. Примеры приложения метода пространства состояний. §26. Процесс флотационного обогащения руд.

Описан анализ структуры 6-ти информационных уровней системы управления процессом флотации, обозначены основные применимые математические методы для статистической, в текущем времени, оптимизации процесса по минимуму издержек.

Для снижения потерь и издержек производства процесса флотационного обогащения солевых руд значим выбор флотационного агента [18], причём сбор статистики по определению качества действительного процесса флотации (а не только лабораторных опытов) целесообразно выполнять в текущем производственном процессе, по действительному потоку производственных данных, при использовании информационной системы управления процессом, посредством которой решаема и задача текущего оптимального управления процессом.

Как указано в [18, с. 357] «основная задача управления процессом флотации солевых руд — стабилизация заданной производительности по обогащению ценного компонента при заданном качестве концентрата и минимально возможных издержках на производство», там же указано множество возмущающих факторов. Каждый фактор, влияющий на процесс флотации, связан с другими, взаимосвязанными. В большинстве случаев известны только качественные характеристики влияния факторов, многие из которых имеют экстремальный характер. При сложности управления многофакторным процессом задача оптимального управления корректно разрешима, в первом приближении, при применении статистически оптимального управления, позволяющего минимизировать влияние случайных факторов, при выделении важнейшего фактора, влияющего на меру извлечения продукта, — меры дозировки собирающего флотационного агента (см. далее).

Задача построения информационной системы управления процессом флотации, как частная, решаема посредством общего способа решения таких задач при использовании предварительного выделения структуры соподчинённых уровней информационных системы, по методологии, описанной ранее, см. выше. Структура уровней АСУТП флотации вкратце такова:

- 1. Средства измерения и средства управления (датчики и т. п.), измерение параметров сырья и готового продукта (выполнение периодических анализов).
 - 2. Контуры управления (локальные, в контроллерах), обеспечиваю-

щие управление по режиму, заданному с 3-го уровня, (оцифровка результатов анализов).

- 3. Базы данных в ПЭВМ APM технолога, обеспечивающие сбор, хранение и отображение информации о состояниях системы и результатов анализов (передача управления, уставок параметров на 2-й уровень).
- 4. Решение задач оптимизации управления процессом (подробнее см. ниже в этом параграфе) под наблюдением оператора и с выдачей оператору рекомендаций по ведению процесса.
- 5. Решение задач учёта и контроля соответствия исполнения плана заданному с 6-го уровня производственному плану.
- 6. Решение задач экономического прогнозирования (в условиях изменчивости цен ресурсов, готового продукта, оплаты труда, цены денег) при нормировании прибыли для определения оптимальной цены и выделяемого на капитальные затраты объема средств,— выработка плана (по заключении контрактов) определяющего задачи 5-го уровня.

Основное снижение текущих издержек производства (при заданных внешних и граничных условиях процесса) определяется при решении в текущем времени (в пределах цеха, уровни 3–4) задачи оптимального управления текущим технологическим процессом; оптимизационная диаграмма, наглядно описывающая схему статистического процесса, организуемого в локальной вычислительной сети предприятия такова³⁵, как указано на ри-

³⁵ Следует отметить, что хоть сколько-нибудь практически точна идентификация системы в связи с множеством непредсказуемых возмущающих воздействий (изменчивостью и сложноизмеримостью «гранулометрического и минерального состава ... суспензии» [18] и т. п.); к тому же достаточно практически точное построение детерминированных контуров управления (даже при учёте возмущающих воздействий) (на 2-м уровне АСУТП) — ввиду значительнейшей, изменчивой и малоопределимой величины запаздывания в контуре управления — также маловозможно; в данном случае требуется применение статистических методов управления, определения оптимума.

Кроме того, имеется общий способ построения оптимизационной процедуры для химико-технологических процессов, поскольку любая химическая реакция описывается параметрами стехиометрического отношения компонент, скоростью процесса, энергетической составляющей реакции, заключается в выявлении характеристик качества процесса по: 1) передозировке компонент (относительно стехиометрической нормы), 2) отклонению скорости процесса от теоретической в данных условиях и от требуемой планом производства, 3) определению меры избыточных энергозатрат на процесс (меры бесполезного рассеяния энергии) и оптимизации параметров управления этими характеристиками по минимизации меры текущих материальных издержек на процесс производства; конкретные функциональные зависимости для особенного процесса — особенные.

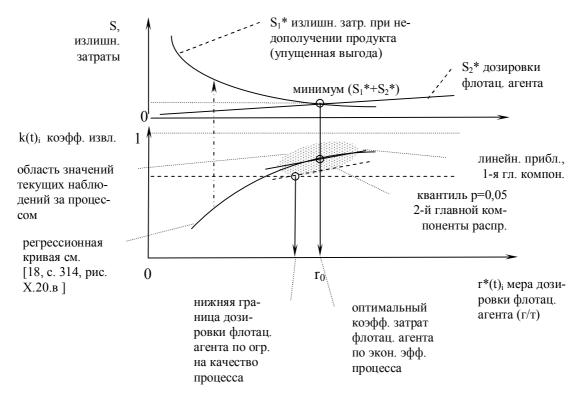


Рис. 31. Диаграмма управления процессом флотации

сунке (см. рис. 31). По сборе данных о процессе (содержания выделяемого вещества в сырье, в готовом продукте, периодический анализ; мера дозировки флотационного агента, потока обогащаемой руды, готового продукта), при стабилизации, в среднем, режима управления, определимы, статистически, показатели качества процесса по материальному балансу (мера обогащения, k) и функции затрат $S = S_1^* + S_2^*$. Нижняя граница меры дозировки флотационного агента определима статистически по заданной нижней границе коэффициента извлечения (с использованием статистического метода главных компонент). Оптимум дозировки флотационного агента определим по минимуму издержек S, функции стоимости таковы:

$$S_2 = Q_{\partial o3.\ py\partial bi.}\ (t) \cdot r *_{\partial o3.\ \phi \pi.\ ac.}\ (t) \cdot c_{cmoum.\ \phi \pi.\ ac.},$$
 $S_1 = \frac{Q *_{u36\pi.\ npod.}\ (t)}{1 - k_{u36\pi e^u.}(t)} \cdot c_{cmoum.\ npod.}\ ,$ где $Q_{\partial o3.\ py\partial bi}(t),\ \kappa c/ce\kappa,$ — мера потока руды во флотационный аппарат,

где $Q_{\partial o3.\ py\partial bi}(t)$, $\kappa z/ce\kappa$, — мера потока руды во флотационный аппарат, $r^*_{\partial o3.\ \phi n.\ az.}(t) = Q_{\partial o3.\ \phi n.\ az.}(t)$ /($Q_{\partial o3.\ py\partial bi}(t) \cdot v_0(t)$) $\cdot 1000$, z/m, — относительная мера дозировки флотационного агента,

 $Q_{\partial o3.\ \phi n.\ a2.}$ (t), г/сек, — мера потока флотационного агента в аппарат, $v_0(t)\in [0,\ 1]$, — доля выделяемого вещества в руде (результат периодиче-

ского анализа),

 $c_{\mathit{стоим.}\ \phi \mathit{л.}\ \mathit{ae.}}$, руб/г, — стоимость флотационного агента,

 $Q^*_{u_{36Л. npod.}}(t) = Q_{u_{36Л. npod.}}(t) \cdot v_1(t)$, $\kappa z/c$, — мера потока извлекаемого продукта (в пересчёте на чистый продукт),

 $Q_{uзвл. npod.}(t)$, $\kappa c/c$, — мера потока продукта из флотационной установки, $k_{uзвлеч.}(t) = v_I(t) \in [0, 1]$, — доля чистого продукта в готовом продукте (результат периодического анализа), мера извлечения вещества из руды.

 $c_{cmoum. npod.}$, $pyb/\kappa z$, — стоимость готового (100% чистого продукта).

Функция, определяющая общие издержки, S, определима как сглаживание случайных значений, интегральных средних за периоды между отбором

проб анализов (
$$t_n=2$$
 часа): $S_i*(t_j)=\frac{1}{t_j-t_n}\int_{t_j-t_n}^{t_j}S_i(t)\ dt$. Минимум издержек S

динамически, в текущем времени, определим, при изменении регулируемого параметра $r^*(t)$ методом сжимающих отображений. Таким образом, по минимуму текущих издержек определима оптимальная мера текущей дозировки флотационного агента (на 4-м уровне АСУТП ³⁶). Коррекция выполнения производственного плана реализуема отдельной процедурой (при коррекции текущего задания 4-го уровня, цеха, по учёту выпущенного продукта³⁷).

Задачи 4-го уровня информационной системы для оптимизации иных стадий технологического процесса (например, оптимизация процесса сушки готового продукта) решаются аналогично, посредством примерно такой же оптимизационной процедуры.

Аналогичным образом выстраиваемы информационные системы и для многих других промышленных процессов (вакуумной сепарации титана, сушки, хлорирования титаносодержащей шихты, получения формалина

 37 При выполнении условий соответствия товаропотока плану за отчётный период [$t_0 - t_n$, t_0]:

$$\int_{t_0-t_n}^{t_0} (f_{n_{7}} dt) - f_{\phi a \kappa m a}(t) dt \to 0$$
, при минимуме возмущений $\int_{t_0-t_n}^{t_0} (f_{n_{7}} dt) - f_{\phi a \kappa m a}(t) dt \to min$.

Задачи 6-го уровня, определения оптимальной нормы прибыли (0,3036... от объёма продаж, стационарная точка последовательности $x_{i+1}=1$ – $x_i^{x_i}$, при $n \to \infty$

 $x_n \to 0.3036..., x_0 \in [0, 1]$), описаны отдельно.

³⁶ Собираемая в текущем времени статистика по разным видам флотационных агентов, пригодна для заключений о преимуществах использования какого-либо из них.

и т. п. 38), с учётом конкретных особенностей каждого процесса.

§27. Процесс производства формалина и учёт старения катализатора.

Описано решение задачи оптимизации соотношения дозировки кислорода (относительно массопотока метанола), процесса получения формалина, по максимизации меры получения готового продукта. Указано на решение задачи оптимизации периода замены катализатора [95].

Оптимизация процесса получения формалина выполнима по определяющему фактору качества процесса — материальному балансу и критерию получения максимальной доли готового продукта от стехиометрически возможной величины [8]. Структура уровней системы стандартна соответственно общезначимой 6-уровневой структуры уровней АСУТП, поуровневое распределение задач автоматизации-информатизации таково:

1-й уровень (средства измерения, управления) — обеспечение измерения технологических параметров — массопотоков сырья: метанола, воды (на смешение с метанолом), воздуха (кислорода воздуха на окисление метанола), массопотока готового продукта и прочих технологических параметров: температурного режима агрегатов, массопотока воды на адсорбирование, уровня метанольно-водяной смеси в испарителе и т. д.

2-й уровень (контроллеры, схемы локальной автоматики) — обеспечение управления локальными контурами регулирования: поддержание заданных с 3—4-го уровней АСУТП значений массопотоков сырья (метанола, воды, воздуха), прочих массопотоков (воды на адсорбирование), заданного температурного режима работы агрегатов, определённого уровня в испарителе метанольно-водяной смеси и т. д.

3-й уровень (базы данных ЭВМ АРМ) — обеспечение наблюдаемости за всей совокупностью технологических параметров как в текущем времени, так и в виде графиков, сбор и хранение внешних данных (оцифровок данных анализов сырья: процентного содержания (по массе) метанола в метанольно-водной смеси, объёмного содержания кислорода в воздухе и доли чистого готового продукта формалина в готовом продукте, с привязкой к моменту времени отбора проб).

4-й уровень (оптимизация процесса в текущем времени при частич-

78

³⁸ Описанная методика построения систем применена для построения подсистемы оптимизации процесса в работах: Ардавичус В. Г. Автоматизация процесса получения формалина на ОАО "Метафракс" / дипломная работа, БФ ПГТУ, 2006 г.; Смирнов Е. А. Автоматизация процесса парополучения ТЭЦ-4 г. Березники / дипломная работа БФ ПГТУ, 2006 г.; Шварёв А. А. Автоматизация процесса производства кирпича на ОАО "Меакир", г. Березники / дипломная работа, БФ ПГТУ, 2006 г., см. также [8].

ном моделировании) — обеспечение автоматического расчёта соотношения дозировки метанола и воды в испаритель метанольно-воздушной смеси, обеспечение автоматического расчета меры дозировки воздуха по стехиометрии с определённым коэффициентом запаса (который зависит от вероятностной меры выхода готового продукта), обеспечение автоматического расчета выхода готового продукта от возможного стехиометрического значения, при организации программного процесса сбора статистики по вычисляемым и измеряемым параметрам автоматическое (в программе APM, ПЭВМ) (см. ниже).

5-й уровень (учёт и внутреннее планирование) — обеспечение учёта в текущем времени и за отчётные периоды (смена, день, неделя, месяц, квартал, год) материальных потоков сырья и готового продукта, а также отходов производства, учёт трудозатрат (отдельная экономическая задача, вне собственно автоматизации), учёт меры соблюдения плана по требованиям равномерности производства и совпадения исполнения плана с планами отгрузки готового продукта, учёт и сбор данных для определения себестоимости производства.

6-й уровень (привязка к внешним экономическим обстоятельствам): обеспечение учёта внешних цен и прогнозирования для определения оптимальной отпускной цены (из соображения 30,36...% меры прибыли от объёма продаж, и определения меры возможных внутренних капиталовложений.

Ограничения в применимости математических методов

Основные реакции процесса таковы [8], [13], [19]:

1.
$$CH_3OH + 0.5O_2 \leftrightarrow CH_2O + H_2O + 159098.4$$
 дж

2.
$$CH_3OH \leftrightarrow CH_2O + H_2$$
 - 83738 дж

3.
$$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O + 242834.4$$
 дж

Побочные реакции:

4.
$$CH_3OH + 1.5 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

5.
$$CH_3OH + O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$$

6.
$$CH_2O \rightarrow CO + H_2$$

7.
$$CH_3OH + H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$$

Протекают ещё и иные побочные реакции, в частности:

8.
$$CH_4 + O_2 \rightarrow CH_2O + H_2O$$
.

9.
$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

Реакция (8) образует цикл с реакциями (6) и (7), поэтому точно идентифицировать процесс по модели, описываемой линейными дифференци-

альными уравнениями, содержащей первые 7 реакций, маловозможно. Это также связано и с тем, что система реакций, содержащая циклы реакций (побочных продуктов), не описуема системой дифференциальных уравнений потому, что в этом случае аргументом непрерывной функции, описывающей молярную концентрацию вещества, являлась бы сама эта функция, что невозможно ввиду естественных ограничений математических функциональных способов описания процессов.

Следует отличать указанную невозможность того, чтобы аргументом непрерывной (дифференцируемой по параметру меры времени) функции являлась сама эта функция, от случая дискретных рекурсивных (конечно вычислимых) функций, применяемых в программировании.

Более подробно об ограничениях, действующих для данного случая, см. §9.

Описание модели процесса

По основным реакциям процесса (1–3), в стехиометрическом идеале, на *1 моль* метанола по стехиометрии получается *1 моль* формальдегида, однако в действительности доля получения готового продукта от стехиометрического соотношения меньше, чем единица, и определяется (при прочих равных условиях) мерой потока кислорода воздуха в реакторную установку, поэтому для максимизации выхода готового продукта поддерживается определённое мольное соотношение потоков в установку кислорода и метанола, об оптимальности этого мольного соотношения судят по косвенным признакам — анализам отходящих газов, содержащих продукты побочных реакций.

При этом процесс является (с точки зрения моделирования) неопределённым, т. е. число уравнений (взаимодействующих компонент и промежуточных продуктов реакций) больше числа дозируемых веществ, т. е. система линейных уравнений, при попытке линейно-алгебраического модельного описания, имела бы больше неизвестных, чем уравнений, была бы неопределённой; применение процедур идентификации объекта действенно только в ограниченной функционально-пространственной области эксперимента и не учитывает модельно непредсказуемого "старения" (уменьшения активности) катализатора, поэтому применимыми остаются только методы непосредственного измерения при доопределении информационных потоков и выявлении статистических (корреляционных) связей значащих факторов качества процесса (по материальному балансу) и управления (соотношение дозировки кислорода и метанола).

Более точный инструмент определения оптимума мольного отношения кислорода — это обеспечение наблюдаемости в текущем времени коэффициента материального баланса по готовому продукту (относительно стехиометрического максимума), поэтому доопределение системы управления процессом, для оптимизации по максимуму получения продукта, сводится к выявлению (в текущем времени при управлении процессом) корреляционной связи между мерой доли полученного продукта от максимально возможной и соотношением дозировки кислорода и метанола, с целью оптимизации меры подачи кислорода воздуха в реактор, для чего требуется организовать непрерывное измерение потока готового продукта.

Также по мере доли полученного продукта от максимально возможной определимо и состояние катализатора по более долговременной статистике.

Рассмотрим модель. Пусть

 $m(CH_3OH)(t)$, z/c,— мера массопотока метанола в установку,

 $M(CH_3OH)(t)$, моль/c,— мера молярного потока метанола в установку,

 $M(CH_3OH)$ г/моль, — молярная масса метанола,

$$M(CH_3OH)(t) = m(CH_3OH)(t) / M(CH_3OH)$$
(23)

Максимально возможный молярный поток готового продукта (по реакциям процесса 1–3, см. выше):

$$M_0(CH_2O)(t) = 1 \cdot M(CH_3OH)(t) \tag{24}$$

1 — стехиометрический коэффициент в реакциях (1, 2).

Действительный поток готового продукта подлежит измерению $m(CH_2O)(t)$, z/c, — мера массопотока формальдегида из установки, $M_1(CH_2O)(t)$, моль/c, — мера молярного потока формальдегида из установки,

 $M(CH_2O)$, г/моль, — молярная масса формальдегида,

$$M_1(CH_2O)(t) = m(CH_2O)(t) / M(CH_2O)$$
 (25).

Относительная мера получения продукта, $\mu(CH_2O)$, — отношение действительного молярного потока и максимально возможного по стехиометрии (отношение формул (25) и (24)):

$$\mu(CH_2O) = M_0(CH_2O)(t) / M_0(CH_2O)(t),$$
 где $\mu(CH_2O) \in [0, 1].$ (26)

Относительная мера дозировки кислорода воздуха от потока метанола определяется измеримым соотношением:

$$\mu(O_2 \mid CH_3OH)(t) = M(O_2) / M(CH_3OH)(t),$$
 (27)

где $M(O_2)$ моль/c,— мера потока кислорода воздуха, определяемая по результатам измерений АСУТП меры потока воздуха и вычислений (с учётом анализов воздуха на процентное содержание кислорода).

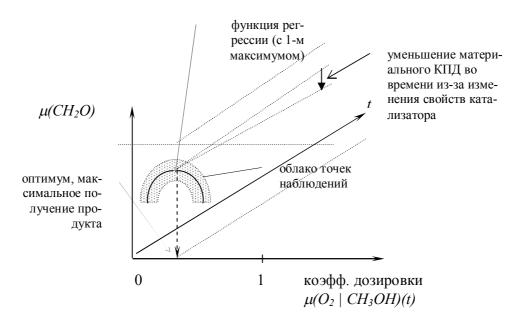


Рис. 32. Оптимизационная диаграмма процесса получения формалина

Для оптимизации дозировки воздуха достаточно организовать статистическую процедуру отображения данных об относительной дозировке, для определения (по скользящим средним) меры корреляционной (регрессионной) связи мер получения готового продукта и меры отношения дозировки кислорода:

$$regr(...)(t) = regr(\mu(CH_2O); \mu(O_2 \mid CH_3OH)(t))$$
 (28) с определением оптимума дозировки кислорода по максимуму выхода продукта, см. рис. 32.

К оптимизации периода использования катализатора

Определение доли получаемого продукта относительно максимально возможного (по стехиометрии процесса) значения позволяет определять оптимальный период замены катализатора как для процесса получения формалина, так и для некоторых других каталитических процессов, например, для процесса получения метанола, описанного в [1], где отмечено, что использование в процессе управления синтезом метанола системы, на 4-м уровне АСУТП (при использовании данных низших уровней) практически возможно вычислять «оценку производительности агрегата по метанолу сырцу» и, что «расчетные данные могут служить основой для оценки уровня <химической> активности катализатора синтеза».

Поскольку имеющиеся АСУТП получения формалина (метанола), далее — продукта, позволяют вычислять в текущем времени долю практически получаемого продукта метанола от теоретически возможной, то наблюдение по статистическим данным за долей получаемого продукта позволяет решать задачу о состоянии катализатора, для своевременной его замены (см. рис. 32, рис. 33).

Пусть $v_m(t)$ — коэффициент эффективности преобразования сырья в продукт (100% = 1), очевидно, что предельный период использования катализатора определяется тем моментом времени, когда стоимость недополученного продукта $c_i(t)$ (заштрихованная область) станет сравнима со стоимостью замены катализатора, имея данные о стоимости продукта легко организовать вычисление интеграла $c_i(t)$ в текущем времени в АРМ АСУТП:

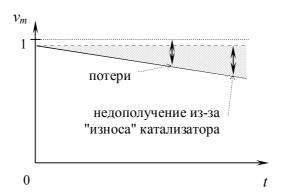


Рис. 33. График состояния катализатора

$$c_{i}(t) = \int_{t_{0}}^{t} (v_{m}(t_{0}) - v_{m}(t)) \cdot m(t) \cdot c(t) dt, \qquad (29)$$

где $v_m(t_0) - v_m(t)$ — разность между максимальным начальным (при загрузке нового катализатора) значением показателя эффективности и текущим во времени значением этого показателя (мера "недополучения" продукта), m(t) — функция меры массопотока готового продукта,

c(t) — функция меры стоимости продукта (изменчивой во времени ввиду изменчивости цен), t_0 — момент времени начала использования очередной загрузки катализатора.

Как только интегральная оценка меры стоимости недополученного продукта сравнится с мерой стоимости установки нового катализатора (стоимость катализатора + затраты на монтаж + потери продукта из-за остановки установки), $c(_{\text{смен. катал.}})$,

$$c_i(t) > c(_{\text{смен. катал.}}) \Rightarrow t = t_{\text{смен. катал.}},$$
 (30)

так и следует, из экономических соображений, этот катализатор заменять (более ранние сроки замены влекут излишние затраты средств на катализатор с излишними потерями продукта из-за временных остановок установки при замене катализатора; более поздние влекут излишние затраты на процесс, в связи с низкой степенью получения готового продукта из сырья при "передержанном" катализаторе).

Таким образом, выполнение расчетов имеющейся модели со статистической обработкой потока данных позволяет оптимизировать процесс относительно сроков замены катализатора.

Задача оптимизации процесса получения формалина, использующая обычный принцип вычислимости неподвижной точки оператора управления процессом, отличается от прочих аналогичных задач сложной формой регрессионной функции, однако способ расчета оптимального периода использования катализатора значим и для других каталитических процессов.

§28. Процесс получения алифатических аминов.

Описано решение задачи определения оптимальной (по вероятностной мере качества продукта) производительности ректора синтеза алифатических аминов [85].

В производстве алифатических аминов (AA) [28] полная аминизация сильно-жирных кислот (СЖК), при обработке их смесью водорода и азота под высоким давлением и определённой температуре на катализаторе, определяется, при прочих равных условиях избытком дозировки азотоводородной смеси над стехиометрическим соотношением реакции ³⁹. При достаточном же соблюдении заданного избытка азота основным параметром качества, определяющим пригодность продукта, является содержание алифатических аминов 1-й группы (AA1), не менее чем в 76,5%. Естественно, что при ограниченной производительности установки параметром управления, влияющим на качество продукта, является относительная мера дозировки исходного компонента (СЖК), относительно предельной производительности (или определимая в абсолютном значении — π/τ), т. е. имеется предел производительности продукта заданного качества. Ввиду не-

³⁹ Показатель качества наличия СЖК в готовом продукте не более 0,1% является в данном случае 1-м определяющим параметром качества процесса, ввиду того, что получение продукта с заданным содержанием АА (не менее %) в меньшей мере определяется указанным соотношением дозировки компонент. Параметр управления — соотношение дозировки СЖК и азото-водородной смеси.

полной детерминированности процесса качество продукта задаётся вероятностной мерой: пусть требуется получать качественный продукт ($\nu(AA1) > 76,5\%$) с вероятностью 95%, тогда задача разрешима статистическими методами анализа.

По методике, разработанной автором для анализа сложных химических процессов, с использованием данных экспериментов, проводившихся на п/о "Азот" посредством программного обеспечения, разработанного в ПГУ, был выполнен анализ указанной зависимости. Результаты анализа данных изображены на рис. 34, 35.

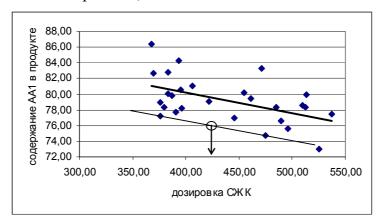


Рис. 34. Зависимость качества продукта от загрузки реакционного аппарата (неточное решение, метод регрессии)

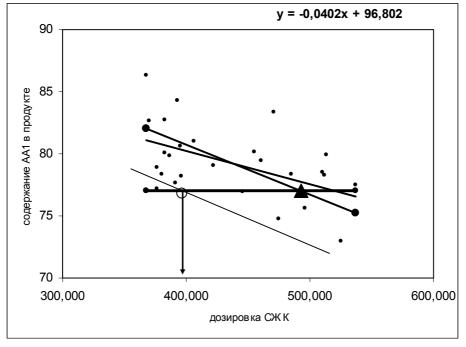


Рис. 35. Точное решение с применением метода главных компонент

Оптимальное значение меры дозировки СЖК для получения продукта с вероятностно гарантированным качеством (p = 0.95 получения продукта с v(AA1) > 76.5%) равняется, приближённо, не более 425 л/час (рис. 34), и, более точно, около 395 л/час (рис. 35).

Действительное решение подлежит уточнению по текущим данным о технологическом процессе.

В производственной практике определение параметров оптимального управления (которые зависят от прочих изменчивых параметров процесса) требуется производить в текущем времени, посредством встраивания в имеющиеся системы АСУ дополнительных программных модулей обработки потоков оцифрованных данных.

Дополнение.

§29. Некоммутативность диаграммы программного комплекса.

Постановка задачи статистически оптимального управления качеством сложных химико-технологических процессов и математическое обеспечение программных комплексов, решающих её были описаны выше, см. также [123], [124], [89]⁴⁰. Далее описываются структурные особенности этих программных комплексов при их категорном представлении.

Оптимизационная диаграмима

Пример полной оптимизационной диаграммы для задачи управления качеством процесса хлорирования титаносодержащих концентратов, описанной ранее в [89], приведён на рис. 20. Основным компонентом программного комплекса (работоспособным и в минимальном варианте) является часть, относящаяся к решению задачи 4-го уровня. В терминах теории категорий [52], [117] диаграмма этой части программного комплекса такова:

$$\begin{array}{ccc}
O \\
a \swarrow & c \\
M \xrightarrow{f} & P \\
b & \swarrow d
\end{array}$$

$$D \qquad (31)$$

где O — база данных результатов измерений и параметров управления, M — модельное представление параметров, P — перенормированное (относительно единиц подпространств состояний) представление параметров, D — пространство рекомендуемых параметров; отображения: a — модельное преобразование данных, c — проецирование на 3-мерное пространство состояний, f — перенормировка проекций, b, d — определение статистическим методом (по 2-мерной выборке) рассогласования модельной и статистически оптимальной величины параметра управления.

Легко видеть, что эта диаграмма некоммутативна ввиду наличия отношения перенормировки f, f — неединичное отображение, т. е. $ab \neq cd$, в связи с тем, что модель отличается от действительного объекта (процесса) и устройства измерения параметров имеют ограниченную точность.

Теорема 13 (о некоммутативности). Категорная диаграмма, вида (31), метода пространства состояний решения задачи управления на 4-м

 40 Основания существования решения (наличия неподвижной точки) указаны в [94].

уровне системы — некоммутативна. □

Некоммутативность диаграммы влечёт невозможность использования детерминистских методов управления (например, классических способов теории автоматического управления, использующих аппарат интегродифференциальных уравнений и преобразование Лапласа), применимых в иных случаях.

Сравнение с иными подходами к управлению

На самом деле измерения (наблюдения) не вносят полной определённости в параметры процесса, т. к., во-первых, имеются неизмеряемые факторы, во-вторых, точность измерений неидеальна, в-третьих, в каналах передачи и обработки информации возможны ошибки, в-четвёртых, для почти всех факторов — ненулевое время выполнения измерений. Так что предположение о том, что измерения вносят полную определённость, свойственное западной школе теории информации, указанное, например, в [39]: «Согласно Сэвиджу⁴¹ определяющие наблюдения не играют важной роли в статистической теории именно потому, что статистика имеет дело главным образом с неопределённостью, а в результате наблюдений, полностью определяющих рассматриваемые явления, исчезает всякая неопределённость», мягко говоря, не соответствует действительности.

Однако примеры методов управления, использующих предположения о полной определённости, таковы. В [126] «развивается понятие симметрий для общей гладкой управляемой системы, допускающей описание с помощью коммутативной диаграммы

$$\begin{array}{cccc}
B & \xrightarrow{f} & TM \\
\pi & \swarrow & \pi_M \\
M & & & & \\
\end{array}$$
, (32)

где M — гладкое многообразие (фазовое пространство системы), f — гладкое отображение системы, π : $B \to M$ — гладкое векторное расслоение, π_M — единственная проекция TM на M.» В [129] «для наблюдаемой системы (аксиомы) вход-выход $\Sigma = \langle M, A, Y, C \rangle$ вводится понятие частичного наблюдателя..., гладкое управление системы $\langle W, K, Y \rangle$, допускающее описание в виде коммутативной диаграммы (см. [126]), такое, что существует гладкое отображение φ : $M \to Y$, такое, что диаграмма

88

⁴¹ Savage L. J., The foundation of Statistics, J. Wiley & Sons, New York, 1954.

$$M \xrightarrow{A} TM$$
 $(\varphi, C) \downarrow \qquad \downarrow \varphi *$
 $W \times Y \xrightarrow{K} TW$ — коммутативна».

Видно, что и в случае использования классических методов теории управления [43], [58], диаграммы контуров управления также коммутативны.

Но если как признак управляемости системы выделяется коммутативность категорной диаграммы процесса управления, как в вышеприведённых примерах, то область применения таких детерминистских методов управления ограничена уровнями локальных контуров управления (уровнями 1–2 в общей 6-уровневой структуре АСУТП, АСУП, см. рис. 4). Задачи с неполной определённостью (задачи уровней 3–4, оптимального управления качеством) этими методами решить невозможно.

Таким образом, показанная некоммутативность структуры программного комплекса обусловлена естественной неполнотой модельного описания процесса (объекта), и связана также с дополнительной мерой неопределённости, возникающей из-за ограниченной точности устройств измерения параметров системы. Из некоммутативности процедуры управления очевидным образом следует невозможность детерминистского решения задачи управления (на уровнях 3—4), в отличие от задач более низших уровней (1—2). Поэтому при учёте неполной определённости (неполной детерминированности) основная особенность категорной диаграммы обработки данных при решении указанной выше задачи — некоммутативность. Практически эта некоммутативность реализуема в программных продуктах, предназначенных для решения задач управления качеством [130], [131], [132], [133], [134].

§30. Задачи 5-го уровня управления.

На основании интерпретации основной теоремы о размерности вполне упорядоченного объекта описаны модели пространства состояний экономической системы при решении задачи оптимизации избытка (запаса) ресурсов, рассмотрены примеры задач: определения оптимума производственных мощностей и управления избытком меры запаса величины максимального объёма перевозок, по отношению к действительному.

Классы задач управления

Достижение оптимума (экстремума) управления (однозначное и полностью определённое) возможно лишь во вполне упорядоченном пространстве состояний системы, по основной теореме о размерности [98], размер-

ность вполне упорядоченного пространства состояний равна или меньше 3-х. Описание систем управления при 3-мерности пространства состояний (1. мера качества, 2. управляющий параметр, 3. экономический параметр) выполнено в предыдущих параграфах. При 2-мерности пространства состояний возникает дополнительная степень свободы, и для доопределения такой экономической задачи управления необходим заданный план выработки (параметр 2-го вида, функциональный), этот класс задач описан в ниже. Сокращение размерности задачи до 1-мерной, решение задачи оптимального перераспределения экономических ресурсов в бюджетном механизме (семьи, предприятия, государства) имеет уже две избыточные степени свободы, которые доопределяются не только планом потребностей, жёстко ограниченных снизу минимально необходимой нормой потребления, но и шкалой ценностей потребностей, параметрами 3-го вида, вероятностными, требующими в определении явного присутствия самого человека (основное логистическое уравнение, давая количественную оценку меры высвобождаемого общественно-необходимого времени, не указывает на качество производимых предметов и качество перераспределения высвобожденной меры времени, см. [115]). Кроме того, 2-мерное пространство абсолютно ориентировано [98], это означает, что прогнозы на 2-мерии корректны, а значит, и определение нормы плана на 2-х-мерии корректно.

Постановка 2-х-мерной задачи оптимального управления

Если 3-мерная задача управления качеством продукции решалась посредством 4-го, 5-го и 6-го уровней информационной системы, то 2-мерная задача определения оптимума запаса ресурсов использует уже только 5-й и 6-й уровни (1-мерная задача, указанная выше, использует только 6-й уровень системы).

Содержательно задача такова: пусть имеется некоторое производство, причём основные фонды (производственные мощности) стареют и производительность уменьшается, введение новых мощностей требует новых затрат, задача заключается в определении необходимого минимума запаса ресурсов (производственных мощностей, основных фондов) для обеспечения заданной производительности на некоторый период не менее, чем плановая (с заданной мерой вероятности), при минимизации экономических издержек.

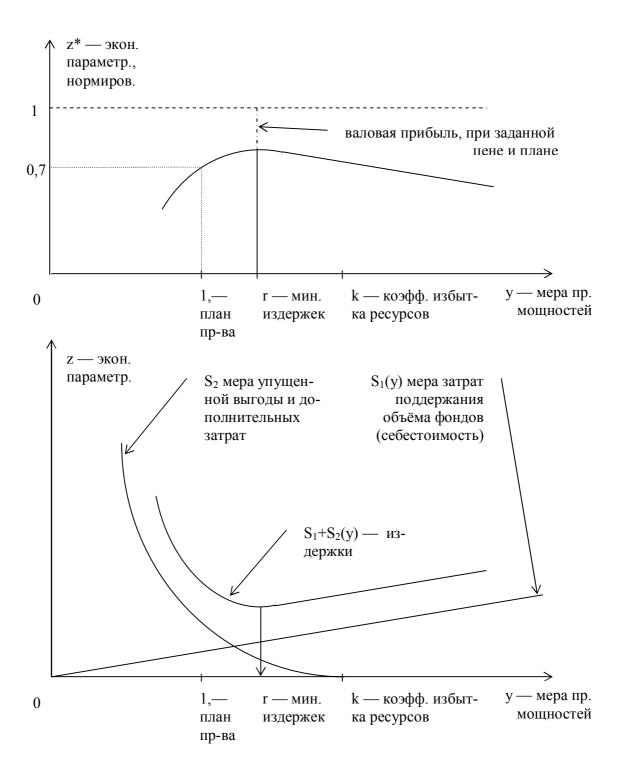


Рис. 36. Диаграмма пространства состояний 2-х мерной системы

При соответствии производимого товара разделам шкалы ценностей

решение этой задачи существует (ввиду существования решения основного логистического уравнения) в целом по отрасли производства, и решение это конечно вычислимо (см. соотв. теоремы в [104]). Тогда, при соответст-

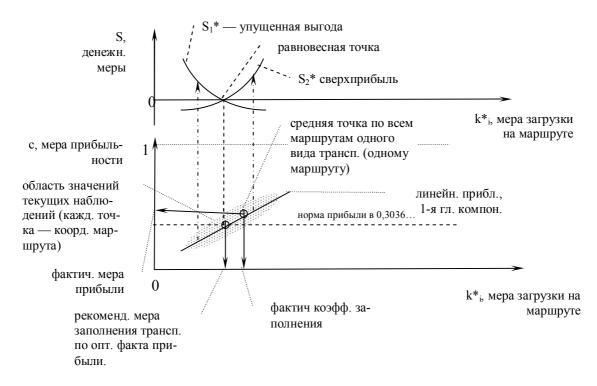


Рис. 37. Статистическая диаграмма управления гортранспортом

вующем нормировании пространства состояний, основная диаграмма такова, как указано на рис. 36. При решении задачи линия S_2 перемещается вдоль оси у так, чтобы минимум издержек приходился на I, заданный планом объём производства. Мера упущенной выгоды S_2 при уменьшении объёмов производства оценивается с заданной вероятностью р, по наблюдениям за статистикой уменьшения объёмов производства.

Оптимизация управления гортранспортом

Задача управления гортранстпортом — 2-мерна, пространство состояний состоит из 2-х измерений: 1. мера заполнения транспортных единиц (величина, обратная к избытку задействованных перевозочных ресурсов), 2. экономический параметр — мера прибыльности. Особенностью этой задачи является то, что экономический оптимум определим на заданном расписании движения транспорта по действительно измеримым параметрам перевозок.

Минимизирующее конфликты решение задач экономического

управления требует полного моделирования, т. е. описания системы в целом, как состоящей из множества требующих согласованного взаимодействия подсистем⁴². Полное моделирование предполагает структурирование системы.

В информатизации систем управления транспортом системы, состоящие из двух уровней (системы составления расписаний), известны [23; 27] для описания процесса наблюдения за характеристиками качества процесса перевозок «объект управления имеет уже четырёхуровневую структуру» [23, с. 59], однако полное описание экономической системы с процессом прогнозирования и определения оптимальной ценовой политики требует 6-уровневой организации. Структура системы управления городским общественным транспортом, соответствующая общезначимой 6-уровневой организации и включающая в себя задачи низших уровней, описанная отчасти ранее [23; 27; 80], такова:

- 1-й уровень. Транспортная единица.
- 2-й уровень. Единичный маршрут (определение коэффициента заполнения, ежедневно, и ежедневной выручки).
- 3-й уровень. Отдельный вид транспорта.
- 4-й уровень. Отдельная хозяйственная единица (отдельное транспортное предприятие, цех, организующая процесс перевозок); (определение оптимального распределения плотности транспортного потока, расписания для каждого вида транспорта).
- 5-й уровень. Экономический учёт издержек при организации перевозок, в т. ч. основных фондов, при заданном плане перевозок и ценовой политике.
- 6-й уровень. Прогнозирование и планирование объема перевозок и ценовой политики.
- Первые два уровня определение материальных характеристик процесса перевозок (среднего коэффициента заполненности транспорта пассажирами).

Вторые два уровня — организация во времени транспортного потока. Третьи два уровня — определение экономических характеристик: себе-

⁴² Неполные модели частных подсистем хотя и обозначают критерии оптимальности, но не предполагают достижения состояния экономической бесконфликтности согласованных действий.

Идентификация систем действенна в малой области наблюдения изменчивости параметров, поэтому при широкой изменчивости действительных состояний систем корректно малоприменима.

стоимости (прибыли).

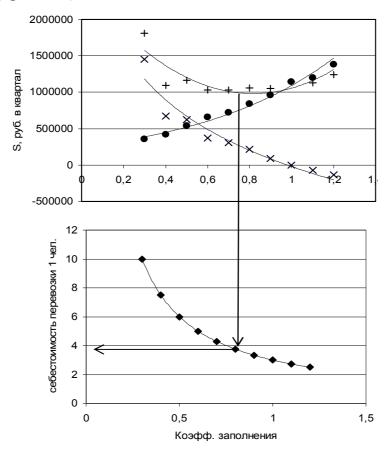


Рис. 38. Пример обработки данных

В пространстве состояний системы полное малопараметрическое описание внешних характеристик системы заключается в описании двух параметров (нижних и верхних уровней системы):

- 1) коэффициента заполнения транспорта пассажирами;
- 2) меры прибыльности транспортных предприятий;

Расписание транспорта и описание маршрутов — внутренняя (многопараметрическая) характеристика системы, определяемая конкретными обстоятельствами организации перевозок, от которой, однако, опосредованно зависят два указанных легко наблюдаемых внешних параметра.

По наблюдаемой величине меры качества перевозок (меры загрузки транспорта) статистически определим оптимум плотности потока транспортных единиц на маршруте (для каждого маршрута в отдельности), оптимизационная динамическая диаграмма примерно такова, как на рис. 37.

Для каждого маршрута определимая (за день, по наличным техниче-

ским условиям) мера качества использования транспортных единиц — это отношение меры возможных перевозок R_0 к мере действительно произведённых — R_I . Мера возможных перевозок на единице транспорта R_0 определима как произведение количества полуоборотов единицы транспорта маршрута за день (O) на ёмкость транспортной единицы (v): $R_{\theta} = O \cdot v$. Мера (приблизительная) действительных перевозок определима как отношение выручки на единице транспорта маршрута (S) к цене билета (C): $R_1 = S/C$ (в 1-м приближении — оценка количества перевезённых пассажиров, корректируемая при учёте количества проданных проездных билетов). Отношение мер R_0 и R_1 — мера качества, мера загрузки транспорта: $k = R_0/R_1$. Для каждого *i*-го маршрута определимы средние за день величины $k_i^* = R_0^*/R_I^*$, а также мера прибыльности C_i , с учётом полной себестоимости (включающей себестоимость ремонтов)⁴³. Состояние каждого і-го маршрута, в двухмерном пространстве состояний системы, изобразимо точкой с координатами (k^*_i, C_i) . Общее состояние системы (каждой из множества систем, отдельных предприятий) определимо в первом приближении как среднее (соответствующего) двухмерного распределения⁴⁴.

Оптимум ценовой политики определим как оптимум достижения стационирующей нормы прибыли в 30,36% от денежного объема продажи услуги (от выручки), см. [73].

Таким образом, полным моделированием системы, при малопараметрическом (2-параметрическом) изображении пространства состояний системы, обеспечиваемо согласованное (при одинаковой, общеэкономически значимой политике определения нормы прибыли) бесконфликтное управление системой в целом 45.

Пример обработки действительных данных. При анализе бухгалтерской отчетности и внутренней статистики троллейбусного предприятия конкретные значения коэффициентов в статистически определимых функ-

.

 $^{^{43}}$ В прибыль же вносятся такие показатели, как зарплата, налоги, акцизы, дивиденды и т. п.

⁴⁴ В более сложном случае как взвешенное среднее, где веса — относительные коэффициенты фондоёмкости эксплуатации каждого маршрута (очевидно, что стоимость ремонтных издержек из-за географических и прочих особенностей (перепад высот) одних маршрутов может быть большей, чем других).

⁴⁵ Целостное описание системы управления гортранспортом (при разной прибыльности отдельных маршругов и оптимальной средней прибыльности предприятия) сходно с описанием большой системы государственной экономики с разной мерой прибыльности отдельных предприятий, но среднеоптимальной общей мерой прибыльности, обеспечивающей стационарность (безынфляционность) денежного оборота.

циях оценочно таковы, как на рис. 38

В случае наличия нескольких видов транспорта задача тарификации решаема для каждого вида транспорта отдельно. А задача определения оптимальных квот на использование того или иного вида транспорта решаема из соображений наименьших совокупных издержек по обоим видам транспорта.

Анализ в новых условиях требует нового статистического анализа, поэтому целесообразной представляется создание внутри информационной системы управления транспортным предприятием автоматизированной подсистемы сбора статистики для решения в текущем времени задачи об оптимальной величине тарифов на проезд (для своевременного принятия управленческих решений).

Используемые математические методы достаточно просты для их массового воспроизводства и инструментального использования во множестве пассажирских транспортных предприятий.

Оптимизация управления запасом производственных мощностей

В обычном случае управления запасом производственных мощностей, будь это химико-технологическое производство, или иное, или добывающая отрасль (например, нефтедобыча; задача в этом случае — определение избытка введённых в действие добывающих мощностей, скважин, по отношению к плану поставок), диаграмма определения оптимума такова, как на рис. 36.

Сложность в этом случае представляет собой определение функции упущенной выгоды, требующей анализа подробной статистики экономических параметров формирования основных фондов и анализов рисков штрафных санкций за невыполнение плана поставок.

При упрощении анализа, в относительной форме — анализ отношения затрат на единицу выпущенной продукции, образующего две легко конструируемые функции: S^*_I — мера относительных затрат на выпуск определённого планом количества продукции при избыточной величине введённых в готовность мощностей (функция существует правее 1), и S^*_2 — мера упущенной выгоды на единицу выпущенной продукции, равная величине стоимости недополученной продукции и дополнительных затрат, отнесённой к величине стоимости выпущенной продукции на некотором количестве производственных мощностей, функция S^*_2 также имеет доверительный интервал, определяемый вероятностной мерой снижения производительности, выбытием производственных мощностей за отчётный период, относительно имевшихся на начало периода; диаграмма аналогич-

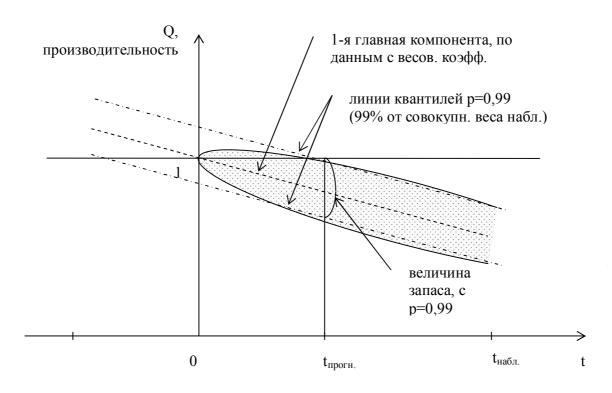


Рис. 39. Статистическая диаграмма прогноза запаса ресурсов

на рис. 36.

Однако в простейшем случае при линейности функций снижения производительности существует простой вероятностный способ прогнозирования величины запасов ресурсов по статистике производительности отдельных участков, определение с заданной вероятностью, по статистике снижения производительности отдельных единиц (ежемесячные данные) за некоторый период (год—два), требуемой величины избытка мощностей. Примеры конкретных задач: установки со старением катализатора, нефтедобывающие объединения.

Статистическая диаграмма определения оптимума запаса ресурсов приведена на рис. 39. Статистика наблюдений производительности за промежуточные отчётные периоды такова, что каждому наблюдению каждой установки за какой-либо момент времени присваивается весовой коэффициент (меньше единицы), равный отношению измеренной производительности к сумме всех анализируемых мощностей, и метод главных компонент применяется к наблюдениям с весовыми коэффициентами. На рис. 39 указан вариант прогноза при неизменном плане, в случае изменения плана выпуска в k раз по отношению к аналогичному периоду анализа данных,

величина запаса ресурсов корректируема на коэффициент $k, b^* = b \cdot k$.

В случае нелинейных зависимостей снижения производительности во времени требуются более адекватные методы, например, модификация метода главных компонент для криволинейной системы координат (в плоском случае).

Описанный класс задач статистически оптимального управления имеет широкое приложение, изложенная отдельно доказанность теорем существования и вычислимости решения позволяет обоснованно подходить к конструированию частей информационных систем управления, соответствующих 5-му, 6-му уровням в общей структуре информационных систем управления производством.

§31. Обзор определений структуры информационной системы.

Авторы и разработчики систем АСУТП выстраивают системы управления, выделяя в них, прежде всего, аппаратные уровни.

Например, АСУТП стана 350 на Оскольском электрометаллургическом комбинате [16]:

- 1-й уровень приборы и средства измерения и управления некоторого участка, объединённые на следующем уровне;
- 2-й уровень промышленные контроллеры (ЭК-2000),
- 3-й уровень ПЭВМ с программным наполнением (операционная система и программа автоматизированного рабочего места),
- 4-й уровень об организации локальных вычислительных сетей в статье не упомянуто.

Конкретно об этой АСУТП писали следующее:

(1-й уровень) «Информация с первичных датчиков (преобразователей) поступает на универсальные микропроцессорные контроллеры ЭК-2000 в виде токовых сигналов на соответствующие АЦП, а также в виде дискретных входных и выходных сигналов. <...>» [16, с. 44].

Текущие значения параметров отображаются на информационных панелях [16, с. 44].

- (2-й уровень) Как указано в статье [16, с. 45]: «Регулирующие контуры построены на базе программной функции и реализованы средствами программного языка контроллера».
- (3-й уровень) «С контроллеров <оцифрованные> значения параметров передаются на операторские станции по последовательному интерфейсу RS-485 <...>. <...> На операторских станциях представлена вся информация о текущих значениях контролируемых параметров в цифровом и графическом виде» [16, с. 44].

Российские производители оборудования осознают такую же структуру уровней сложности систем управления [56]:

1-й уровень, средства управления и измерения.

Иерархическая структура химико-технологической системы

Ступень иерархии	Технологическая основа	Технологи- ческая задача	Показатели эффективнос- ти функцио- нирования	Задача управления	Обогаще- ние ин- формации
Нижняя ступень	Типовой процесс химической тех- нологии (аппарат)	Физико-хи- мическое воздействие на техноло- гический поток	Коэффици- ент полезного действия и т. п.	Стабилизация и оптимизация технологичес- ких режимов	Струк- турное
Ступень редняя	Химическое производство (цех) продукта или полупродукта	Выпуск заданной продукции в соответст- вии со стандар- тами (тре- бованиями)	Расходные нормы и т. п.	Оптимизация производитель- ности по мини- муму матери- альных и энер- гетических затрат	Статис- тическое
Верхняя ступень	Химическое предприятие (комбинат)	Выполнение производ- ственного плана	Себестои- мость, прибыль, и т. п.	Оптимизация технико- экономических показателей	Семанти- ческое

Рис. 40. Пример качественного структурирования системы по [24]

«Датчики <...>, исполнительные механизмы <...>» [56, с. 7], Этому уровню сообразен 1-й уровень, упомянутый в главе 1.

2-й уровень — контроллерный, уровень управления. (Этому уровню управления сообразны упомянутые в главе 1 2-й и 3-й уровни).

Местные «приборы управления механизмами и арматурой»

«Промышленные контроллеры» [56, с. 7].

3-й уровень (программный). (Этому уровню соответствует упомянутый в главе 1 4-й уровень)

«Промышленные компьютеры <...>, Scada-системы <...>, средства связи с уровнем АСУП.» [56, с. 8].

Об уровне локальных вычислительных сетей в статье [56] не упомянуто.

Следует признать обозначенную структурную организацию аппаратных уровней (1-3) автоматизированной системы управления независимой от конкретной реализации, в достаточной степени общезначимой.

«В структуре любой АСУТП можно условно выделить уровни:

- <1> нижний (оборудование КИП);
- <2> контроллерного оборудования;
- <3> КТС APM оператора» [11, с. 15] (упоминания об уровне локаль-

ных сетей в статье [11] отсутствуют).

Однако ещё в 60-е гг. при построении систем управления качеством химико-технологического процесса выделяли іі уровня управления: і-й уровень — уровень локальных контуров, поддержания технологических параметров процесса (уровни 1, 2 системы), іі-й уровень — уровень принятия технологических решений (уровень 3 системы, аппаратный; уровень 4 системы — информационный, требующий присутствия человека оператора). На самом же деле помимо технологических решений принимаются и экономические решения ііі-й уровень управления, т. е. имеются уровни учёта (5-й уровень, учёт исполнения плана, и 6-й уровень — прогнозирования, формирования цен, принятия экономических решений), наличие этих уровней очевидно из практической организации работы промышленных предприятий ⁴⁶, см. также пример качественного структурирования, описанный ещё в 70-е гг. (рис. 40).

_

⁴⁶ Как отмечалось в практических работах по созданию системы управления процессом вакуумной сепарации губчатого титана, система управления содержит 3 агрегированных уровня, і-й уровень — регуляторы, іі-й уровень — уровень технологического управления (качеством), ііі-й уровень — уровень технико-экономического управления (см. [34], [35]).

Послесловие

Кроме процессов варки картофеля, автор впервые столкнулся с необходимостью управления качеством химико-технологического процесса в 1998 году при участии в пуско-наладке установки по производству диоксида титана. Обнаруженные автором ранее в начале 90-х гг. основания 6-уровневого структурирования самосознания позволили увидеть их и в действительной структуре промышленных социально-информационных систем. Доказанная чуть позже (около 2001 г.) теорема о размерности и затем теорема о суперпозициях (2010 г.) позволили обосновать метод управления качеством со стороны выбора размерности пространства состояний. Существование неподвижной точки решения вытекало из основного логистического уравнения, полученного автором в 2002 г.

Содержание приложений, описанных в этой книге, ограничилось решением задач 4-го уровня (технологического управления качеством).

Отзывы о содержании книги можно направлять автору на адрес электронной почты chechulinvl@mail.ru

Список литературы

- 1. Аветисов А. К., Волин Ю. М., Зыскин А. Г., Островский Г. М., Шуб Ф. С., Родин Л. М., Калиниченко Ф. В. Компьютерная методика анализа технологических параметров агрегата синтеза метанола // Химическая промышленность. 2001. №11. С. 16–22.
- 2. *Адян С. И.* К проблеме тождества в ассоциативных системах специального вида // Доклады АН СССР. 1960. Т. 135. №6. С. 1297–1300.
- 3. Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика в 3-х т. М.: Финансы и статистика, 1989.
- 4. *Айвазян С. А., Мхтитарян В. С.* Основы эконометрики. М.: Юнити, 2001.— 656 с.
- 5. Алесковский В. Б. Путь разработки технологии, не вредящей природе // Журнал прикладной химии. 2002. Т. 75, вып. 5. С. 706–713.
- 6. Андреев Е. А., Мальшин В. М., Кропачев В. К. Теплофизические исследования процесса вакуумной сепарации губчатого титана // Вакуумные процессы в цветной металлургии. Труды І-ой Всесоюзн. конф. по теор. вакуумн. проц. и их примен. в пр-ве цв. и редк. металлов. г. Чимкент, 1969 г., АН КазССР, Мин. цв. и НТО цв. мет КазССР, Алма-Ата: Изд-во «Наука» КазССР, 1971. С. 166–170.
- 7. Андреев Н. И. Теория статистически оптимальных систем управления, М.: Наука, 1980.—416 с.
- 8. *Ардавичус В. Г.* Автоматизация процесса получения формалина / дипломная работа. ПермГТУ БФ, Березники, 2005.
- 9. *Байбеков М. К., Попов В. Д., Чепрасов И. М.* Производство четырёххлористого титана. М.: Металлургия, 1987.— 129 с.
- 10. Байбеков М. К., Попов В. Д., Чепрасов И. М. Магниетермическое про-изводство губчатого титана, М.: Металлургия, 1984.— 96 с.
- 11. *Бальцер С. К., Красных В. Л., Наумов А. В., Фролов А. А.*, Опыт разработки и внедрения АСУТП подготовки нефти // Промышленные АСУ и контроллеры. 2002. №3. С. 14–18.
- 12. *Барендрегт X*. Лямбда-исчисление, его синтаксис и семантика / пер с. англ. Минц Γ . Е. М.: Мир, 1985.— 606 с.
- 13. Большая Советская энциклопедия, 3-е изд., М.: Советская энциклопедия, 1974—1981. (ст. «Формалин»)
- 14. Баталов В. А. Автоматизация процесса сушки карналлита / дипломная работа. БФ ПГТУ, Березники, 2006.
- 15. Белая Т. И., Чистякова Т. Б. Математическая модель процесса пуска

- установки каталитического риформинга ядро интеллектуального тренажёра // Химическая промышленность, Т. 80. 2003. №2(93). С. 41–45.
- 16. *Бекасов В. Г., Иванов А. Н., Терлецкий М. Ю.* Применение Scada-пакета Fix-32 на Оскольском электорометаллургическом комбинате. // Промышленные АСУ и контроллеры. 2002. №2. С. 42–46.
- 17. *Бурбаки Н*. Теория множеств / ред. пер. с фр. Успенский В. А., М.: Мир, 1965.— 458 с.
- 18. Галургия. Теория и практика / ред. д. т. н. Соколов И. Д. Л.: Химия, Лен. отд., 1983.— 368 с.
- 19. Гороновский И. Т. и др. Краткий справочник по химии. Киев: Наукова думка, 1974.—992 с.
- 20. Данилов О. Л., Леончик Б. И. Экономия энергии при тепловой сушке, М.: Энергоатомиздат, 1986.— 136 с.
- 21. *Денисов С. И.* Электротермия титановых шлаков. М.: Металлургия, 1970.— 168 с.
- 22. Думанский Н. Н. Автоматизация процесса сушки КС1 / дипл. работа, БФ ПГТУ, Березники, 2006.
- 23. *Ембулаев В. Н.* Описание задачи координации управления транспортной системой города // Известия РАН. Серия «Теория и системы управления». 2005. № 6. С. 159–162.
- 24. Жаворонков Н. М., Кафаров В. В., Перов В. Л., Мешалкин В. П. Новые принципы анализа и синтеза химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. 1970. Т. IV, №2. С. 152–167.
- 25. Затонский А. В. Модель теплового состояния аппарата сепарации губчатого титана // Наука в решении проблем Верхнекамского промышленного региона (сб. научн. трудов). Вып. 1. Березники, филиал Перм. гос. техн. ун-та, 1998. С. 47–59.
- 26. *Захаров Ю. А. и др.* Система автоматического управления процессом сепарации губчатого титана // Цветная металлургия. 1978. №7. С. 57–59.
- 27. *Затонский А. В.* Составление и оптимизация расписания движения общественного транспорта // Сб. тр. конф. «Молодежная наука Прикамья», при ПГТУ. Пермь, 2000. Т. 1. С. 96.
- 28. Исследование процесса синтеза высших алифатических аминов / Отчёт о НИР п/о "Азот", Березники, 1988.— 19 с.
- 29. Исторический материализм / под ред. А. Д. Макарова. М.: Изд-во ВПШ и АОН, 1963.— 350 с.
- 30. *Кирин Ю. П. и др.* Минимизация длительности процессов сепарации титана в АСУТП // Цветные металлы. 1983. №1. С. 51–54.
- 31. Кирин Ю. П., Затонский А. В., Беккер В. Ф., Бильфельд Н. В. Критерии

- окончания процесса вакуумной сепарации губчатого титана⁴⁷ // Наука в решении проблем Верхнекамского промышл. региона. Сб. научн. тр. БФ ПГТУ. Вып. 4, Березники, 2005. С. 262–267.
- 32. Кирин Ю. П. Идентификация аппарата вакуумной сепарации губчатого титана как объекта управления температурой // Там же. С. 123–127.
- 33. *Кирин Ю. П.* Расчёт параметров многоканального двухпозиционного регулирования температуры процесса сепарации губчатого титана // Там же. С. 116–122.
- 34. *Кирин Ю. П. и др.* Современные направления совершенствования и развития производства губчатого титана // Титан. 2003. №2 (13). С. 11–16.
- 35. *Кирин Ю. П., Протасов Ю. А.* Синтез многоуровневой системы управления процессом вакуумной сепарации губчатого титана // Сб. тезисов докл. обл. науч.-техн. конф. «Системы управления производством и социально-экономическое развитие Верхнекамского региона», 1998. С. 65–67.
- 36. *Кирин Ю. П. и др.* Принципы построения двухуровневой АСУ процессами сепарации губчатого титана // Цветная металлургия. 1983. №13. С. 31–35.
- 37. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1989.— 624 с.
- 38. Корн Γ ., Корн T. Справочник по математике: для научных рабюотников и инженеров / пер. с англ., ред. Араманович И. Г. М.: Наука. 1977.— 832 с.
- 39. *Кульбак С.* Теория информации и статистика / пер. с англ., ред. *Колмо-горов А. Н.* М.: Наука, 1967.— 408 с.
- 40. *Кухлинг X*. Справочник по физике. М.: Мир, 1982.— 520 с.
- 41. Лаврентьев М. И., Савельев Л. Я. Теория операторов и некорректные задачи, Новосибирск: Изд-во ин-та математики РАН, 1999.— 702 с.
- 42. *Лисицин Н. В.*, *Дрогов С. В.*, *Кузичкин Н. В.* Расчёт материального баланса нефтеперерабатывающего предприятия // Химическая промышленность. 2003. Т. 80. №2 (87). С. 35–45.
- 43. *Лукас В. А.* Теория автоматического управления. М.: Недра, 1990.— 416 с.
- 44. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968.— 472 с.
- 45. *Мальцев А. И.* Алгоритмы и рекурсивные функции. М.: Наука, 1986.— 368 с.
- 46. *Марков А. А.* Невозможность некоторых алгорифмов в теории ассоциативных систем. часть 1 ДАН СССР, 1947, Т. LV, №7, С. 587–590; часть 2 ДАН СССР, 1947, Т. LVIII, №3, С. 353–355.

_

⁴⁷ Обзор инженерно-технически предлагавшихся критериев.

- 47. Математическая энциклопедия: в 5-и т. М.: Советская энциклопедия, 1977–1985.
- 48. *Нагорный Н. М.* К усилению теоремы приведения теории алгоритмов // Доклады Академии Наук СССР, 1953. Т. 90. №3. С. 341–342.
- 49. *Новиков П. С.* Об алгоритмической неразрешимости проблемы тождества слов в теории групп // Труды матем. ин-та АН СССР им. Стеклова В. А. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 44. С. 1–144.
- 50. Новиков С. П., Бурков В. Н. Теория активных систем. М.: Синтег, 1999.
- 51. *Носов Г.А.*, *Бубенцов В.Ю*. Концентрирование водных растворов методом адиабатной кристаллизации // Химическая технология. 2005, №8, С. 43–47.
- 52. Общая аглебра: в 2-х т. / *Мельников О. В., Артамонов В. А. и др.*, общ. ред. Скорняков Л. А. М.: Наука, 1990–1991. 592+480 с.
- 53. Организация и управление наукой и техникой / авт. коллектив стран членов СЭВ: Бенев Б., Денев Д. (НРБ, Болгария), Гликман П. (ПНР, Польша), Гареев В. М., Семенцов С. П. (СССР), общ. ред. Зайцев Б. Ф. М.: Прогресс, 1987-296 с.
- 54. Островский Γ . М., Волин Ю. М. Методы оптимизации химических реакторов, М.: Химия, 1967.— 248 с.
- 55. Першина Л. А. Возрастная психология. М.: Академический проект, 2004. 256 с.
- 56. *Плескач Н. В., Блохинцев Е. А.* Средства, системы, инжиниринг для АСУТП // Промышленные АСУ и контроллеры. 2002. №12. С. 7–10.
- 57. *Подосетник В. М.* К вопросу о ступенях процесса познания истины // Вопросы философии. 1954. №5. С. 77–81.
- 58. *Попов Е. П.* Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1989.— 304 с.
- 59. Прокопенко М. Н. Аппаратная реализация АСУ процессом сушки керамического кирпича // Промышленные АСУ и контроллеры. 2006. №7.
- 60. *Пугачёв В. С.* Условно-оптимальное управление // Доклады АН (России). 1993. Т. 330. №6. С. 710–712.
- 61. Пьянкова Е. С. Исследование методов статистического анализа в экономических и технологических объектах: магистер. дисс. ПермГУ, г. Пермь, 2007. 60 с.
- 62. Резниченко В. А., Устинов В. С., Карязин И. А., Халимов Ф. Б. Химическая технология титана. АН СССР, Ин-т металлургии им. Байкова А. А., М.: Наука, 1983.— 248 с.
- 63. *Сергеев В. В., Галицкий Н. В. и др.* Металлургия титана. М. 1971.— 320 с.
- 64. Советская химическая наука и промышленность за 50 лет. М.: Химия,

- 1967.—468 c.
- 65. Справочник по прикладной статистике: в 2-х т. / ред. Ллойд Э., Ледерман У., ред. пер. с англ. Тюрин Ю. Н., Айвазян С. А. М.: Финансы и статистика, 1989.—512 + 526 с.
- 66. Справочник по теории автоматического управления / ред. Красовский А. А., М.: Наука, 1987.— 712 с.
- 67. Стромберг А. Г., Семченко Д. П. Физическая химия. М.: Высшая школа, 1988.— 496 с.
- 68. *Тетерин В. В., Кудрявский Ю. П., Лаукарт Н. Ф. и др.* Исследование влияния модифицирующих добавок на процесс получения диоксида титана методом парофазного гидролиза // Цветная металлургия. 2002. №2. С. 29–31.
- 69. Техническая термодинамика / ред. Крутов В. И. 3-е изд. М.: Высшая школа, 1991,— 384 с.
- 70. Титан. Свойства, сырьевая база / ред. Гармата В. А. М.: Металлургия, 1983.— 560 с.
- 71. Химическая энциклопедия. М.: БРЭ, 1995. Т. 4.— 640 с.
- 72. *Хьелл Л.*, *Зиглер Д*. Теории личности / пер. с англ. Меленевская С., Викторова Д. СПб.: Питер, 2006.— 608 с.
- 73. *Чечулин В. Л.* О предельной норме прибыли // Материалы региональн. конф. «Социально-экономическая ситуация развития региона». БФ ПГУ, Березники, 2005. С. 270–283.
- 74. *Чечулин В. Л.* Определение информативного критерия окончания процесса вакуумной сепарации губчатого титана / рукопись, (БФ ПермГТУ вх. N2410 от 10.11.2004), 2003.— 60 с.
- 75. *Чечулин В. Л.* О множествах с самопринадлежностью // Вестник Пермского университета. Серия «Математика. Механика. Информатика», Пермь, 2005. С. 133–138.
- 76. *Чечулин В. Л.* Расчёт балансов потоков веществ процесса получения диоксида титана (подготовительные материалы для выполнения расчёта в текущем времени, в ПЭВМ посредством ПО) / рукопись (вх. БФ ПГТУ №257 от 28 июня 2005 года). 2003.—8 с.
- 77. *Чечулин В. Л.* Приближённое математическое моделирование процесса хлорирования титаносодержащего шлака в солевом хлораторе (подготовительные материалы для программирования обсчёта в ПЭВМ) / рукопись (БФ ПГТУ вх. №524 от 29 нояб. 2005 г., рецензент Косвинцев О. К., к. х. н.) 2004.— 17 с.
- 78. *Чечулин В. Л., Волчугова Е. В., Зайнуллина А. Ш.* К информатизации процесса флотации // Химическая промышленность. 2006. Т. 83. №7. С. 351–354.

- 79. *Чечулин В. Л., Кирин Ю. П., Мазитова Э. Ф.* О применении статистических методов к управлению процессами отгонки // Материалы конф. «Молодёжная наука Верхнекамья». БФ ПермГТУ, Березники, 2006. С. 45–46.
- 80. *Чечулин В. Л.* К системному анализу структуры промышленной информационно-технологической системы // Материалы 2-й междунар. конф. «Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании», Ставрополь, СевКавГТУ, 2006.— С. 177–181.
- 81. Чечулин В. Л. Об общей схеме построения систем оптимизации хими-ко-технологических процессов // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: матер. Всерос. конф., ПермГТУ. Пермь, 2006. С. 172–180.
- 82. *Чечулин В. Л., Светлаков И. Ю.* О структурной организации информационно-промышленных систем управления // Молодёжная наука верхнекамья, сб. тр. конф. БФ ПГТУ, Березники, 2006. С. 126–131.
- 83. *Чечулин В. Л., Павелкин В. Н.* О термодинамической формулировке критерия окончания процесса вакуумной сепарации губчатого титана // Химическая промышленность. 2006. №12. С. 599–600.
- 84. *Чечулин В. Л.* Об одном варианте доказательства 4-раскрашиваемости плоских графов // Вестник ПГУ. Серия «Математика. Механика. Информатика». Пермь. 2006. №4(4). С. 86–87.
- 85. *Чечулин В. Л.* К информатизации производства алифатических аминов // Новые технологии в азотной промышленности: материалы II-ой Всеросс. науч.-практ. конф., г. Невинномысск, 2007. С. 91–92.
- 86. *Чечулин В. Л.* К информатизации и оптимизации процесса сушки // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS технологии в энергетике: матер/ Всеросс. науч.-технич. интернет-конф. при ПГТУ/ Пермь, 2007. С. 182–189.
- 87. *Чечулин В. Л.* К описанию исторического формирования психосоциальной структуры самосознания // Ментальность, общество, экономика: проблемы развития России: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Орёл, $2007. \, \mathrm{C}. \, 198–202.$
- 88. Чечулин В. Л. О связи экономических моделей и теории информации // Совершенствование управления корпоративными образованиями и региональная промышленная политика: проблемы и инновации: матер. Всеросс. науч.-практ. конф. Пермь, 2007. С. 303–305.
- 89. *Чечулин Л. П., Чечулин В. Л.* К информатизации процесса хлорирования титаносодержащих шлаков // Вестник Пермского ун-та. Серия «Информационные системы и технологии». Пермь. 2007. Вып. 10 (15). С. 94–98.
- 90. Чечулин В. Л., Чечулин Л. П. К определению места контроллерного

- уровня в структуре АСУТП в связи с требованиями промышленной безопасности // Промышленные АСУ и контроллеры. М., 2007. №6. С. 68.
- 91. Чечулин В. Л., Павелкин В. Н., Кирин Ю. П., Мазитова Ю. Ф., Григалашвили В. К., Танкеев А. Б. К информатизации процессов отгонки для обеспечения заданного качества продукта // Химическая промышленность, 2007. №12. С. 408–414.
- 92. $\mbox{\it Чечулин В. Л.}$ Структурирование системы образования // Университет в системе непрерывного образования: матер. Междунар. науч.-методич. конф. Пермь, 2008. С. 59–60.
- 93. *Чечулин В. Л.* К информатизации процесса сушки // Промышленные АСУ и контроллеры. 2008. №8. С. 27–29.
- 94. *Чечулин В. Л., Мясникова С. А.* Анализ стационарного режима оборота общественно-необходимого времени, определяющего меру инфляции // Журнал экономической теории (РАН). 2008. №2. С. 240–245.
- 95. *Чечулин В. Л., Ардавичус В. Г., Колбасина О. В.* К информатизации процесса получения формалина // Химическая промышленность. 2008. Т. 85. №1. С. 39–44.
- 96. *Чечулин В. Л.* О психолого-гносеологических основаниях 6-ти уровневого структурирования агропромышленных систем // Экономика АПК Предуралья. Пермь, 2008. С. 135–136.
- 97. *Чечулин В. Л.* О гносеологических основаниях 6-ти стадийного научно-инновационного цикла // Инновации РАН 2008: матер. науч.-практ. конф. РАН. Н. Новгород, 2008. С. 51–52.
- 98. *Чечулин В. Л.* Об упорядоченных структурах в теории множеств с самопринадлежностью // Вестник ПГУ. Серия «Математика. Механика. Информатика». Пермь, 2008. С. 37–45.
- 99. *Чечулин В. Л.* К структурированию системы образования // Университетское образование. Пермь. 2009. Вып. 6 (32). С. 68–72.
- 100. *Чечулин В. Л.* О некотором изменении структуры сельскохозяйственных экономических субъектов // Университетские исследования. 2009. URL: http://www.uresearch.psu.ru/files/articles/22 71432.doc
- 101. *Чечулин В. Л.* Ограничения информационных методов // Искусственный интеллект: философия, методология, инновации: матер. III Всеросс. конф., МИРЭА. М.: Связь-Принт, 2009. С. 47-48.
- 102. *Чечулин В. Л.* Метод пространства состояний для управления качеством сложных химико-технологических процессов // Фундаментальные проблемы математики и информационных наук: матер. Междунар. конф. ИПМ ДВО РАН. Хабаровск, 2009. С. 158–159.
- 103. Чечулин В. Л. О кратком варианте доказательства теорем Гёделя //

- Фундаментальные проблемы математики и информационных наук: матер. Междунар. конф. ИПМ ДВО РАН. Хабаровск, 2009. С. 60–62.
- 104. *Чечулин В. Л.* О приложениях семантики самопринадлежности // Вестник Пермского ун-та. Серия «Математика. Механика. Информатика», 2009. Вып. 3 (29), С. 10–17.
- 105. *Чечулин В. Л.* Об условии повышения содержания рутильной формы TiO_2 в процессе парофазного гидролиза // Журнал прикладной химии 2009. Т. 82. Вып. №8. С. 1401–1403.
- 106. *Чечулин В. Л.* Об информатизации процесса плавки титановых концентратов в рудно-термических печах // Цветная металлургия. 2009. №3. С. 37–40.
- 107. Чечулин В. Л. Иерархия 6-ти уровней основных математических понятий // Университетские исследования, 2010.
- URL: http://www.uresearch.psu.ru/files/articles/191_31748.doc
- 108. *Чечулин В. Л.* О последовательности 6 исторических этапов появления основных математических понятий // Вестник Пермского ун-та. Серия «Математика. Механика. Информатика», 2010. Вып. 2 (2). С. 115–124.
- 109. $\mbox{\it Чечулин В. } \mbox{\it Л.}$ Теория множеств с самопринадлежностью (основания и некоторые приложения) / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2010.—100 с.
- URL: http://elibrary.ru/item.asp?id=15267103
- 110. *Чечулин В. Л.* Об основаниях системы кризисов развития личности и структурировании отклоняющегося поведения // Университетские исследования, 2010. URL: http://www.uresearch.psu.ru/files/articles/189 87481.doc
- 111. *Чечулин В. Л.* О гносеолого-психологических основаниях философии права // Философия права. 2010. №1. С. 101–106.
- 112. *Чечулин В. Л.* Теорема об одной свойстве гносеологического отражения // Университетские исследования, 2010. URL: http://www.uresearch.psu.ru/files/articles/59 28971.doc
- 113. *Чечулин В. Л., Ясницкий Л. Н.* Некоторые ограничения алгоритмически реализуемых нейронных сетей // Нейрокомпьютеры. 2010. №12. С. 3–6.
- 114. *Чечулин В. Л.* Применение метода пространства состояний в управлении качеством процесса хлорирования титаносодержащей шихты // Научно-технические ведомости СПбГПУ Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. №1. С. 177–184.
- 115. Чечулин В. Л. Модели безынфляционного состояния экономики и их приложения / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2011.— 112 с.
- 116. Чечулин В. Л. . Налдаева Е. Н. Особенности информационной системы управления процессом плавки концентратов в рудно-термических печах // Системы проектирования, технологич. подготовки производства и управ-

- ления этапами жизненного цикла промышл. продукта CAD/CAM/PDM (сборн. тезисов) ИПУ РАН, М., 2011. С. 74.
- 117. *Шафаревич И. Р.* Основные понятия алгебры, 2-е изд. Ижевск: НИЦ «РиХД», 2001.— 352 с.
- 118. *Шрагин И. В.* Условия измеримости суперпозиций // Доклады Академии Наук СССР, 1971. Т. 197. С. 295–298.
- 119. Шрагин И. В. Суперпозиционная измеримость и оператор суперпозиции, Одесса: Феникс, 2006.— 103 с.
- 120. Энциклопедия современной техники. Автоматизация производства и промышленная электроника: в 4-х т. ред. Берг А. И., Трапезников В. Л. М.: Советская энциклопедия, 1962–1965.
- 121. Югов Ю. Г. Специалисты и управление. Пермь, 1987.
- 122. *Югов Ю. Г., Югова Е. А.* Формирование субъектной структуры рыночного хозяйства в аграрной схеме экономики // Экономика АПК Предуралья. 2008. С. 13–20.
- 123. Chechulin V. L., Pavelkin V. N., Kirin Yu. P., Masitova Yu. F., Grigalashvili V. K., Tankeev A. B. About informatization of distillation process for providing required quality of product // Russian Journal of Applied Chemistry, MAIK Nauka/Interperiodica, 2008 Γ., vol. 81, no. 3 (март), pp. 558–564.
- 124. *Chechulin V. L., Ardavichus V. G., Kolbasina O. V.* Informatization of the process of producing formalin // Russian Journal of Applied Chemistry, MAIK Nauka/Interperiodica, 2008 г., vol. 81, no. 6 (июнь), pp. 1112–1116.
- 125. Chechulin V. L., On the Condition of Rising the Content of the TiO₂ Rutile Form during a Vapor-Phase Hydrolysis // Russian Journal of Applied Chemistry, MAIK Nauka/In-terperiodica, 2009, Vol. 82, No. 8, pp. 1501–1503.
- 126. *Grizle J. W., Marcus S. I.* Symmetries in non linear control systems // Proc. 22-nd IEEE conf. Decis and conr., San Antonio, Tex., 14–16 Dec. 1983. Vol. 3, New-York, 1983, pp. 1384–1388 (реферат: РЖ матем. 1985. №2. 2Б768.)
- 127. New Webster's Dictionary of the English Language, coll. ed. *Edvard G. Finnegan*, gen. ed. *Dana F. Kellerman*, 5-th rep., India, Delhi: Surjeet Publications, 1989.—1824 p.
- 128. *Shibata K. and others* Temperature Measuremend and Mathematical Modeling in the Vacuum Disstillation Process // Titanium'95, Sciense and Technology, matherials of international congress, India, Daly, 1995, pp. 1543–1550. 129. *Shaft A. J. van den* On nonlinear observers // IEEE Trans. Autom. confr., 1985, v. 30, №12, p. 1254–1256 (реферат: РЖ матем. 1986 г. №8. 8Б698.)
- 130. Чечулин В. Л. Программный модуль реализации алгоритма «Опре-

- деление момента окончания процесса вакуумной сепарации (отгонки)» // ОФАП РФ, свид-во об отраслевой регистрации №11635; № гос. регистр. 50200802124, 16 окт. 2008 г.
- 131. *Чечулин В. Л., Пьянкова Е. С.* Программный модуль реализации алгоритма «Определение точки оптимума метода пространства состояний с использованием метода главных компонент» // ОФАП РФ, свид-во об отраслевой регистрации №11924; № гос. регистр. 50200802410, 16 дек. 2008 г.
- 132. *Чечулин В. Л.*, *Бабушкин Е. В.* Программа реализации алгоритма «Определение точки оптимума метода пространства состояний методом главных компонент» // ОФАП РФ, свид-во об отраслевой регистрации №12314; № гос. регистр. 50200900340, 11 февр. 2009 г.
- 133. Чечулин В. Л., Мельков Н. М. Программный модуль имитационного моделирования управления качеством вакуумной сепарации губчатого титана // ОФЭРНиО РФ, свид-во о регистрации электронного ресурса №16876 от 23 марта 2011 г., № гос. регистр. (ВНТИЦ) 50201150399, код по ЕСПД .0206971.00248-01.
- 134. *Чечулин В. Л.*, *Налдаева Е. Н.* Информационная система управления качеством процесса плавки в рудно-термических печах // ОФЕРНиО РФ свид-во о регистр. электронного ресурса №17078. 2011.

Предметный указатель

	структура		
метод	АСУ, АСУТП, 17		
главных компонент, 54	научно-производственного		
пространства состояний, 46	цикла, 14		
метод пространства состояний, 33	системы образования, 13		
основания	теорема		
гносеологические, 10	Нагорного, 25		
гносеологические, 9	о 4-раскрашиваемости плоских		
онтологические, 8	графов, 37		
основное логистичекое	о недоказуемости		
уравнение, 39	непротиворечивости, 20		
приложение	о недополнимости, 37		
теоремы о размерности в	о некоммутативности, 88		
управлении, 31	о неполноте, 20		
принцип	о непроецируемости, 27		
малой вариации параметра	о непротиворечивости, 38		
управления, 69	о неразрешимости тождества		
формационный, 12	слов в полугруппах, 22		
пространство, 27	о размерности, 30		
ориентированное, 30	о суперпозициях, 35		
процесс	о суперпозициях, одномерных,		
вакуумной сепарации Ті, 64	34		
очистки TiCl4, 58	об ориентированности		
плавки, 47	плоскости, 29		
получения TiO2, 59	ограниченность предикативной		
получения алифатичсеких	теории, 21		
аминов, 85	теория		
получения формалина, 80	непредикативная, 37		
сушки, 40	предикативная, 20		
флотации, 75	точка		
хлорирования, 52	неподвижная, 39		

Index

structure
ACS, PCS, 17
research and production cycle, 14
education, 13
theorem
Nagorny, 25
of 4-colorability of planar
graphs, 37
unprovability of consistency, 20
uncompleteness, 37
of noncommutativity, 88
incompleteness, 20
uncontradictionness, 27
the consistency of, 38
insolubility of the word in
semigroups, 22
of dimension 30
of superpositions 35
on superpositions,
one-dimensional, 34
orientation of the plane, 29
limitations of the predicative
theory, 21
theory
impredicative, 37
predicate, 20
point
fixed, 39

Научное издание

Чечулин Виктор Львович

МЕТОД ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СЛОЖНЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

МОНОГРАФИЯ

Редактор Петрова Н. Е. Корректор Пермякова Е. Н. Компьютерная вёрстка Чечулина В. Л.

Подписано в печать 21.11.2011. Формат 60х84/1/16. Усл. печ. л. 6,63. Тираж 100 экз. Заказ №

Редакционно-издательский отдел Пермского государственного национального исследовательского университета 614990. Пермь, ул. Букирева, 15

Типография
Пермского государственного
национального исследовательского университета
614990. Пермь, ул. Букирева, 15