



УТВЕРЖДАЮ

И.о. ректора ФГБОУ ВО «Российский  
химико-технологический университет  
имени Д.И. Менделеева»  
д.ф.м.н., профессор

В.М. Аристов

«28» января 2016 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Бабенкова Владимира Александровича  
«Повышение эффективности управления технологическими процессами с  
использованием наблюдателей и регуляторов состояния (на примере  
производства экстракционной фосфорной кислоты)», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (промышленность)

Диссертация В.А. Бабенкова посвящена разработке моделей и алгоритмов  
контроля и управления непрерывными технологическими процессами (ТП) с  
дискретным характером измерения выходных величин. На примере  
производства экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) автором с  
использованием методов математического моделирования, асимптотических  
наблюдателей и регуляторов состояния динамических объектов  
разрабатывается многосвязная система контроля и управления показателями  
концентрационного состава и уровня пульпы в экстракторе, а также  
программный тренажер оператора технологического процесса. В диссертации  
также решается задача реализации предложенных методов, моделей и  
алгоритмов на действующем промышленном предприятии.

В настоящее время для технологических процессов рассматриваемого в  
диссертационной работе класса, даже автоматизированных на основе



современных аппаратных и программных средств, важной проблемой остается зависимость качества управления от действий операторов ТП, ошибки в которых зачастую приводят к нарушениям регламентного технологического режима. В производстве ЭФК это ведет к неполному разложению апатитового концентрата, формированию кристаллов фосфополугидрата с плохими фильтрующими свойствами, увеличению потерь фосфатного сырья и снижению производительности технологической линии. Проблемы повышения качества управления технологическими процессами рассматриваемого класса обусловлены, прежде всего, большим периодом дискретности измерений управляемых выходов объекта, множеством перекрестных связей между управляемыми и управляющими переменными, высокой инерционностью объектов, наличием существенных возмущающих воздействий.

Дальнейшее повышение эффективности использования сырья и энергоресурсов, а также качества продукции на существующем технологическом оборудовании может быть достигнуто за счет создания и внедрения в АСУ ТП современных методов автоматического контроля и управления состоянием динамического объекта, а также за счет повышения квалификации операторов ТП. Предложенные диссертантом подходы позволят: формировать непрерывную оценку технологических параметров и входных возмущающих воздействий; более точно стабилизировать управляемые технологические параметры объекта в номинальном режиме; снизить вероятность нарушения технологического регламента; повысить степень использования сырья и производительность технологической линии. Представленная диссертационная работа направлена на исследования и решение данных задач, чем и определяется важность и **актуальность** ее темы.

Диссертационная работа Бабенкова В.А. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка, из 124 наименований и приложений. Основное содержание работы изложено на 170 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков, 13 таблиц и 11 приложений.



**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, оценена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

**Первая глава** посвящена анализу непрерывных технологических процессов с дискретным характером измерения выходных величин как объектов автоматизации. В рамках этой главы выявлены и обобщены для рассматриваемого класса технологических процессов особенности, определяющие важность и сложность автоматизации управления такими процессами (с. 15, п. 1.1). Проведен всесторонний анализ технологического процесса производства экстракционной фосфорной кислоты, составлена схема материальных потоков, выделены входные и выходные переменные, основные возмущающие воздействия, систематизированы показатели эффективности производства. На основании полученных результатов составлена укрупненная модель участка «экстрактор-фильтр» (рисунок 1.4) как объекта управления. Показано, что температура пульпы в экстракторе с приемлемой точностью стабилизируется автономным автоматическим контуром регулирования за счет изменения подачи воздуха в аппарат воздушного охлаждения, поэтому данный контур регулирования не нуждается в модернизации.

Выбраны и обоснованы наиболее важные технологические параметры процесса производства ЭФК, подлежащие стабилизации в регламентном режиме: показатели концентрационного состава и уровень пульпы в экстракторе. Показано, что расходы материальных потоков, а также уровень пульпы в экстракторе измеряются автоматически существующими средствами автоматизации, а концентрационные характеристики пульпы определяются в результате лабораторного анализа отобранных проб (п. 1.5). Рассмотрены и проанализированы существующие и возможные методы и средства контроля состава пульпы.

Выполнен анализ существующего уровня автоматизации производств ЭФК и проведена оценка непосредственного участия оператора технологического процесса в процессе управления, которое заключается в



анализе отклонений технологических параметров от номинального режима и принятии решений по изменению материальных потоков (рисунок 1.6). Сделано заключение о том, что известные методы и средства измерения состава пульпы не обеспечивают непрерывный автоматический контроль необходимых параметров в потоке пульпы, а существующие способы автоматического управления процессом производства ЭФК (п. 1.6) не нашли широкого практического применения ввиду своих недостатков.

В диссертации выполнен анализ компьютерных тренажеров для операторов технологических процессов сложных производств как эффективного средства повышения качества управления и безопасности производства (п. 1.7). Подчеркнута важность роли оператора ТП в современных АСУ ТП сложных и опасных производств. Поставлена цель повышения качества управления непрерывными технологическими процессами, выходы которых измеряются с большим периодом дискретности, с использованием наблюдателей состояния для непрерывного контроля состояния объекта управления и многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами для стабилизации процесса в регламентном режиме.

**Вторая глава** посвящена построению математической модели исследуемого технологического процесса. Анализ существующих математических описаний технологического процесса экстракции фосфорной кислоты показал, что они не обеспечивают в полной мере реализацию поставленных в работе целей (п. 2.1). Поэтому автором ставится задача и определяются этапы построения многосвязной динамической математической модели процесса экстракции фосфорной кислоты в полугидратном режиме для задач автоматизации контроля и управления.

На основе анализа материального баланса отделения экстракции и фильтрации по основным компонентам пульпы, а также данных технологического регламента производства ЭФК (таблица 2.1) сформирована структура нелинейной модели формирования концентрационных характеристик пульпы в двухсекционном экстракторе (рисунок 2.2). Параметры нелинейной



модели экстрактора объемом  $900 \text{ м}^3$  с номинальной нагрузкой по апатиту  $98 \text{ т/ч}$  получены из соотношений, отражающих материальный баланс по  $\text{SO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и твердой фазе в пульпе 1-го и 2-го баков экстрактора после разложения апатита и кристаллизации фосфогипса, а также по результатам статистической обработки экспериментальных данных реального производства.

На следующем этапе построения математической модели процесса производства ЭФК выполнена линеаризация разработанной нелинейной модели по основным каналам управления в окрестностях регламентного режима (п.п. 2.4.7). Анализ линеаризованной модели позволил для каждого канала формирования концентрационных характеристик пульпы выделить локальные управляющие воздействия и сформировать структурные схемы (рисунки 2.8, 2.9, 2.10). На основе анализа материального баланса по объему входящего и выходящего потоков экстрактора, геометрических размеров двухсекционного экстрактора получена линейная модель изменения уровня пульпы в экстракторе (п. 2.5). Путем объединения локальных каналов формирования концентрационных характеристик пульпы с каналом изменения уровня пульпы в экстракторе, составления матрицы перекрестных связей объекта в установившемся режиме получена многосвязная динамическая математическая модель процесса экстракции фосфорной кислоты (рисунок 2.11, формула 2.23). Построенная модель отражает изменения технологических параметров в зависимости от выбранных на входе расходов материальных потоков с учетом всех взаимосвязей. Статистическая обработка экспериментальных данных о функционировании реального объекта позволила подтвердить адекватность разработанной модели (п. 2.7).

В результате проведенных во второй главе исследований было получено математическое описание процесса экстракции фосфорной кислоты в полугидратном режиме, что позволило перейти к разработке методов и алгоритмов контроля и управления концентрационными характеристиками и уровнем пульпы в экстракторе.



В третьей главе разработана многосвязная система контроля и управления технологическими параметрами, осуществляющая непрерывный контроль состояния технологического объекта и выработку рациональных управляющих воздействий для стабилизации регламентного режима.

Для непрерывной оценки состояния объекта управления автор предлагает использовать наблюдатели состояния. Анализ показал, что существующие непрерывные наблюдатели требуют непрерывной информации об измерениях выходов объекта, а дискретные — оказываются малоэффективными в рассматриваемом случае в связи с большим периодом дискретности измерений. Поэтому ставится задача разработки непрерывно-дискретного наблюдателя состояния (п. 3.1).

Выполнена математическая постановка задачи непрерывной оценки состояния динамического объекта, а также низкочастотных трендов входных возмущений, по непрерывным измерениям входных сигналов и дискретной информации о выходах (п. 3.2). Данная задача решается путем расширения вектора оцениваемых координат объекта с включением в него составляющих вектора возмущений, а также введением в канал коррекции традиционного непрерывного наблюдателя импульсного элемента и коэффициента усиления импульсов (рисунок 3.2). При этом отмечается, что для такого наблюдателя не требуется постоянства периода дискретности измерения выхода, поэтому процедура наблюдения сохраняется и в том случае, если выходные сигналы объекта измерены несколько раньше или позже установленного регламентом времени. Предложен подход к адаптации матрицы коррекции наблюдателя, который обеспечивает ускорение переходных процессов на начальном этапе наблюдения и низкую чувствительность к погрешностям измерений в остальное время (п. 3.4, рисунок 3.3).

Для разработанных во второй главе локальных каналов формирования технологических параметров процесса экстракции фосфорной кислоты получено математическое описание в пространстве состояний и разработаны наблюдатели состояния (п. 3.5). Приведены расчеты устойчивости переходных



процессов, результаты проверки условий наблюдаемости и управляемости, графические модели, построенные в среде Simulink Matlab, результаты имитационного моделирования.

Проведен сравнительный анализ качества функционирования сепаратных контуров стабилизации технологических параметров процесса экстракции фосфорной кислоты на основе промышленных ПИ-регуляторов и регуляторов состояния, использующих полную информацию о состоянии объекта от наблюдателя состояния. Эффективность управления оценивалась обобщенной квадратичной оценкой (формула 3.45) при ограничениях на максимальные значения модуля рассогласования (формула 3.46). По результатам проведенного анализа определены преимущества регуляторов состояния, настроенных по принципу модального управления (п. 3.6.2.3., таблица 3.3).

Разработаны сепаратные контуры стабилизации концентрационных характеристик и уровня пульпы в экстракторе на основе наблюдателей и регуляторов состояния. При синтезе многосвязной системы контроля и управления выполнен расчет матрицы перекрестных связей между регуляторами в разработанных контурах управления, что позволяет выполнить развязку между управляющими воздействиями (п. 3.7).

Разработана структурная схема управления процессом экстракции фосфорной кислоты с использованием полученной системы контроля и управления (рисунок 3.27). Выполнено многократное имитационное моделирование работы системы контроля и управления из различных исходных состояний процесса (п. 3.9). Результаты стабилизации технологических параметров (таблица 3.4) подтверждают высокое качество управления.

Разработанные в третьей главе методы и алгоритмы контроля и управления позволили перейти к их практической реализации в условиях действующей АСУ ТП производства ЭФК, а также к разработке программного тренажера оператора ТП.

**В четвертой главе** выполнена инженерная реализация системы контроля и управления в рамках действующей АСУ ТП производства ЭФК, разработан



программный тренажер оператора ТП, исследовано повышение эффективности производства экстракционной фосфорной кислоты по результатам внедрения и испытаний разработанных научно-технических решений. Для интеграции алгоритмов работы многосвязной системы контроля и управления разработана структурная схема системы в составе действующей АСУ ТП (рисунок 4.1). Программное обеспечение системы устанавливается на инженерной станции АСУ ТП, что позволяет с минимальными затратами выполнить ее интеграцию в существующую систему управления. На основе полученных в главах 2, 3 результатов разработаны: алгоритм функционирования многосвязной системы контроля и управления технологическими параметрами ТП производства ЭФК (рисунок 4.2), графические окна, дополняющие существующую систему визуализации.

На основе выполненного анализа компьютерных тренажерных комплексов для обучения операторов технологических процессов сложных производств, возможностей действующей АСУ ТП производства ЭФК и с учетом разработанных алгоритмов управления составлены структурная (рисунок 4.4) и функциональная (рисунок 4.5) схемы программного тренажера.

Разработан комплекс технических средств, алгоритм функционирования, элементы системы визуализации программного тренажера. Особенностью тренажера является использование блока оптимального управления, в котором реализованы алгоритмы многосвязной системы контроля и управления (п. 4.2.1). Помимо основных функций моделирования динамического отклика объекта на выбранные управляющие воздействия и расчета рациональных управляющих воздействий, тренажер формирует электронный журнал оператора, графически представляет тренды стабилизируемых параметров, формирует отчет по управлению, имеет пополняемую базу данных исходных состояний процесса, работает в режиме обучения и экзаменационном режиме.

По результатам внедрения программного тренажера в процесс обучения операторов ТП производства ЭФК и результатам испытаний многосвязной системы контроля и управления в информационно-советующем режиме



выполнена оценка повышения эффективности управления и производства ЭФК (п. 4.3). На основе анализа экспериментальных данных за различные периоды времени вычислены дисперсии стабилизируемых параметров и определены значения коэффициента выхода (таблица 4.2). Результаты выполненных исследований свидетельствуют о повышении точности стабилизации технологических параметров и повышении эффективности производства.

В **заключении** работы обобщаются основные результаты, полученные лично автором в ходе решения важной научно-технической задачи, которой посвящена диссертация.

Представленные материалы (диссертация, автореферат, презентация) позволяют достаточно полно оценить объем и сложность проведенного исследования.

Предложены и обоснованы **новые научные результаты**, имеющие весомое научное и прикладное значение для развития автоматизированных систем управления непрерывными технологическими процессами с дискретными измерениями выходных сигналов, обеспечивающие повышение точности стабилизации регламентных режимов, а именно:

1. Разработана математическая модель процесса экстракции фосфорной кислоты в полугидратном режиме для управления технологическим режимом, отражающая перекрестные связи объекта и динамику процессов перемешивания и перемещения пульпы в экстракторе. Структура модели может быть использована при математическом описании подобных объектов с другой аппаратно-технологической реализацией процесса.

2. Разработан непрерывно-дискретный наблюдатель состояния, который позволяет контролировать состояние непрерывных технологических процессов, выходы которых измеряются в дискретные моменты времени с большим периодом дискретности. В вектор оцениваемых координат состояния включены составляющие вектора входных возмущений, что позволяет контролировать их низкочастотные тренды. Предложен и реализован подход к адаптации матрицы



коррекции, позволяющий достичь желаемых динамических характеристик наблюдателя.

3. Разработана система контроля и управления технологическими параметрами многосвязного объекта на основе наблюдателей и регуляторов состояния. Входящие в ее состав сепаратные контуры стабилизации реализуют модальное управление, а матрица перекрестных связей между регуляторами выполняет компенсацию перекрестных связей объекта.

**Практическая значимость** основных научно-технических решений работы определяется следующими результатами:

1. Разработаны модели, алгоритмы и реализующая их программа (свидетельство о государственной регистрации №2015614179) для непрерывной оценки состояния технологического процесса экстракции фосфорной кислоты и формирования в рамках действующей АСУ ТП заданий для контуров управления расходами материальных потоков с целью стабилизации процесса в регламентном режиме.

2. Разработан программный тренажер оператора ТП производства ЭФК (свидетельство о государственной регистрации № 2014619294) для проведения первоначальной подготовки, повышения квалификации, проверки навыков и знаний оперативного персонала.

3. По результатам внедрения и эксплуатации программного тренажера в процесс обучения операторов отделения ЭФК-3,4 предприятия ООО «Балаковские минеральные удобрения» получены положительные отзывы и рекомендации по его использованию на других аналогичных производствах, что подтверждено актом внедрения.

4. Испытания системы контроля и управления в отделении ЭФК-3,4 Балаковского филиала АО «Апатит» позволили повысить эффективность управления; разработанная система принята к внедрению, что подтверждено актом о проведении испытаний.

5. Методические разработки, выполненные на основании исследований, приведенных в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс на



кафедре «Автоматизированные и информационные системы управления» Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

**Достоверность и обоснованность** результатов и выводов диссертационной работы Бабенкова В.А. базируется на корректной постановке цели и задач исследования, использовании научно обоснованных методов математического моделирования динамических систем, современной теории автоматического управления, теории асимптотических наблюдателей, теории модального управления. Обоснованность приведенных результатов подтверждена результатами имитационного моделирования на ЭВМ, экспериментальными исследованиями технологического процесса производства ЭФК, проведенными в производственных условиях Балаковского филиала АО «Апатит», а также обеспечивается близостью расчетных данных и результатов эксперимента.

Диссертация хорошо структурирована, написана грамотно и вполне понятно. В конце каждой главы приводятся содержательные обобщающие выводы, что способствует пониманию материала.

Автореферат полно отражает содержание диссертации.

По диссертационной работе Бабенкова В.А. можно сделать следующие **замечания**:

1. В тексте диссертации приведено достаточное количество материала, который мог бы быть исключен из текста диссертации без ущерба для ее качества:

- разделы 2.2, 3.1, 4.1.2 можно было бы сократить и большую часть текста перенести в литературный обзор;
- разделы 3.5.2, 3.5.3 следовало привести в значительно сокращенном виде, представив окончательные настройки наблюдателей без промежуточных вычислений, ход которых понятен из раздела 3.5.1.



2. Разработанную автором, во второй главе, динамическую математическую модель следовало бы называть «многомерной», а не многосвязанной. Приведенная динамическая модель (рис. 2.2) является очень упрощенной:

- для первого бака экстрактора динамическое поведение учитывается лишь процессами перемешивания и перемещения пульпы в виде инерционных звеньев первого порядка;
- для второго бака экстрактора динамическая модель представлена в виде 8 последовательно расположенных инерционных звеньев первого порядка.

3. Вызывают сомнения результаты оценки точности (а не адекватности как пишет автор) математического описания динамики второго бака экстрактора (раздел 2.4.5 рис.2.4). Кривая разгона исходной модели (с 8 последовательными звеньями первого порядка) должна быть более инерционной.

4. При расчете дискретных передаточных функций наблюдателя (раздел 3.5, стр.92) и при настройке ПИД регуляторов (раздел 3.6.2.2, стр. 122) период дискретности выбран равным 2 часа, что является трудно понимаемым и объяснимым.

5. Для синтеза многосвязных систем управления используются два классических подхода, основанных на принципе полной автономности Вознесенского И.Н. или не полной автономности, основанной на методах диагональной доминантности.

Из текста диссертации остается неясным, какой метод синтеза многосвязной системы управления использовался и почему «матрица перекрестных связей между локальными регуляторами»  $G_R$  имеет вид, приведенный на стр. 130.

6. В тексте диссертации (глава 4) не достаточно отражены результаты разработки и отладки программно-аппаратных средств системы многосвязного управления технологическими процессами производства ЭФК.

7. Разработка программного тренажера является большой самостоятельной задачей и ее можно было бы не включать в работу.



8. В работе имеются неточности терминологического характера, встречаются неточности общего характера и опечатки:

- на стр.60 переходные характеристики названы «разгонными характеристиками»;
- на стр.63 вектор управляющих воздействий назван «вектором управляемых потоков»;
- в ссылке [69] в названии книги пропущено слово: следует читать «... основных химических производств»;
- на стр.56 некорректно указаны ссылки на формулы (2.4) и (2.6).

Перечисленные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Предложенные в диссертационной работе модели, алгоритмы и программное обеспечение могут быть рекомендованы для использования на предприятиях, занимающихся производством ЭФК (Балаковский филиал АО «Апатит», АО «ФосАгро – Череповец», ОАО «Белореченские минудобрения»), в научно-исследовательских и проектных организациях, занимающихся автоматизацией непрерывных ТП с дискретными измерениями управляемых выходов, а также в учебном процессе ВУЗов, где проводится подготовка в направлении математического моделирования, непрерывного контроля и управления технологическими процессами.

По теме диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ, среди которых 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты работы обсуждались на 7 международных и 3 всероссийских научных конференциях.

Соответствие полученных соискателем научных и практических результатов **паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производства (промышленность)** подтверждается следующим:

В соответствии с **формулой специальности** в диссертации:



– применяется математическое моделирование для исследования технологического процесса и реализации алгоритмов, повышающих эффективность автоматизированной системы управления (Глава 2);

– разработано алгоритмическое обеспечение и комплексы программ обработки данных в системе управления с целью осуществлению непрерывного контроля и управления технологическим процессом (Глава 3);

– предложены структурные решения системы управления технологическим процессом производства ЭФК, предназначенные для реализации разработанных алгоритмов (Глава 4).

В диссертации развиты следующие **области исследования** в соответствии с Паспортом специальности:

- (П.6) Разработана модель технологического процесса производства экстракционной фосфорной кислоты в полугидратном режиме для целей автоматизации контроля и управления;

- (П.10) Выполнен синтез специального математического обеспечения и пакетов прикладных программ обеспечивающей подсистемы АСУ ТП, которые позволяют повысить эффективность системы управления.

Цель и задачи диссертации обусловлены актуальными проблемами науки и практики. Поставленная цель исследования достигнута, соответствующие задачи решены на достаточно высоком научном уровне.

На основе анализа содержания диссертации, автореферата, опубликованных автором работ можно сделать следующее **заключение**: диссертационная работа Бабенкова В.А. на тему «Повышение эффективности управления технологическими процессами с использованием наблюдателей и регуляторов состояния (на примере производства экстракционной фосфорной кислоты)» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ к диссертациям на соискание ученой



степени кандидата технических наук. В диссертации изложены выполненные автором научно обоснованные технические разработки, связанные с совершенствованием методов контроля и управления сложными технологическими процессами: разработан подход к моделированию рассматриваемого класса объектов для управления технологическим режимом, построена математическая модель процесса экстракции фосфорной кислоты в полугидратном режиме, разработан непрерывно-дискретный наблюдатель состояния динамических объектов, разработана многосвязная система контроля и управления технологическими параметрами, разработаны алгоритм и структура программного тренажера оператора ТП.

Автор работы, В.А. Бабенков, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)» (технические науки).

Диссертация и отзыв ведущей организации обсуждены и одобрены на заседании кафедры компьютерно-интегрированных систем в химической технологии ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (протокол № 7 от 27 января 2016).

Заведующий кафедрой компьютерно-интегрированных систем в химической технологии ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

д.т.н., профессор

А.Ф. Егоров

Секретарь кафедры, к.т.н., доцент

П.Г. Михайлова

125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9.

Тел.: (495) 495-21-34 ,

E-mail: egorov@muctr.ru