

На правах рукописи

ПИСАРЕВ Артем Владимирович

**Разработка и оптимизация алгоритмов работы установки по переработке  
органических отходов**

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном исследовательском центре информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск.

**Научный руководитель:**                    **Шакиров Станислав Рудольфович,**  
кандидат физико-математических наук

**Официальные оппоненты:**

**Ведущая организация:**

Защита состоится \_\_\_\_\_ года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте \_\_\_\_\_.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Ограниченность запасов органического топлива, возросшие экологические требования, обязательства государств по Киотскому протоколу, требующему снижения выбросов парниковых газов (диоксида углерода, метана и др.), вызывают необходимость:

- поисков нетрадиционных путей использования энергетических ресурсов (использование органических отходов (биотоплива), вторичных ресурсов (мусора, отходов производства) и пр.)
- оптимизации традиционных методов и схем сжигания топлива и построение на их основе алгоритмов управления.

Горение, пиролиз и газификация органического топлива представляют собой сложные физико-химические процессы, подверженные влиянию различных, в том числе и случайных, трудно учитываемых факторов. Оптимизация этих процессов предполагает их протекание с максимальным коэффициентом полезного действия. Для организации данных процессов необходимы выбор и обоснование критериев их качества. При этом качество оптимизации будет зависеть как от корректности выбранного критерия оптимизации, так и от алгоритмов, при помощи которых будет решаться поставленная задача.

Дороговизна натуральных экспериментов приводит к необходимости компьютерного моделирования процессов сушки, сжигания, пиролиза и газификации органических отходов.

Применение автоматизированных систем управления процессами переработки органических отходов позволяет:

- повысить надежность и экономичность работы энергоустановки;
- снизить количество вредных выбросов;
- добиться инвариантности энергетической установки к различным видам топлива;
- варьировать выход конечных продуктов (тепловая и электрическая энергия, биоуголь, синтез-газ);
- с учетом технологических ограничений изменять топливную стратегию, а также использовать выгодные предложения на рынке топлива.

Для качественного ведения технологического процесса переработки органических отходов требуется автоматическое регулирование технологических параметров установки. Достижение требуемых показателей качества регулирования технологических параметров осуществляется благодаря синтезу корректирующих устройств с усовершенствованными законами функционирования, использованию математических моделей технологических процессов в алгоритмах управления.

При моделировании работы установки рассмотрены:

- индивидуальное управление технологическими параметрами в соответствии с разработанными алгоритмами,
- нейтрализация взаимодействий между отдельными контурами управления,
- работа контуров самонастройки (адаптации) с тем, чтобы поддержать оптимальную эффективность работы установки.

**Целью работы** являются:

- модернизация существующих способов регулирования термохимических процессов, рассматриваемых на примере реализации управления режимами работы установки утилизации органических отходов,

- создание нечетких динамических математических моделей, которые позволяют оптимизировать переходные процессы в камере сжигания и реакторе установки,
- разработка универсального метода определения нечетких динамических математических моделей термохимических процессов.

Модернизация законов регулирования позволяет:

- повысить быстродействие и точность систем автоматического регулирования,
- обеспечить устойчивость систем управления и заданное качество переходных процессов при изменениях химического состава и физических свойств топлива,
- оптимизировать работу установки (целевой функцией является максимальная производительность по топливу).

#### **Задачи исследования:**

- разработать математические модели на основе технологических процессов, протекающих в узлах и агрегатах установки переработки отходов при различных режимах работы оборудования с привлечением математических методов теории нечетких множеств,
- разработать алгоритмы и методики управления процессами тепломассопереноса в узлах и агрегатах установки, позволяющие с помощью математических методов теории нечетких множеств корректировать режимы переработки отходов с целью повышения производительности и точности реализации термохимических режимов,
- выполнить анализ возмущающих воздействий, влияющих на точность реализации режимов работы установки, построение вектора возмущающих воздействий и целевой функции с целью компенсации возмущающих воздействий путем изменения параметров режима термохимической переработки отходов,
- выполнить синтез регуляторов технологических параметров установки переработки отходов,
- выполнить моделирование работы установки с учетом контуров регулирования технологических параметров,
- разработать алгоритмы управления для программно-аппаратного комплекса установки переработки отходов.

#### **Основные методы исследования.**

Решение поставленных задач основано на использовании методов математического моделирования, нечетких множеств, имитационного моделирования, системного анализа, современной теории автоматического управления.

Математические модели строятся аналитическим методом с использованием уравнений, описывающих физические свойства объектов регулирования, уравнений химических реакций горения, пиролиза и газификации. Синтез системы регулирования проводится с использованием методов современной теории автоматического регулирования. Имитационное моделирование выполняется в пакете прикладных программ Simulink MATLAB.

#### **Научная новизна диссертационного исследования состоит в следующем:**

определены математические модели узлов, агрегатов и трактов установки переработки отходов. К ним относятся модели динамики газоздушного тракта

установки, камеры сжигания, реактора и сушилки. Используя математические модели узлов, агрегатов и трактов установки выполнены синтез и моделирование автоматических контуров регулирования. Математические модели технологических процессов, протекающих в камере сжигания и реакторе, выполнены с привлечением методов теории нечетких множеств.

По результатам моделирования работы установки с учетом контуров регулирования технологических параметров созданы адаптивные алгоритмы для аппаратно-программного комплекса установки. В рамках исследований разработан новый метод настройки ПИД-регуляторов.

**Практическая значимость и внедрение результатов диссертационного исследования.** Инновационная компания ООО “Биологические источники энергии” разработала способ и оборудование для переработки углеродосодержащих материалов.

В результате испытаний опытно-промышленного образца установки было выявлено, что оборудование имеет большой технический, экологический и рыночный потенциал, однако, для реализации конкурентоспособного промышленного образца установки необходимо создать интеллектуальную систему управления термохимической переработкой высоковлажных отходов органического происхождения.

В результате была сформулирована задача – разработка решений по управлению процессами подачи сырья, сушки, горения, рекуперации тепла, подачи холодного воздуха и удаления дымовых газов. Это определило и важное направление исследований - создание АСУ технологическими процессами (ТП) переработки биомассы. Новизна технологической схемы установки требует разработки оригинальной автоматизированной системы управления технологическими объектами и процессами.

Создание такой системы управления позволит использовать и расширить функционал разработанной технологии до уровня полисырьевого, политехнологического и полипродуктового оборудования для термохимической переработки высоковлажных отходов сельского хозяйства, твёрдых бытовых отходов, местных видов топлива.

Такой широкий функционал технологии позволит перерабатывать широкую номенклатуру сельскохозяйственных отходов, твёрдых бытовых отходов, местных видов топлива в тепловую энергию и энергоносители (твердые – биоуголь, жидкие – бионефть и газообразные – синтезгаз). Оборудование сможет перерабатывать «сложные» виды отходов – высоковлажные (более 60% относительной влажности) и высокозольные.

Новая система управления позволит реализовать в оборудовании проведение основных термохимических процессов – сжигания, пиролиза и газификации, что и позволит перерабатывать различные виды отходов и получать из них различные целевые продукты.

Создание интеллектуальной системы автоматизированного управления технологическими процессами позволит выбирать наиболее оптимальный технологический процесс для конкретного целевого продукта в зависимости от свойств исходного сырья.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

– универсальные математические модели термохимических процессов при переработке органических отходов в установке в том числе и с привлечением математических методов теории нечетких множеств,

– алгоритмы самопрограммирования для термохимических режимов процесса переработки органических отходов в установке, обеспечивающие оптимизацию и повышение точности реализации процессов тепломассопереноса за счет определения и коррекции параметров термохимических режимов переработки сырья, основанные на математических методах теории нечетких множеств,

– методы идентификации параметров термохимических процессов, протекающих в установке переработки органических отходов,

– методика, позволяющая с помощью разработанных алгоритмов самопрограммирования термохимических режимов управлять процессом утилизации органических отходов в установке с получением продуктов требуемого качества, например, ценных органических удобрений, с достижением максимальной производительности по сырью,

– метод настройки ПИД-регуляторов,

– моделирование адаптивных алгоритмов управления процессом переработки органических отходов.

**Практическая значимость и внедрение результатов диссертационного исследования.** Результаты исследований, представленные в данной работе применены для реальных технологических объектов. Разработанные математические модели универсальные и могут описывать множества аналогичных узлов и агрегатов технологических установок с различными техническими характеристиками. Для этого в моделях должны быть перерасчитаны числовые коэффициенты. Применение методов настройки и алгоритмов синтеза регуляторов, приведенных в работе, также возможно для множества аналогичных объектов регулирования.

Практическая значимость заключается в разработке и моделировании алгоритмов адаптивного управления термохимическими процессами на примере переработки отходов, в основу работы которого положены:

– математическая модель технологических процессов тепломассопереноса с привлечением математических методов теории нечетких множеств;

– алгоритмы и методика управления теплотехническими процессами на примере установки утилизации отходов, позволяющие с помощью математических методов теории нечетких множеств корректировать режимы тепломассопереноса с целью повышения точности реализации термохимических реакций и производительности оборудования.

Результаты диссертационной работы использованы в производственной деятельности:

– ООО «ТЕКОН СИБИРЬ»: при разработке программного обеспечения и наладке АСУТП установки получения смеси окиси углерода и водорода (ПСОУиВ) АО «Сибур-Химпром» на ПТК «ТЕКОН»;

– ООО «ТехноСистемы»: в виде методов синтеза алгоритмов и программ нейро-нечетких корректирующих устройств используются при автоматизации промышленных установок.

Использование указанных результатов позволяет повысить эффективность работы технологического оборудования и управления теплотехническими процессами.

**Личный вклад.** Все оригинальные разработки и результаты исследований, изложенные в основном тексте диссертации получены автором.

**Достоверность** диссертационной работы основывается на использовании апробированных методов расчёта, фундаментальных законов термодинамики в уравнениях, согласованием результатов с экспериментальными данными.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и отдельные ее результаты докладывались на: VIII, IX, X Всероссийском студенческом научно – техническом семинаре «ЭНЕРГЕТИКА: экология, надёжность, безопасность» (г. Томск, Томский политехнический университет (ТПУ), 2006, 2007, 2008 г.), четвертой Международной научно – практической конференции «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития», (г. Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2007 г.), Всероссийской конференции с международным участием «Индустриальные информационные системы ИИС–2015» (г. Новосибирск, КТИ ВТ СО РАН, 2015 г.), Международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики» (г. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, 2015, 2019, 2020 г.), Конференции «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, НГТУ, 2006, 2007, 2016, 2017 г.), XVIII Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию (УМ2017) (г. Иркутск, ИДСТУ СО РАН, 2017 г.), международной конференции «Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education» (CITech-2018) (г. Усть-Каменогорск, Казахстан, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, 2018 г.), XIX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию (УМ2018) (г. Кемерово, КФ ИВТ СО РАН, КемГУ, 2018 г.), XX и XXI Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию (УМ2019 и УМ2020) (г. Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2019 г. и ФИЦ ИВТ, 2020 г.).

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 27 работах, 5 из которых входят в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 3 статьи в сборниках научных трудов, 17 статей в сборниках материалов Всероссийских и международных конференций и 2 отчетах о выполнении НИОКР.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы из 188 наименований и Приложения. Общий объем работы составляет 253 страницы, из которых основное содержание работы - 156 страниц, включая 18 таблиц и 33 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, описывающей разработку автоматизированной системы управления процессами сушки, сжигания, пиролиза и газификации органических отходов. Сформулированы цель и основные задачи исследований, определена научная и практическая ценность работы.

**В первой главе** описывается разработка математических моделей узлов, агрегатов и трактов установки переработки отходов.

Для новых технологий, оборудование которых находится в стадии разработки и освоения, и нет достаточного объема экспериментальных данных о протекании технологических процессов, приходится применять теоретические методы для определения характеристик этих процессов.

Весьма важное место в разработке систем автоматизации как новых, так и уже широко известных технологий занимает моделирование объектов и систем автоматизации. Моделирование наряду с практической апробацией тех или иных технических решений на реально существующих установках позволяет достаточно точно оценить принимаемые решения, упрощая и удешевляя создание систем

автоматизации. Моделирование позволяет решать вопросы устойчивости систем, оптимизации переходных процессов и т.д.

Технологическую схему установки, на примере которой в работе рассмотрена разработка автоматизированной системы управления, условно можно разделить на несколько трактов: топливный, газовый, воздушный. На рис. 1 изображена принципиальная тепловая схема топливного тракта установки. Работа топливного тракта установки при работе в режиме сжигания происходит по алгоритму, приведенному далее. Влажное топливо подается в вихревую сушилку шнековым питателем из «бункера влажного топлива». Дымовые газы, используемые для сушки влажного топлива в вихревой сушилке, образуются при горении топлива в камере сжигания. Дымовые газы в сушилку направляются через горячий циклон, где происходит отделение золы от дымовых газов. В камеру сжигания топливо из «бункера топлива после сушки» подается шнековым питателем. Дымовые газы после вихревой сушилки, пройдя через холодный циклон, удаляются дымососом в атмосферу. В холодном циклоне происходит разделение топлива после сушки и дымовых газов. Затем это топливо направляется в «бункер топлива после сушки». Воздух для протекания реакций окисления топлива подается в камеру сжигания дутьевым вентилятором.

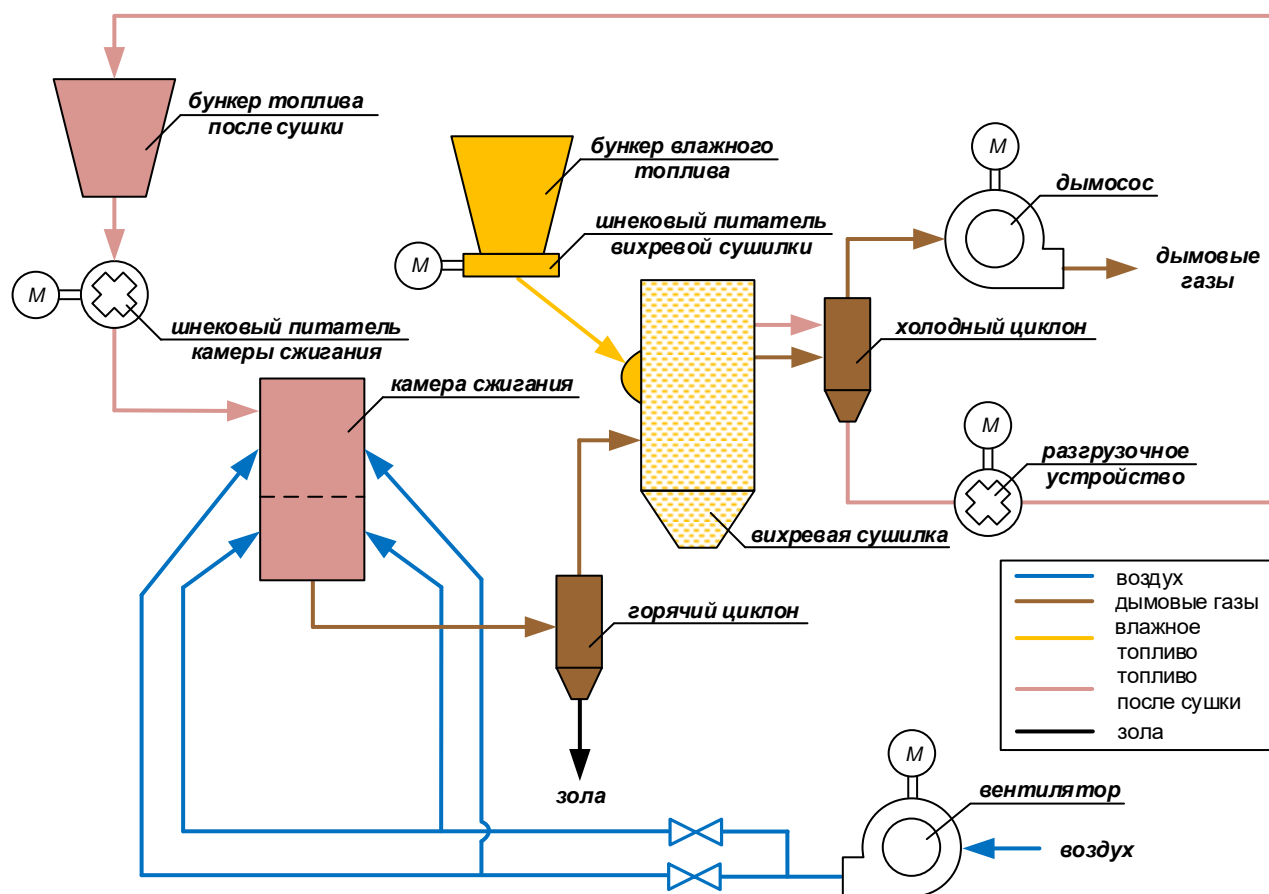


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема установки.

По результатам работы опытно – промышленного образца установки утилизации органических отходов, изучения его технологической схемы и особенностей режимов функционирования, создана математическая модель вихревой сушилки. По каналу «задание частоты вращения частотно-регулируемому преобразователю (ЧРП) сушилки  $\omega_{\text{ЧРП}}^3 \rightarrow$  температура дымовых газов на выходе из сушилки (перед дымососом)  $t_{\text{г.ДС}}$ »



математическая модель представлена передаточной функцией объекта регулирования  $W_{op}(s)$  вида:

$$W_{op}(s) = \frac{k_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}} k_m k_{unn}}{T_{чрп} T_m T_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}} s^3 + (T_{чрп} T_m + T_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}} (T_{чрп} + T_m)) s^2 + (T_{чрп} + T_m + T_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}) s + 1}, \quad (1)$$

где  $s$  – оператор Лапласа;

$T_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}$ ,  $c$  – постоянная времени передаточной функции по каналу «расход топлива на сушку → температура дымовых газов на выходе из сушилки»;

$k_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}$  – коэффициент усиления передаточной функции по каналу «расход топлива на сушку → температура дымовых газов на выходе из сушилки»;

$k_{unn}$  – коэффициент усиления передаточной функции шнекового питателя (ШП) вихревой сушилки по каналу «частота вращения шнека → расход влажного топлива»;

$k_m$  – коэффициент передачи редуктора привода шнекового питателя;

$T_m$ ,  $c$  – обобщенная постоянная времени элементов механической системы привода шнекового питателя;

$T_{чрп}$ ,  $c$  – постоянная времени ЧРП электропривода шнекового питателя.

Коэффициент усиления  $k_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}$  и постоянная времени  $T_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}$  передаточной функции (1) изменяются в зависимости от значений параметров  $x_1$  (исходная влажность топлива, %),  $x_2$  (влажность топлива после сушки, %),  $\Theta_1$  (температура влажного топлива на входе в сушилку, °C),  $\Theta_2$  (температура влажного топлива на выходе из сушилки, °C). Для разных режимов работы установки, её нагрузок и видов топлив  $k_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}$  и  $T_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}$  изменяются в диапазонах:

$$400 = k_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}^{(-)} \leq k_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}} \leq k_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}^{(+)} = 6 \cdot 10^3, \quad (2)$$

$$4 = T_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}^{(-)} \leq T_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}} \leq T_{G_1 \rightarrow t_{z,dc}}^{(+)} = 12. \quad (3)$$

В процессе работы установки возмущения по каналам  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $G_1$  (расход влажного топлива на сушку,  $\frac{кг}{с}$ ) являются неконтролируемыми.

Коэффициент  $k_{unn}$  зависит от насыпной плотности подаваемых топлив или их смеси. Определено экспериментально, что насыпная плотность неконтролируемо изменяется в процессе работы установки, что приводит к неконтролируемому изменению коэффициента  $k_{unn}$  в диапазоне:

$$2 = k_{unn}^{(-)} \leq k_{unn} \leq k_{unn}^{(+)} = 4,2. \quad (4)$$

В связи с этим возникает потребность синтеза адаптивного регулятора – стабилизатора температуры дымовых газов за сушилкой.

Для опытно-промышленного образца установки принимаем числовые значения других параметров, входящих в передаточную функцию (1):  $k_m = 0,03$ ,  $T_m = 0,3$  с,  $T_{чрп} = 2$  с.

Математическая модель камеры сжигания по каналу «задание частоты вращения ротора шнекового питателя камеры сжигания  $\omega_{\text{эд}}^{\text{unn}} \rightarrow$  температура дымовых газов в камере сжигания  $T_{\text{дэ}} \gg$  представлена в виде передаточной функции:

$$W_{\text{оп}}^{\text{кк}}(s) = \frac{T_{\text{дэ}}}{\omega_{\text{эд}}^{\text{unn}}} = \frac{k_{B_p \rightarrow T_{\text{дэ}}} k_M^{\text{кк}} k_{\text{unn}}^{\text{кк}}}{(T_{mn} s + 1)(T_{T_a \rightarrow T_{\text{дэ}}} s + 1)(T_M^{\text{кк}} s + 1)(T_{\text{чрп}} s + 1)}, \quad (5)$$

где  $k_{B_p \rightarrow T_{\text{дэ}}}$  – коэффициент усиления модели камеры сжигания по каналу «расход топлива после сушки  $\rightarrow$  температура дымовых газов в камере сжигания»;

$k_M^{\text{кк}}$  – коэффициент усиления модели редуктора привода шнекового питателя камеры сжигания по каналу «частота вращения ротора  $\rightarrow$  расход топлива после сушки на сжигание»;

$k_{\text{unn}}^{\text{кк}}$  – коэффициент усиления модели шнекового питателя камеры сжигания по каналу «частота вращения ротора  $\rightarrow$  расход топлива после сушки на сжигание»;

$T_{mn}, c$  – постоянная времени модели термопары камеры сжигания;

$T_{\text{чрп}}, c$  – постоянная времени модели ЧРП;

$T_{T_a \rightarrow T_{\text{дэ}}}, c$  – постоянная времени передаточной функции модели камеры сжигания по каналу «адиабатическая температура горения  $\rightarrow$  температура дымовых газов на выходе камеры сжигания»;

$T_M^{\text{кк}}, c$  – постоянная времени модели электропривода шнекового питателя камеры сжигания по каналу «частота вращения  $\rightarrow$  расход топлива после сушки на сжигание».

На основании экспериментальных данных и по результатам моделирования динамических характеристик объекта регулирования по каналу «задание частоты вращения ротора шнекового питателя камеры сжигания  $\rightarrow$  температура дымовых газов в камере сжигания» определено, что характеристики:

– являются нестационарными (происходит изменение параметров:  $k_{B_p \rightarrow T_{\text{дэ}}}, k_{\text{unn}}^{\text{кк}}, T_{T_a \rightarrow T_{\text{дэ}}}$ );

– зависят от физических и химических характеристик сжигаемого топлива;

– зависят от режима работы установки;

– различны для разных видов топлива.

Физические и химические характеристики сжигаемого топлива могут изменяться в процессе работы установки также и для одного вида топлива. Эти изменения в большинстве случаев являются неконтролируемыми.

Определены числовые значения параметров передаточной функции (5) для различных нагрузок при работе установки в режиме сжигания:

$$1,27 \cdot 10^4 = k_{B_p \rightarrow T_{\text{дэ}}}^{\text{min}} \leq k_{B_p \rightarrow T_{\text{дэ}}} \leq k_{B_p \rightarrow T_{\text{дэ}}}^{\text{max}} = 1,42 \cdot 10^4, \quad k_M^{\text{кк}} = 3,2 \cdot 10^{-4},$$

$$2,2 = k_{\text{unn}}^{\text{кк min}} \leq k_{\text{unn}}^{\text{кк}} \leq k_{\text{unn}}^{\text{кк max}} = 4,9, \quad T_M^{\text{кк}} = 0,3 \text{ с}, \quad T_{mn} = 5 \text{ с}, \quad T_{\text{чрп}} = 2 \text{ с}$$

$$10,3 \text{ с} = T_{T_a \rightarrow T_{\text{дэ}}}^{\text{min}} \leq T_{T_a \rightarrow T_{\text{дэ}}} \leq T_{T_a \rightarrow T_{\text{дэ}}}^{\text{max}} = 1,15 \text{ с}.$$

Следует учесть, что передаточная функция (5) не имеет экстремумов и не происходит взаимной компенсации коэффициентов  $k_{B_p \rightarrow T_{\text{дэ}}}$  и  $k_{\text{unn}}^{\text{кк}}$ , а произведение  $k_{B_p \rightarrow T_{\text{дэ}}} k_M^{\text{кк}} k_{\text{unn}}^{\text{кк}}$  лежит в диапазоне от  $8,94 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с}$  до  $22,27 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с}$ .

По результатам моделирования определено, что при совместной работе камеры сжигания и сушилки возникает положительная обратная связь по температуре дымовых газов на выходе камеры сжигания.

По газовому тракту установки из камеры сжигания удаляются образовавшиеся в процессе сжигания топлива дымовые газы (газоходы) и по воздушному подается воздух, необходимый для сжигания топлива (воздуховоды). Для построения математической модели газоздушный тракт установки условно разбит на ряд участков.

Для каждого участка ГВТ определены динамические и статические характеристики математических моделей. Математическая модель ГВТ установки представлена системой дифференциальных уравнений 1 порядка.

Для разработки систем автоматического регулирования используются математические модели, которые описывают динамические характеристики газового и воздушного трактов (ГВТ) при разных нагрузках и различных режимах работы установки. Для воздушного тракта установки по каналу «давление на напоре дутьевого вентилятора  $p_{ДВ}$  → давление воздуха в нижней части камеры сжигания  $p_{кс}$ » передаточная функция будет иметь вид:

$$W_{\text{возд.тракт}}(s) = \frac{p_{кс}}{p_{ДВ}} = \frac{k_{\text{возд.тракт}}}{T_{\text{возд.тракт}}s + 1}; \quad (6)$$

где  $k_{\text{возд.тракт}}$  – коэффициент усиления;

$T_{\text{возд.тракт}}$ ,  $c$  – постоянная времени;

$p_{кс}$ ,  $Pa$  – давление воздуха в нижней части камеры сжигания;

$p_{ДВ}$ ,  $Pa$  – давление на напоре дутьевого вентилятора.

Для газового тракта установки по каналу «разрежение на всасе дымососа → разрежение в верхней части камеры сжигания» передаточная функция будет иметь вид:

$$W_{\text{газ.тракт}}(s) = \frac{p_m}{p_{ДС}} = \frac{-k_{1\_газ.тракт} k_{2\_газ.тракт} k_{3\_газ.тракт}}{(T_{1\_газ.тракт}s + 1)(T_{2\_газ.тракт}s + 1)(T_{3\_газ.тракт}s + 1)}; \quad (7)$$

где  $k_{1\_газ.тракт}$ ,  $T_{1\_газ.тракт}$ ,  $c$  – коэффициент усиления, постоянная времени 1-го участка газового тракта установки (камера сжигания - сушилка);

$k_{2\_газ.тракт}$ ,  $T_{2\_газ.тракт}$ ,  $c$  – коэффициент усиления, постоянная времени 2-го участка газового тракта установки (сушилка);

$k_{3\_газ.тракт}$ ,  $T_{3\_газ.тракт}$ ,  $c$  – коэффициент усиления, постоянная времени 3-го участка газового тракта установки (сушилка - дымосос);

$p_m$ ,  $Pa$  – разрежение в верхней части камеры сжигания;

$p_{ДС}$ ,  $Pa$  – разрежение на всасе дымососа.

Величины  $p_{fan}$  и  $p_{exh}$  в выражениях (6) и (7) определяется по формуле:

$$p_{ДВ/ДС} = k_{ДВ/ДС}^p \omega_{ДВ/ДС}^2,$$

где  $k_{ДВ/ДС}^p$  – коэффициент взаимосвязи параметров дутьевого вентилятора (дымососа) по каналу «частота вращения – давление (разрежение) на стороне нагнетания (всаса)»;

$\omega_{ДВ/ДС}$ ,  $c^{-1}$  – частота вращения дутьевого вентилятора/дымососа.

Частотно-регулируемые приводы ДВ и ДС по каналам «задание ЧРП частоты вращения  $\omega_{\text{зад ДВ/ДС}}^{\text{ЧРП}} \rightarrow$  текущая частота вращения электродвигателя ДВ/ДС  $\omega_{\text{ЭД ДВ/ДС}}^{\text{ЧРП}}$ » описываются передаточными функциями вида:

$$W_{\text{ЧРП}}^{\text{РОВ/РР}}(s) = \frac{\omega_{\text{ЭД ДВ/ДС}}^{\text{ЧРП}}}{\omega_{\text{зад ДВ/ДС}}^{\text{ЧРП}}} = \frac{k_{\text{ЧРП}}^{\text{РОВ/РР}}}{T_{\text{ЧРП}}^{\text{РОВ/РР}} s + 1},$$

где  $k_{\text{ЧРП}}^{\text{РОВ/РР}}$  – коэффициент усиления ЧРП РОВ/РР;

$T_{\text{ЧРП}}^{\text{РОВ/РР}}$ ,  $c$  – постоянная времени ЧРП РОВ/РР.

Принимаем типовое значение времени разгона для частотных преобразователей электродвигателей  $T_{\text{ЧРП}}^{\text{РОВ}} = T_{\text{ЧРП}}^{\text{РР}} = 2$  с. Коэффициент усиления ЧРП РОВ/РР равен  $k_{\text{ЧРП}}^{\text{РОВ}} = k_{\text{ЧРП}}^{\text{РР}} = 1$ .

Параметры передаточной функции (6) зависят от нагрузки и режима работы установки и определяются частотой вращения ДВ  $\omega_{\text{ДВ}}$ , а для (7) – частотой вращения ДС  $\omega_{\text{ДС}}$ . Произведение  $k_{1\_газ.тракт} k_{2\_газ.тракт} k_{3\_газ.тракт}$  в расчетах принято равным -0,97, т.к. определено для нагрузки, при которой установка работает наибольшее количество времени.

Передаточные функции объектов регулирования (6) и (7) определены для случая, когда воздушный и газовый тракты установки рассматриваются отдельно и использовались для синтеза корректирующих устройств.

При определении математических моделей была выявлена двухсторонняя взаимосвязь газового и воздушного трактов. Передаточные функции, описывающие межканальные связи воздушного и газового трактов установки имеют вид:

– по каналу «давление воздуха в нижней части камеры сжигания  $p_{\text{кс}} \rightarrow$  разрежение в верхней части камеры сжигания  $p_{\text{м}}$ »:

$$W_{p_{\text{кс}}-p_{\text{м}}}(s) = \frac{p_{\text{кс}}}{p_{\text{м}}} = \frac{k_{p_{\text{кс}}-p_{\text{м}}}}{T_{p_{\text{кс}}-p_{\text{м}}} s + 1}, \quad (8)$$

где  $k_{p_{\text{кс}}-p_{\text{м}}}$ ,  $T_{p_{\text{кс}}-p_{\text{м}}}$ ,  $c$  – коэффициент усиления, постоянная времени;

– по каналу «разрежение в верхней части камеры сжигания  $p_{\text{м}} \rightarrow$  давление воздуха в нижней части камеры сжигания  $p_{\text{кс}}$ »:

$$W_{p_{\text{м}}-p_{\text{кс}}}(s) = \frac{p_{\text{м}}}{p_{\text{кс}}} = \frac{k_{p_{\text{м}}-p_{\text{кс}}}}{T_{p_{\text{м}}-p_{\text{кс}}} s + 1}, \quad (9)$$

где  $k_{p_{\text{м}}-p_{\text{кс}}}$ ,  $T_{p_{\text{м}}-p_{\text{кс}}}$ ,  $c$  – коэффициент усиления, постоянная времени передаточной функции  $W_{p_{\text{м}}-p_{\text{кс}}}(s)$ .

Для передаточной функции (8)  $k_{p_{\text{кс}}-p_{\text{м}}} = 1$ , а  $T_{p_{\text{кс}}-p_{\text{м}}}$  изменяется в диапазоне от 8,2 до 1,6 с при частотах вращения ДС от  $62,8 \text{ с}^{-1}$  до  $314 \text{ с}^{-1}$ . Для передаточной функции (9)  $k_{p_{\text{м}}-p_{\text{кс}}} = -1$ , а  $T_{p_{\text{м}}-p_{\text{кс}}}$  изменяется в диапазоне от 9,32 до 1,56 с при частотах вращения ДВ от  $52,6 \text{ с}^{-1}$  до  $314 \text{ с}^{-1}$ .

**Во второй главе** выполнен синтез регуляторов для основных технологических параметров установки утилизации отходов.

Экспериментально определено, что производительность установки утилизации органических отходов определяется загрузкой вихревой сушилки влажным топливом. Степень загрузки вихревой сушилки определяется температурой сушильного агента на

выходе из сушилки. Динамические характеристики температуры дымовых газов за сушилкой существенно зависят от режима её работы, недостаточно точно известны (априорно определены по результатам моделирования) и не стационарны, учет их изменений невозможен. Это обуславливает применение адаптивных алгоритмов управления. Недопустимость вывода объекта регулирования на границу устойчивости, невозможность подачи тестовых ступенчатых или импульсных воздействий по технологическим причинам обуславливают выбор типа адаптивного алгоритма управления. Выполнен синтез адаптивного наблюдателя для контура адаптации регулятора производительности сушилки. Адаптивное наблюдающее устройство предназначено для идентификации параметров объекта регулирования (при недостаточной текущей информации о его состоянии) и оценивания его состояния (при недостаточной априорной информации о его параметрах).

Осуществлена проверка работоспособности регулятора производительности сушилки при изменении задания  $t_{2,ДС}^3$  и при максимальном ступенчатом возмущении, вызванном резким изменением характеристик топлива, подаваемого в сушилку опытно-промышленного образца установки. Полученные переходные процессы представлены на рис. 2. На рис. 2а показано изменение температуры дымовых газов за сушилкой  $t_{2,ДС}$  при ступенчатом изменении задания  $t_{2,ДС}^3$  со  $150^{\circ}C$  до  $160^{\circ}C$  в момент времени  $t = 5$  с. Переходные процессы 1, 2, 3, представленные на рис. 2а, получены, соответственно, для минимальных, средних и максимальных значений параметров объекта регулирования  $k_{G_1 \rightarrow t_{2,ДС}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{2,ДС}}$ ,  $k_{ин}$  (неравенства ,, (3), (4)). На рис. 2б показано изменение температуры дымовых газов за сушилкой  $t_{2,ДС}$  при ступенчатом изменении в момент времени  $t = 5$  с параметров объекта регулирования  $k_{G_1 \rightarrow t_{2,ДС}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{2,ДС}}$ ,  $k_{ин}$  с их минимальных значений на максимальные, а в момент времени  $t = 85$  с – с их максимальных значений на минимальные.

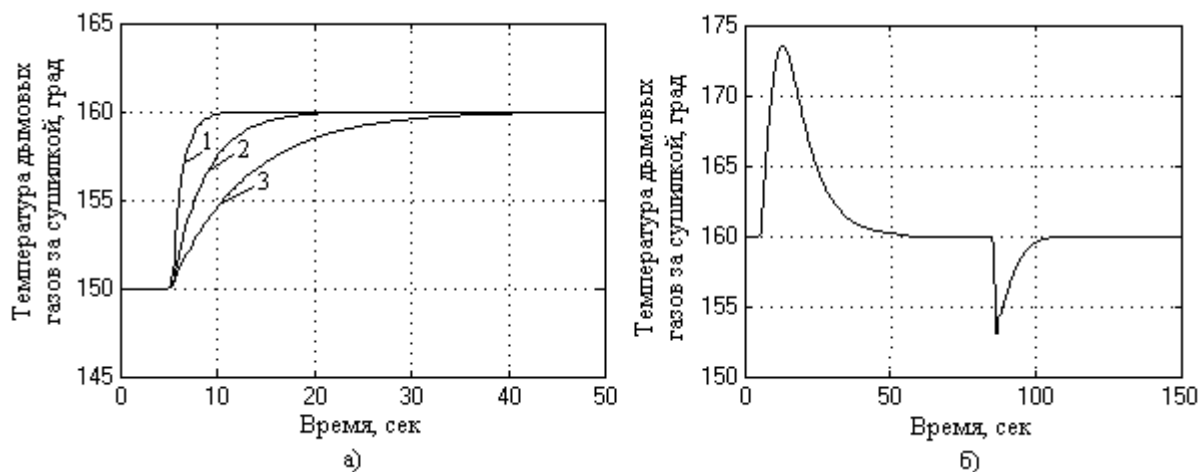


Рис. 2. Переходные процессы в замкнутом контуре регулятора производительности сушилки, полученные при моделировании:

а) – при изменении задания регулятору производительности сушилки  $t_{2,ДС}^3$  со  $150^{\circ}C$  до  $160^{\circ}C$  (1,2,3 – переходные процессы для минимальных, средних и максимальных значений параметров объекта регулирования  $k_{G_1 \rightarrow t_{2,ДС}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{2,ДС}}$ ,  $k_{ин}$ , соответственно);

б) – при ступенчатом изменении параметров объекта регулирования  $k_{G_1 \rightarrow t_{2,DC}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{2,DC}}$ ,  $k_{ин}$ .

По виду переходных процессов, представленных на рис. 2а и рис. 2б видно, что переходные процессы в замкнутом контуре регулятора производительности сушилки являются устойчивыми. Регулятор с нулевой статической ошибкой отработывает изменение  $t_{2,DC}^3$  и действие возмущений. В обоих случаях переходные процессы в системе являются апериодическими. Длительности переходных процессов при изменении  $t_{2,DC}^3$  для минимальных, средних, максимальных значений параметров объекта регулирования  $k_{ин}$ ,  $k_{G_1 \rightarrow t_{2,DC}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{2,DC}}$  составили 8 с, 20 с, 35 с, соответственно. При изменении параметров объекта регулирования  $k_{G_1 \rightarrow t_{2,DC}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{2,DC}}$ ,  $k_{ин}$  с их минимальных значений на максимальные отклонение регулируемого параметра  $t_{2,DC}$  от задания составило  $1,3\varepsilon_{кр}$  и длительность переходного процесса – 50 с, при изменениях с максимальных значений на минимальные соответственно  $-0,7\varepsilon_{кр}$  и 20 с (на рис. 2б графики показаны для  $\varepsilon_{кр} = 10^\circ C$ ). Длительность переходных процессов и максимальные отклонения регулируемой величины от задания при параметрических возмущениях определяются величиной изменений параметров объекта регулирования  $k_{G_1 \rightarrow t_{2,DC}}$ ,  $T_{G_1 \rightarrow t_{2,DC}}$ ,  $k_{ин}$  и скоростью их идентификации. На практике, по результатам испытаний, установлено, что изменения этих параметров происходят с меньшей скоростью и величиной, что будет приводить к отклонению регулируемого параметра  $t_{2,DC}$  от задания на меньшие величины, чем на рис. 2б.

Показано, что применение адаптивного алгоритма функционирования регулятора производительности обеспечивает работоспособность сушилки во всех режимах работы установки и во всем диапазоне нагрузок установки.

При моделировании динамических характеристик объекта регулирования по каналу «расход топлива – температура дымовых газов на выходе камеры сжигания» определено, что они являются нестационарными и зависят от физических характеристик сжигаемого топлива и различны для разных видов топлива. Физические характеристики сжигаемого топлива могут изменяться в процессе работы установки также и для одного вида топлива. Эти изменения в большинстве случаев являются неконтролируемыми. Регулятор тепловой нагрузки, функцией которого является поддержание температуры дымовых газов на выходе из камеры сжигания установки в заданном диапазоне, должен работать во всех режимах (пиролиз, газификация, сжигание) и во всем диапазоне нагрузок установки. Все эти требования обуславливают необходимость применения адаптивных алгоритмов управления в контуре обратной связи регулятора тепловой нагрузки (РТН).

Синтезированный контур обратной связи регулятора тепловой нагрузки установки представляет собой адаптивную нечеткую АСР с двухуровневой структурой: с нечетким контроллером на ведомом исполнительном уровне и нейро-нечетким блоком адаптации на ведущем координационном уровне. Нейро-нечеткий блок адаптации на ведущем координационном уровне осуществляет идентификацию динамических характеристик объекта регулирования. Затем производит коррекцию продукционных правил нечеткого контроллера исполнительного уровня. В качестве модели в нейро-нечетком блоке идентификации использована ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System) – адаптивная сеть нечеткого вывода. Параметры настройки пре-

регулятора АСР тепловой нагрузки установки должны обеспечивать устойчивость системы и заданные показатели качества переходных процессов в замкнутом контуре РТН при всех возможных параметрах объекта регулирования (5).

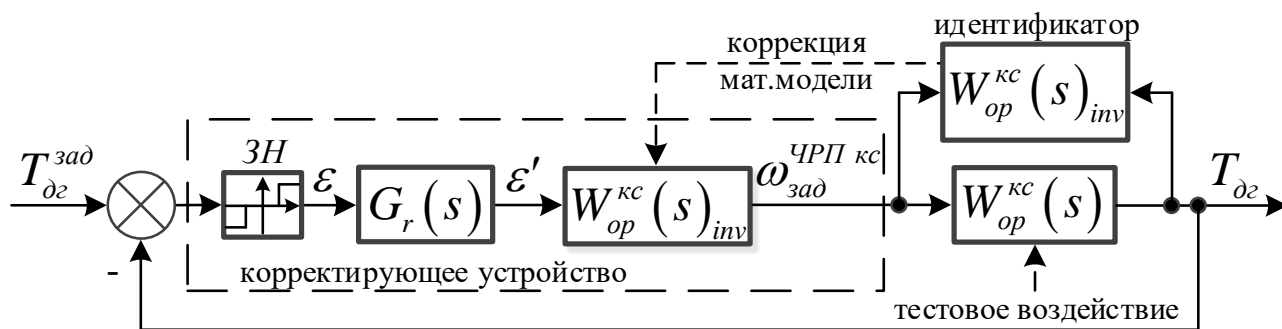


Рис. 3. Структурная схема АСР тепловой нагрузки установки.

$W_{op}^{kc}(s)$  – объект регулирования – камера сжигания по каналу «задание частоты вращения ротора шнекового питателя – температура дымовых газов в камере сжигания»;  $W_{op}^{kc}(s)_{inv}$  – инверсная нечеткая модель камеры сжигания по каналу «задание частоты вращения ротора шнекового питателя – температура дымовых газов в камере сжигания»;  $G_r(s)$  – передаточная функция пре-регулятора;  $T_{\Delta z}^{зад}$ ,  $^{\circ}C$  – задание регулятору тепловой нагрузки установки;  $\epsilon$ ,  $^{\circ}C$  – рассогласование на входе регулятора тепловой нагрузки;  $\epsilon'$ ,  $^{\circ}C$  – выход пре-регулятора  $G_r(s)$ ;  $\omega_{зад}^{ЧПП inv}$ ,  $c^{-1}$  – задание частоты вращения ЧПП шнекового питателя камеры сжигания, ЗН – зона нечувствительности.

Выполнено моделирование регулятора тепловой нагрузки. Критериями качества переходного процесса при изменении задания регулятору являлись: перерегулирование  $\sigma \rightarrow 0$  % (допустимое перерегулирование:  $\sigma_{дон} \leq 20$  %) и минимальное время регулирования (переходного процесса)  $t_n \rightarrow \min$ , т.е. предпочтительным являлось получение граничного аperiodического переходного процесса. Работа разработанного регулятора сравнивалась с работой ПИД-регулятора. На рис. 4 приведены переходные процессы, которые определялись при изменении задания регулятору тепловой нагрузки установки с 850 до 860  $^{\circ}C$  в момент времени 10 с.

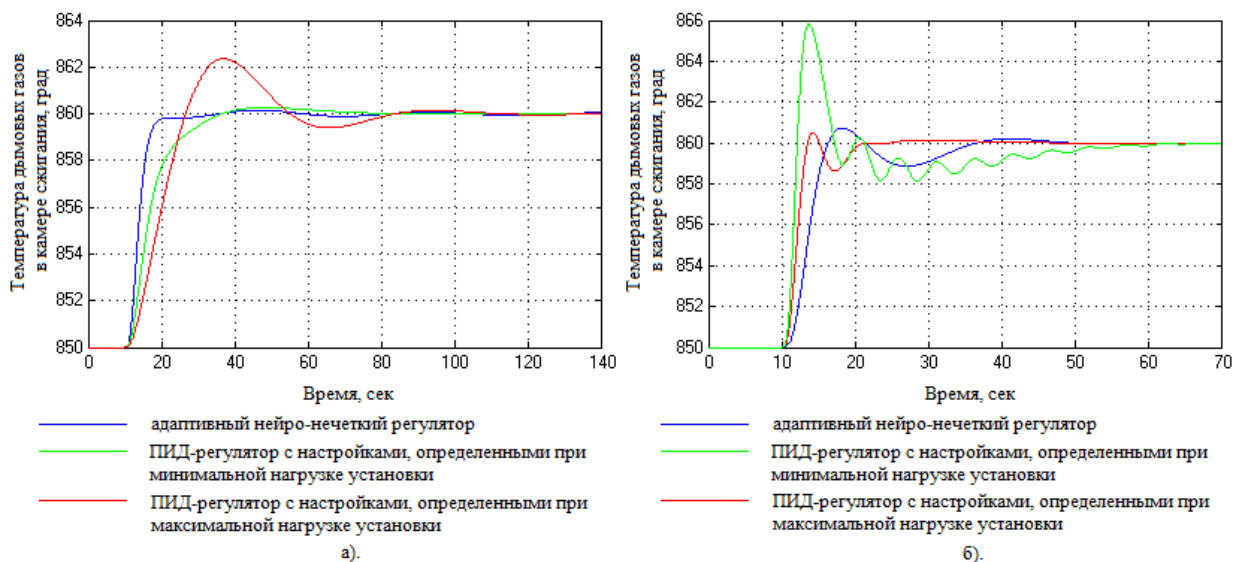


Рис. 4. Переходные процессы в замкнутом контуре АСР тепловой нагрузки при изменении задания регулятору тепловой нагрузки.

Переходные процессы определялись для динамических характеристик объекта регулирования при нагрузке установки: а – минимальной; б – максимальной.

В Таблице 1 приведено сравнение переходных процессов АСР тепловой нагрузки при использовании в качестве корректирующего устройства нейро-нечеткого регулятора и ПИД-регулятора при изменении задания.

Таблица 1

Анализ переходных процессов АСР тепловой нагрузки установки при изменении задания

Тип регулятора	Параметры настройки		Показатели качества переходного процесса	
	минимальная нагрузка	максимальная нагрузка	минимальная нагрузка	максимальная нагрузка
ПИД	$k_p = 0,21$ $T_u = 13 \text{ с}$ $T_\delta = 5 \text{ с}$ $k'_\delta = 10$	-	$t_n = 70 \text{ с}$ $\sigma = 2,7 \%$	$t_n = 50 \text{ с}$ $\sigma = 60 \%$
	-	$k_p = 0,14$ $T_u = 7 \text{ с}$ $T_\delta = 3 \text{ с}$ $k'_\delta = 10$	$t_n = 80 \text{ с}$ $\sigma = 20 \%$	$t_n = 12 \text{ с}$ $\sigma = 5 \%$
Нейро-нечеткий	$k_p = 0,96$ $T_u = 4 \text{ с}$ $T_\delta = 0 \text{ с}$		$t_n = 70 \text{ с}$ $\sigma = 1,6 \%$	$t_n = 40 \text{ с}$ $\sigma = 8 \%$

Результаты численных экспериментов, приведенные в Таблице 1 и на рис. 4 показывают, что:



1. при минимальной нагрузке установки настройки ПИД-регулятора (рис. 4а), определенные для динамических характеристик объекта регулирования при максимальной нагрузке установки, переходный процесс не соответствует заданным критериям качества. Получен длительный переходный процесс, и превышено значение допустимого перерегулирования  $\sigma_{don}$ ;
2. при максимальной нагрузке установки настройки ПИД-регулятора (рис. 4б), определенные для динамических характеристик объекта регулирования при минимальной нагрузке установки, переходный процесс не соответствует заданным критериям качества. Получен переходный процесс с перерегулированием больше допустимого  $\sigma_{don}$  и наложенным затухающим колебательным процессом;
3. если настройки ПИД-регулятора определялись для текущей нагрузки установки, то качество переходных процессов соответствует заданным ( $\sigma < \sigma_{don}$ ,  $t_n \rightarrow \min$ );
4. при использовании нейро-нечеткого регулятора качество переходных процессов соответствует заданным в рассмотренных режимах работы установки (без изменения параметров настройки пре-регулятора).

Т.к. настройки пре-регулятора корректирующего устройства нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки определены для наиболее инерционной динамики объекта регулирования, то переходный процесс при изменении задания при максимальной нагрузке установки имеет большую длительность, чем при использовании ПИД-регулятора.

Другим режимом работы регулятора тепловой нагрузки является отработка возмущающих воздействий. Сравнивалась работа корректирующих устройств для случаев резкого изменения динамики объекта регулирования (рис. 5, Таблица 2). При моделировании работы АСР тепловой нагрузки установки настройки ПИД-регулятора скачкообразно изменялись в моменты изменения динамики объекта регулирования. При изменении динамических характеристик объекта регулирования выполнялась их идентификация и коррекция инверсной модели в корректирующем устройстве нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки. В этот промежуток времени работа регулятора блокировалась.

При резком увеличении  $k_{B_p \rightarrow T_{\alpha c}}$  в передаточной функции (5) происходит резкое повышение температуры дымовых газов в камере сжигания. Подобные ситуации неоднократно фиксировались при управлении тепловой нагрузкой установки в ручном режиме управления. В таких режимах работы установки нет возможности качественно безаварийно управлять температурой дымовых газов в камере сжигания. Увеличение  $k_{B_p \rightarrow T_{\alpha c}}$  происходит неконтролируемо из-за изменения химического состава сжигаемого топлива (увеличения содержания углерода) за очень короткий промежуток времени на большую величину. В таких режимах для ограничения роста температуры дымовых газов выполняется отключение шнекового питателя камеры сжигания (рис. 1).

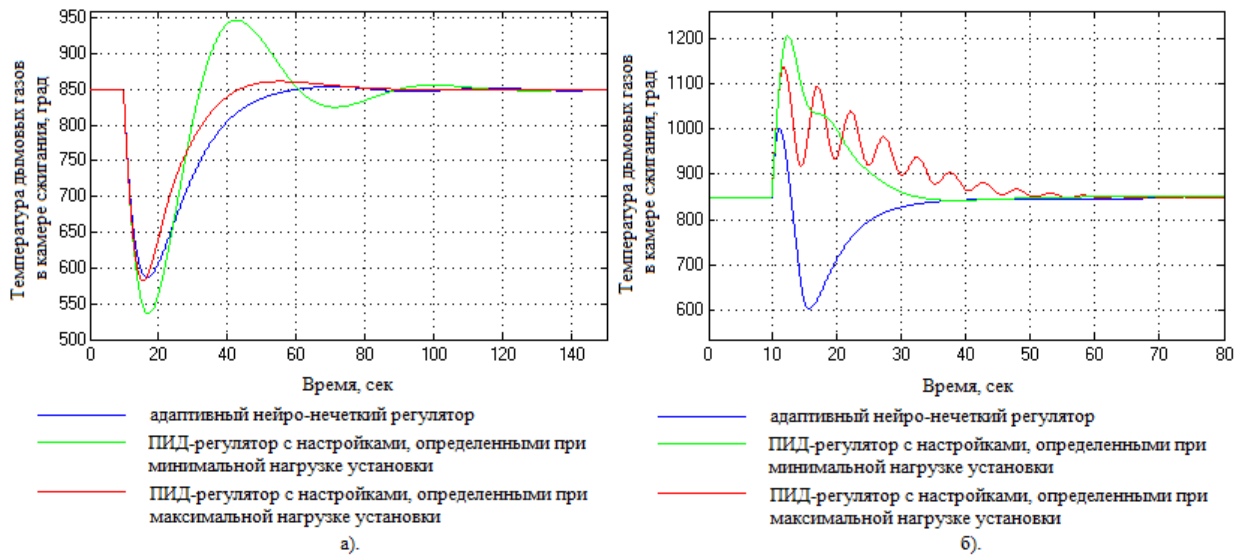


Рис. 5. Переходные процессы в замкнутом контуре АСР тепловой нагрузки при скачкообразном изменении динамических характеристик объекта регулирования для случаев:

- а – скачкообразного изменения  $k_{B_p \rightarrow T_{\partial z}}^{\max}$ ,  $k_{ун}^{к\text{с max}}$ ,  $T_{T_a \rightarrow T_{\partial z}}^{\max} \rightarrow k_{B_p \rightarrow T_{\partial z}}^{\min}$ ,  $k_{ун}^{к\text{с min}}$ ,  $T_{T_a \rightarrow T_{\partial z}}^{\min}$  соответственно;
- б – скачкообразного изменения  $k_{B_p \rightarrow T_{\partial z}}^{\min}$ ,  $k_{ун}^{к\text{с min}}$ ,  $T_{T_a \rightarrow T_{\partial z}}^{\min} \rightarrow k_{B_p \rightarrow T_{\partial z}}^{\max}$ ,  $k_{ун}^{к\text{с max}}$ ,  $T_{T_a \rightarrow T_{\partial z}}^{\max}$  соответственно.

В Таблице 2 приведено сравнение переходных процессов АСР тепловой нагрузки при использовании в качестве корректирующего устройства нейро-нечеткого регулятора и ПИД-регулятора при скачкообразном изменении динамических характеристик объекта регулирования в момент времени 10 с. Изменение динамических характеристик объекта регулирования с минимальных на максимальные (рис. 5б) может приводить к скачкообразному увеличению температуры дымовых газов. На реальном объекте при резком изменении химического состава топлива, поступающего в камеру сжигания, увеличение температуры достигало 300 °С.

Таблица 2

Анализ переходных процессов АСР тепловой нагрузки установки при скачкообразном изменении динамических характеристик объекта регулирования

Тип регулятора	Параметры настройки		Показатели качества переходного процесса	
	минимальная нагрузка	максимальная нагрузка	минимальная нагрузка	максимальная нагрузка
ПИД	$k_p = 0,21$ $T_u = 13 \text{ с}$ $T_\theta = 5 \text{ с}$ $k'_\theta = 10$	-	$t_n = 110 \text{ с}$ $\Delta_{\text{дин}} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 0,89$	$t_n = 25 \text{ с}$ $\Delta_{\text{дин}} = 360 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 1$
	-	$k_p = 0,14$ $T_u = 7 \text{ с}$ $T_\theta = 3 \text{ с}$	$t_n = 70 \text{ с}$ $\Delta_{\text{дин}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 1$	$t_n = 50 \text{ с}$ $\Delta_{\text{дин}} = 290 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 1$

Тип регулятора	Параметры настройки		Показатели качества переходного процесса	
	минимальная нагрузка	максимальная нагрузка	минимальная нагрузка	максимальная нагрузка
		$k'_0 = 10$		
Нейро-нечеткий	$k_p = 0,96$ $T_u = 4 \text{ с}$ $T_0 = 0 \text{ с}$		$t_n = 70 \text{ с}$ $\Delta_{дин} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 1$	$t_n = 25 \text{ с}$ $\Delta_{дин} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ $\psi = 1$

Критериями качества переходного процесса в режимах отработки возмущающих воздействий являлись: время переходного процесса  $t_n$  ( $t_n \rightarrow \min$ ), динамическая ошибка  $\Delta_{дин}$  ( $\Delta_{дин} \rightarrow \min$  и  $\Delta_{дин} \leq \Delta_{max}^{дон} - T_{де}^{зад}$ ,  $\Delta_{max}^{дон} = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ , где  $T_{де}^{зад} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta_{max}^{дон}$  – максимальное кратковременное значение температуры дымовых газов в камере сжигания), степень затухания  $\psi$  ( $\psi = 0,95 \div 1$ ).

Использование в качестве корректирующего устройства для АСР тепловой нагрузки ПИД-регулятора не позволяет получить переходные процессы с требуемыми критериями качества при изменении динамических характеристик объекта регулирования с минимальных на максимальные (рис. 5б).

По результатам моделирования нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки определен алгоритм его работы в режимах изменения динамических характеристик объекта регулирования (5). При отклонении температуры от задания в диапазоне менее  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (при постоянном задании) работа регулятора осуществляется в штатном режиме. При отклонении температуры дымовых газов в камере сжигания от текущего задания более чем на  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (при постоянном задании) АСР выполняет действия по следующему алгоритму:

1. блокировка работы регулятора;
2. отключение шнекового питателя камеры сжигания в случае аварийного повышения температуры дымовых газов;
3. идентификация объекта регулирования;
4. изменение задания ЧРП;
5. включение ЧРП и регулятора в работу.

При моделировании и автоматизации технологически сложных реальных объектов автоматического управления, в условиях отсутствия, неопределенности или неточности априорной информации об объекте, когда система функционирует в условиях возникновения различных неопределенных внешних и внутренних ситуаций, возмущающих воздействий используется робастный метод управления. Синтез робастных ПИД-регуляторов выполнен для регуляторов давления общего воздуха и разрежения в камере сжигания установки утилизации органических отходов. По результатам математического моделирования показана работоспособность регуляторов общего воздуха и разрежения установки: сохраняются необходимые запасы устойчивости по амплитуде и фазе и выполняются требования к качеству переходных процессов.

Выполнено моделирование связной работы контуров регулирования ГВТ установки. Разработаны компенсаторы смежных (межканальных) связей газового и воздушного трактов установки. Показано преимущество предлагаемых схем РОВ, РР.

Разработан пошаговый метод настройки ПИД-регуляторов. Экспериментальные методы настройки ПИД-регуляторов используются для проверки оптимальности настроек, полученных расчетными методами, или для их оптимизации. При помощи расчетных методов настройки ПИД-регуляторов можно получить начальные настройки ПИД-регулятора, которые впоследствии необходимо будет корректировать для реальной системы регулирования. Существующие экспериментальные методы недостаточно формализованы и зачастую не представлены в виде пошагового алгоритма. Алгоритм позволяет экспериментально выполнять настройку ПИД-регуляторов с объектами регулирования, обладающими различными динамическими характеристиками (инерционные, малоинерционные).

**В третьей главе** приведены алгоритмы управления установкой утилизации отходов.

Разработанное технологическое оборудование обладает универсальностью и может использоваться для утилизации широкого спектра органических отходов. Опционно оборудование может комплектоваться блоком нетермической сушки сырья, работа которого основана на применении химических реагентов специально для утилизации специфических и экологически опасных отходов.

По результатам работы опытно – промышленного образца установки, математического моделирования режимов его работы, изучения его технологической схемы разработаны алгоритмы управления установкой утилизации органических отходов в различных режимах работы.

Всережимная АСУ ТП может обеспечить возможность управления комплексом в автоматическом режиме при реализации разных процессов:

- переходных - пуск, останов, изменение химических или физических характеристик топлива;
- стационарных - контроль и безаварийное протекание технологического процесса.

АСУ ТП управляет работой комплекса в целом, а также его узлов и агрегатов: сушилки, камеры сжигания, дымососа и дутьевого вентилятора. Работа узлов, агрегатов и определяется режимом работы установки.

Всережимная АСУ ТП позволяет использовать углеродосодержащее сырье, в частности, отходы сельского хозяйства с различными химическими составом и физическими свойствами. Технологическая схема комплекса позволяет перерабатывать высоковлажные виды топлива (куриный помет, подстилочная масса и пр.). Это достигается как за счет конструктивных решений оборудования, так и за счет использования алгоритмов оптимального, адаптивного регулирования, а также использования математических моделей процессов в контурах регулирования. АСУ ТП включает в себя подсистемы дистанционного управления и блокировок, технологических защит, автоматического регулирования, функционально-группового управления, технологической сигнализации, информационно-вычислительных задач (архивация и пр.).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Выполнено математическое моделирование работы узлов и агрегатов установки переработки органических отходов при разных нагрузках и в различных режимах работы: сжигание, пиролиз, газификация.
2. Выполнен синтез автоматических контуров регулирования основных технологических параметров установки.
3. По результатам математического моделирования и на основе экспериментальных данных разработаны управляющие задачи: алгоритмы технологических защит, автоматических регуляторов и функционально-группового управления.
4. Выполнен обзор литературы по технологии утилизации органических отходов и АСУ ТП этих установок.
5. Составлены математические модели узлов и трактов опытно-промышленного образца установки.
6. Разработаны алгоритмы автоматизированного пуска и останова, работы в стационарных режимах (сушка, сжигание, пиролиз, газификация) опытно-промышленного образца установки.
7. Разработаны алгоритмы корректирующих устройств, позволяющих работать установке в режимах полного сжигания, пиролиза или газификации с различными видами топлива.
8. Выполнено математическое моделирование контуров обратной связи, автоматических регуляторов (корректирующих устройств).

Построение автоматизированных систем управления процессами горения позволяет:

- повысить надежность и экономичность работы энергоустановки;
- снизить количество вредных выбросов;
- добиться инвариантности энергетической установки к различным видам топлива;
- варьировать выход конечных продуктов (тепловая и электрическая энергия, биоуголь, синтез-газ);
- с учетом технологических ограничений изменять топливную стратегию, а также использовать выгодные предложения на рынке топлива.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Синтез нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки переработки органических отходов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 9. С. 54-62.
2. Писарев А.В. Экспериментальный пошаговый метод настройки ПИД-регуляторов // Энергетик. 2018. №10. С. 15-17.
3. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Моделирование работы адаптивной системы управления процессом сушки в установке утилизации органических отходов // Автометрия. 2018. № 5. С. 122-128.
4. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Разработка и исследование математических моделей элементов газовоздушного тракта для создания АСУ ТП

установки по переработке органических отходов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, №10. С. 575-583.

5. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Синтез автоматических систем регулирования технологических процессов газовоздушного тракта установки переработки органических отходов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2020 Т.18, №4. С. 86-105.

***В других журналах и изданиях:***

6. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Разработка математической модели газовоздушного тракта установки утилизации органических отходов // Сборник научных трудов X всероссийской конференции «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, 05-09 декабря 2016 г., Часть 1. – С. 46-48.

7. Вильчек С.Ю., Квашнин А.Г., Писарев А.В., Шакиров С.Р. и др. Разработка опытного образца многофункционального энергетического комплекса для переработки высоковлажных отходов сельского хозяйства в тепло и энергоносители. Отчет о выполнении НИОКР. Рег. номер НИОКР: 01201058597. Регистрационный номер ИКРБС: АААА-Б16-216052760072-0. Дата регистрации: 27/05/2016. – 194 с.

8. Гаркуша В.В., Квашнин А.Г., Мишнев А.С., Писарев А.В., Сафронов А.В., Шакиров С.Р., Яковлев В.В. Контроль и корректировка работы автоматизированной системы управления технологическими процессами во время высокотемпературных испытаний. Анализ результатов высокотемпературных испытаний. Доработка автоматизированной системы управления технологическими процессами по результатам испытаний // Отчет о выполнении НИОКР. Рег. Номер НИОКР: 115120210006. Регистрационный номер ИКРБС: АААА-Б16-216082340009-3. Дата регистрации 23/08/2016, – 60 с.

9. Новиков С.И., Писарев А.В. Определение параметров настройки промышленных ПИД – регуляторов расчётными методами // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Труды Десятого Всероссийского студенческого научно-технического семинара: в 2-х томах - Томск, 22-25 апреля 2008. - Томск: ТПУ, 2008. - т. 2, Теплоэнергетическое, экологическое и гуманитарное направления. - С. - 157-160.

10. Писарев А.В., Новиков С.И. Сравнительные исследования расчетных методов определения параметров настроек промышленных ПИД-регуляторов. // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты: Сб. науч. тр. / Под ред. акад. РАН В.Е. Накорякова. – Выпуск 11. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2007. – С. 191 – 200.

11. Писарев А.В., Новиков С.И. Улучшение методов оптимизации настроек автоматических систем регулирования теплоэнергетических объектов // Восьмой Всероссийский студенческий научно-технический семинар "Энергетика: экология, надежность, безопасность". Труды семинара. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 179-182.

12. Писарев А.В., Новиков С.И. Сравнительные исследования методов определения параметров настроек ПИД-регуляторов // Дни науки НГТУ-2007. Материалы научной студенческой конференции / под ред. проф. В.А. Батаева. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – С. 63-64.

13. Писарев А.В., Новиков С.И. Исследование методов настройки ПИД-регуляторов // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. Часть 3. – стр. 177-180.

14. Писарев А.В., Новиков С.И. Исследование методов определения параметров настроек промышленных ПИД-регуляторов // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития // Доклады Международной научно-практической конференции (ТУСУР), 2007. - Часть 2, - С. 76-79.

15. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Применение нечетких моделей в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Тезисы международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2019» АМСА - 2019, Новосибирск, 1-5 июля 2019. – С. 145.

16. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Моделирование информационно-управляющей системы установки по утилизации органических отходов // Тезисы международной конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015» АМСА - 2015, Новосибирск, 19-23 октября 2015. – С. 110-111.

17. Вильчек С.Ю. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Моделирование работы автоматизированной системы управления процессами переработки углеродосодержащих материалов // Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции «Индустриальные информационные системы» ИИС -2015, Новосибирск, 20-24 сентября 2015 г. – С. 14-15.

18. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Моделирование автоматической системы управления непрерывным дозированием сыпучих материалов // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. - 2018. - Т.1. - № 3-1. - С.77-90.

19. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Математическое моделирование работы нейро-нечеткого регулятора тепловой нагрузки установки переработки органических отходов // Тезисы XIX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Кемерово, Россия, 29 октября – 2 ноября 2018 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2018. – С. 36.

20. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Применение нечетких моделей в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Марчуковские научные чтения - 2019: Тезисы Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики" / Ин-т вычислительной математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск, 1–5 июля 2019 г. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2019. С. 145.

21. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Алгоритм формирования выборки данных для идентификации математической модели объекта регулирования нейро-нечеткого регулятора // Тезисы XX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Новосибирск, Россия, 28 октября – 1 ноября 2019 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. – С. 73-74.

22. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Построение адаптивного регулятора производительности сушилки установки утилизации органических отходов // Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов в 10 ч.. Под ред. Достовалова Д.Н. Новосибирск, 04-08 декабря 2017. – С. 42-44.

23. Писарев А.В., Новиков С.И. Предиктор Смита и его применение для компенсации транспортного запаздывания объектов регулирования автоматических систем // Сборник научных трудов НГТУ «Энергосистемы, электростанции и их агрегаты», вып. 12, 2008, С. 169-196.

24. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Математическое моделирование работы газовоздушного тракта установки переработки органических отходов // Тезисы XIX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому

моделированию и информационным технологиям. г. Кемерово, Россия, 29 октября – 2 ноября 2018 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2018. – С. 36-37.

25. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Разработка автоматического регулятора тепловой нагрузки установки утилизации биоотходов // XVIII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. Иркутск 21–25 августа 2017 г. – С. 50.

26. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Разработка алгоритмов автоматического управления для информационно-управляющей системы установки переработки органических отходов // Марчуковские научные чтения 2020: Тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. – С. 150.

27. Шакиров С.Р., Квашнин А.Г., Писарев А.В. Разработка цифровой модели установки по переработке органических отходов // Тезисы XXI Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Новосибирск, Россия, 7 – 11 декабря 2020 г. – Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2020. – С. 28-29.

Подписано в печать

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печ.л. 1,0.

Тираж 100. Зак. № .

---

Отпечатано в типографии