

УДК 681.20; 547.47

В. В. Алексеев, Ю. А. Иванова, В. В. Гаврилов, П. Г. Королев

## Способ оценивания эффективности информационно-измерительных и управляющих систем обеспечения экологической безопасности инсинерации

*Рассмотрены вопросы построения информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС), предназначенных для контроля и управления технологическим процессом термического уничтожения отходов, технические (алгоритмические) решения, направленные на минимизацию воздействия на окружающую среду. Предложен способ проверки корректности работы алгоритмов и оценки эффективности работы ИИУС.*

### Информационно-измерительная и управляющая система, инсинерация, экологическая безопасность

Проблемы уничтожения бытовых и иных отходов тесно взаимосвязаны с проблемами уменьшения техногенного воздействия на природную среду. Статья посвящена рассмотрению вопросов, связанных с проектированием информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) мусоросжигающих установок. В ряде случаев мусор используется совместно с энергетическим топливом для выработки энергии. В отличие от обычного сжигания отходов, оказывающего безусловно вредное воздействие на окружающую среду, инсинерация является решением, позволяющим минимизировать наносимый вред. Оценивание эффективности работы ИИУС производит-

ся для того, чтобы сделать вывод о том, соответствует ли требованиям по экологической безопасности в части предельно допустимых выбросов (ПДВ) создаваемая или эксплуатирующаяся установка.

Основными характеристиками твердых бытовых отходов (ТБО) являются [1]: состав, теплота сгорания, влажность, зольность, выход летучих веществ. Негативные последствия термического уничтожения отходов в зависимости от вида отходов и способы уменьшения вреда [1], [2] представлены в табл. 1. В любом случае должно применяться двухстадийное обезвреживание и алгоритмы, адаптирующие техпроцесс (ТП) к виду и качеству сырья.

Таблица 1

№	Вид отходов	Воздействие	Способы уменьшения вреда
1	Хлорсодержащие отходы (отходы хлорида меди, отходы ПВХ и т. д.)	Выделение в атмосферу большого числа диоксинов и фуранов. Образуются из атомов хлора и неокисленного углерода	Уменьшение выбросов достигается поддержанием оптимального режима ТП; контроль химического недожога; использование камер дожигания
2	Отходы солей мышьяка, ртутные лампы, отходы, содержащие свинец (в том числе пыль и/или опилки свинца)	Содержание в дымовых газах канцерогенных токсичных тяжелых металлов (кадмий, мышьяк, никель), неканцерогенных токсичных тяжелых металлов (ртуть, свинец)	Осуществляется фильтрация, использование топлива со сниженным содержанием тяжелых металлов
3	Медицинские отходы	Содержание в золе токсичных веществ; неполное обезвреживание	Проверка токсичности золы; поддержание заданной температуры горения
4	Углеродсодержащие отходы	Содержание в дымовых газах канцерогенных веществ (бенз(а)пирен) и продуктов неполного сгорания	Обеспечение полноты сгорания, поддержание оптимального режима горения
5	Отходы, содержащие углеводороды	Образование сажи	Обеспечение равномерной температуры горения, хороший приток воздуха

Для создания необходимой для инсинерации температуры в диапазоне 950...1100 °С используется углеводородное топливо (соляр или природный газ), для минимизации массы выбросов при сжигании отходы рассматриваются как топливо.

При известном элементарном составе низшая теплота сгорания [МДж/кг] определяется по эмпирической формуле, предложенной Д. И. Менделеевым:

$$Q_H^P = 0.339C^P + 1.03H^P + 0.109(S_{O+K}^P - O^P) - 0.0251W^P,$$

где  $C^P$ ,  $H^P$ ,  $S_{O+K}^P$ ,  $O^P$  и  $W^P$  – соответственно, доли углерода, водорода, серы, кислорода и влаги в 1 кг отходов.

Коэффициенты в формуле подобраны экспериментально и несколько отличаются от теплоты сгорания отдельных элементов. Низшая теплота сгорания бумаги, древесины, текстиля, резины и пищевых отходов определена в [3]. Структура системы двухстадийной инсинерации схематично представлена на рис. 1.

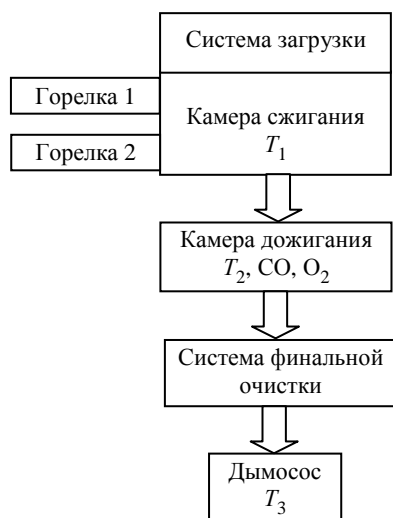


Рис. 1

ИИУС осуществляет мониторинг температур:  $T_1$  – в камере сжигания,  $T_2$  – камере дожигания,  $T_3$  – за дымососом и концентрации оксида углерода CO и кислорода  $O_2$  после камеры дожигания [4], [5]. Для расчета неполного горения используем результаты эксперимента термического уничтожения отходов. Результаты эксперимента представлены на рис. 2, где 1 – зависимость концентрации кислорода, 2 – зависимость концентрации угарного газа от времени.

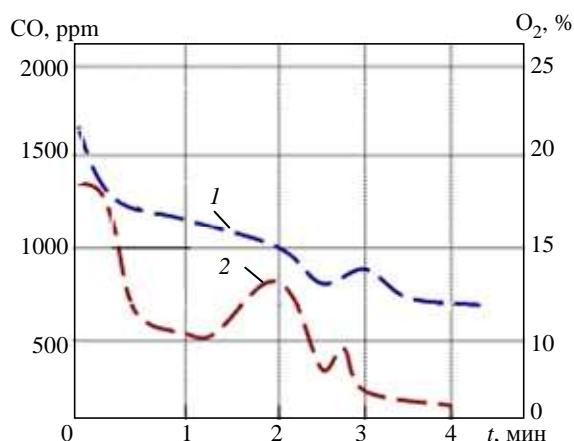


Рис. 2

Для проведения испытаний комплекса аппаратуры сжигания и ИИУС смоделировано протекание ТП в нормальном, предаварийном и аварийном режимах. Локальные измерительные подсистемы, алгоритмы работы которых проверяются с помощью созданной системы моделирования, определенным образом реагируют на изменения в режиме протекания имитируемого ТП. В данном случае реакцией подсистем является управление работой двух горелок (рис. 1) и увеличение подачи воздуха за счет дымососа.

При идентификации нормального режима протекания ТП ИИУС поддерживает горение. Пример программы эксперимента представлен в табл. 2.

Таблица 2

Процесс	t, мин	CO, ppm	O <sub>2</sub> , %	T <sub>1</sub> , °C	T <sub>2</sub> , °C	T <sub>3</sub> , °C
Пиролиз	0.0	1400	17	950	1100	160
	0.5	550	15	925	1050	160
	1.0	500	14	920	1030	160
Стабильное горение	1.5	550	13	910	1020	160
	2.0	800	12	950	1050	160
	2.5	400	11	970	1080	160
	3.0	200	11	980	1090	160
	3.5	100	10	900	1100	160
	4.0	50	10	900	1100	160

При моделировании процесса сжигания последовательно формируются значения измеряемых сигналов, характерные для нормального, предаварийного и аварийного режимов. При этом имитируется процесс пиролиза, а затем нестабильное горение: допустимое увеличение (уменьшение) температур при различных значениях концентраций кислорода и оксида углерода.

Для разработки и оценки эффективности алгоритмов управления построены логико-математические модели всех стадий технологического процесса. Пример такой модели процесса, связанного со сжиганием топлива, приведен на рис. 3.

измерения с заданной точностью, осуществлять управление, обеспечивать нахождение параметров ТП в рабочем режиме, а также в случае отклонений параметров переводить ТП из аномального (предавварийного) режима в нормальный ре-

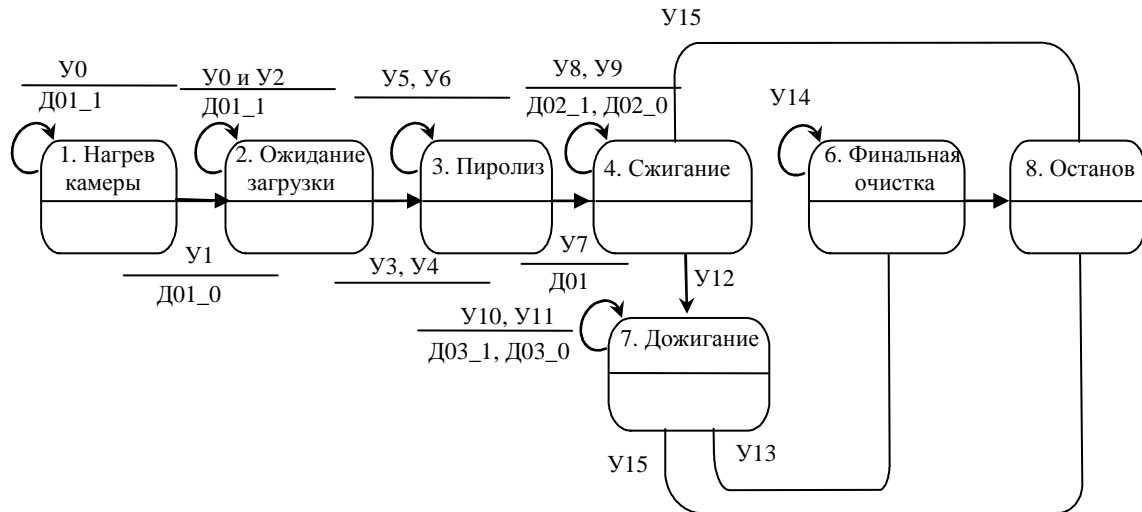


Рис. 3

Здесь в числителе – выполнение условий перехода, в знаменателе – действия при переходе. На рис. 3 обозначены:

- U0 – температура  $T_1$  в камере сжигания  $< 950$  °С;
- U1 – температура  $T_1$  в камере сжигания  $> 950$  °С;
- U2 – камера закрыта, загрузки не было;
- U3, U4 – камера открыта, камера закрыта;
- U5 – произведена загрузка;
- U6 – продолжительность пиролиза  $< t_1$ ;
- U7 – продолжительность пиролиза  $> t_1$ ;
- U8 – продолжительность сжигания  $< t_2$ ;
- U9 – температура  $T_1$  в камере сжигания 900...1000 °С; концентрация CO  $< 100$  ppm & O<sub>2</sub>  $< 12$  %;
- U10 – продолжительность дожигания  $< 2$  с;
- U11 – температура  $T_2$  в камере дожигания 1100 ... 1200 °С; концентрация CO  $< 100$  ppm & O<sub>2</sub>  $< 12$  %;
- U12 – продолжительность сжигания  $> t_2$ ;
- U13 – продолжительность дожигания  $> 2$  с;
- U14 – контроль pH;
- U15 –  $t_3 > 200$  °С;
- D01\_0, D01\_1 – выключение/включение горелки № 1;
- D02\_1, D02\_0 – включение/выключение горелки № 2.

Качество работы ИИУС следует оценивать по соответствию системы требованию минимального воздействия на окружающую среду. Данное свойство системы проявляется в способности проводить

режим за установленное время реакции ( $t_p$ ), которое вычисляется исходя из значений ПДВ, установленных для данного объекта и его местоположения. В случае если регулирование неэффективно и ТП находится в аномальном состоянии более расчетного времени или если ТП из предаварийного режима перешел в аварийный, следует увеличение значения критерия на установленную величину:

$$M = \sum (P_i \cdot k) + \sum (F1_i \cdot k) \times \sum (F2_i \cdot k) \sum (E_i \cdot k), k \in \{0, 1\},$$

где  $P_i$  – штрафы за отклонения режимов, допущенные ИИУС на стадии пиролиза;  $F1_i$  – штрафы за отклонения режимов, допущенные ИИУС на стадии сжигания;  $F2_i$  – штрафы за отклонения режимов, допущенные ИИУС на стадии дожигания;  $E_i$  – штрафы за отклонения режимов, допущенные ИИУС на стадии финальной очистки.

Графы состояний ИИУС на всех стадиях ТП инсинерации (пример графа состояний ИИС на стадии сжигания отходов приведен на рис. 4) позволяют проверить логику работы алгоритмов. Здесь в числителе – выполнение условий перехода, в знаменателе – действия при переходе. На рис. 4 обозначены:

- Uc0 – время пиролиза не превышено;
- Uc1 – истекло время пиролиза;
- Uc2 –  $950 < T_1 < 1000$  °С;  $Uc3 - |T_1'| < |T_{1max}'|$ ;
- D01\_0, D01\_1 – выключение/включение горелки № 1;

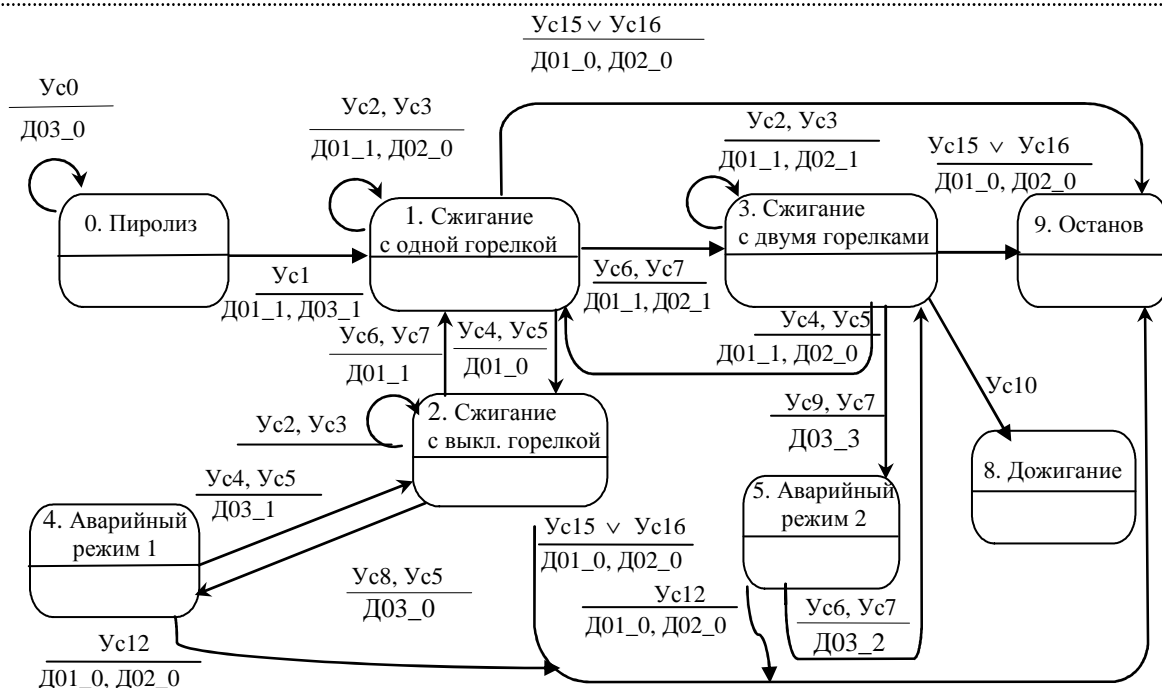


Рис. 4

- Ус4 –  $1000 < T_1 < 1050 \text{ } ^\circ\text{C} \vee \text{Ус5} - |T_1'| > |T_1'_{\text{max}}|$  ;
  - Ус6 –  $900 < T_1 < 950 \text{ } ^\circ\text{C} \vee \text{Ус7} - |T_1'| > |T_1'_{\text{max}}|$  ;
  - Ус8 –  $1050 \text{ } ^\circ\text{C} < T_1 \vee \text{Ус5} - |T_1'| > |T_1'_{\text{max}}|$  ;
  - Ус9 –  $T_1 < 900 \text{ } ^\circ\text{C} \vee \text{Ус7} - |T_1'| > |T_1'_{\text{max}}|$  ;
  - Ус10 – продолжительность сжигания  $> t_2$  ;
  - Ус11 – концентрация  $\text{CO} < 100 \text{ ppm} \ \& \ \text{O}_2 < 12 \%$  ;
  - Д02\_1, Д02\_0 – включение/выключение горелки № 2;
  - Д03\_1, 2, 3 – уровни подачи воздуха;
  - Д03\_0 – отключение подачи воздуха;
  - Ус12 – время нахождения в аварийном режиме  $t_a > t_b$  (время начала вредного воздействия);
  - Ус15 –  $T_3 > 200 \text{ } ^\circ\text{C}$  ;
  - Ус16 – концентрация  $\text{CO} > 800 \text{ ppm}$ .
- Для оценки эффективности работы алгоритмов управления инсинерацией и корректности работы измерительной и управляющей подсистем составляется таблица штрафов для всех случаев

нахождения системы в предаварийном и аварийном состояниях. Для стадии сжигания штрафы приведены в табл. 3. При установлении порогового уровня функции  $M$  равным 0.20 за один цикл сжигания отходов данные значения делают допустимым не более двух выходов процесса в предаварийный режим и позволяют сделать вывод о непригодности к эксплуатации ИИУС и инсинератора при возможности перехода процесса в аварийный режим.

В статье приведен пример оценивания эффективности работы ИИУС, основанный на анализе состояний технологического процесса. Показана работоспособность метода оценивания, основанная на минимизации объема штрафов. Нормативные значения, приведенные в табл. 3, позволяют по объективным данным сделать вывод о соответствии оборудования требованиям по экологической безопасности в части ПДВ.

Таблица 3

№	Штрафная ситуация	Условие в соответствии с графом	Продолжительность	Базовая величина штрафа
1	Нахождение в предаварийном режиме (2) после Д01_0	Ус6	$t_p > t_{1\text{доп}}$	0.08
2	Нахождение в предаварийном режиме (3) после Д01_1, Д02_1	Ус4	$t_p > t_{2\text{доп}}$	0.08
3	Переход из предаварийного режима в аварийный № 1	Ус4, Ус5	$t > 0 \text{ с}$	0.21
4	Переход из предаварийного режима в аварийный № 2	Ус9, Ус7	$t > 0 \text{ с}$	0.21
5	Время нахождения в аварийном режиме $t_a > t_b$	Ус12	$t > 0 \text{ с}$	0.21
6	Температура за дымососом выше $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ или концентрация $\text{CO}$ выше 800 ppm	Ус15 $\vee$ Ус16	$t > 0 \text{ с}$	0.21

Результаты были получены при выполнении научно-исследовательской работы ПЧС-1 «Разработка теоретических основ моделирования дина-

мики развития технических, природных и природно-техногенных чрезвычайных ситуаций», проводимой в СПбГЭТУ (регистр. № 7.1111.2011).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Б. И. Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 222 с.

2. Исследование и моделирование технологического процесса инсинерации / Ю. А. Иванова, А. Е. Горбунова, О. В. Моисеева, И. С. Чернышова // Тр. Всерос. конгресса «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России». СПб., 14–15 нояб. 2011. С. 40–44.

3. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке твердых бытовых отходов и промотходов / ВНИИГАЗ. М., 1998.

4. Предупреждение аварийных ситуаций в технологическом процессе термического уничтожении отходов и оценка воздействия на окружающую среду / В. В. Алексеев, А. Д. Чарнецкий, В. С. Коновалова, Р. Ю. Марченков // Науч.-практ. конф. «Научные и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий». СПб., 12–13 нояб. 2010. С. 24–29.

5. ИИС контроля и управления технологическим процессом термического уничтожения отходов / В. В. Алексеев, А. Д. Чарнецкий, П. Г. Королев, К. О. Комшилова, В. С. Коновалова, Р. Ю. Марченков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 4. С. 65–73.

V. V. Alexeyev, Yu. A. Ivanova, V. V. Gavrilov, P. G. Korolev

## METHOD OF ESTIMATING THE EFFICIENCY MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS OF INCINERATION ECOLOGICAL SECURITY

*Questions of construction of information-measuring and control systems (MCS) control and process control of thermal destruction of waste, technical (algorithmic) solutions aimed at minimizing the impact on the environment. We propose a method for checking the correctness of the algorithms and performance evaluation MCS.*

**Information-measuring and control system, incineration, environmental safety**

УДК 531.383

Н. А. Шалаев, П. И. Бегун, А. М. Боронахин

## Система персональной навигации

*Выполнен обзор существующих систем персональной навигации, раскрыты их недостатки, в частности наличие значительных погрешностей в отсутствие корректирующего сигнала спутниковой навигационной системы (СНС) из-за неоптимального крепления инерциальных датчиков на теле пользователя и их общей сложной траектории перемещения в пространстве. Предложены методы повышения точности путем привлечения альтернативных источников о параметрах движения.*

**Инерциальная навигационная система, акселерометр, гироскоп, микромеханический чувствительный элемент, инерциальный измерительный модуль**

Важную роль в деятельности спасателей, пожарных, бойцов вооруженных сил играет система персональной навигации (СПН). Достоверная информация о местоположении единицы подразделения, вырабатываемая СПН, требуется в ситуациях, когда необходимо скоординировать сов-

местные действия отряда для проведения быстрых и слаженных операций, будь то разбор завалов рухнувшего дома, поиск уцелевших в задымленных помещениях или ликвидация группы боевиков.

**Подходы к решению задач персональной навигации.** Первый подход использует метод