

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

Том 32
Донецк, 2018

Основан в 1997г.

**ТРУДЫ
ИНСТИТУТА
ПРИКЛАДНОЙ
МАТЕМАТИКИ
И МЕХАНИКИ**

СОДЕРЖАНИЕ

<i>О.В. Александрова</i> Симметрии нелинейного стохастического дифференциального уравнения Ито	3
<i>А.Б. Бирюков, А.А. Иванова</i> Основы построения и использования систем диагностики на базе анализа моментальных тепловых балансов	13
<i>А.М. Ковалев, В.Н. Неспирный</i> Особенности построения дополнительных функций для неавтономных систем обыкновенных дифференциальных уравнений	23
<i>Б.И. Коносевиц, Ю.Б. Коносевиц, Г.В. Мозалевская</i> Существование конструкций гироскопа в кардановом подвесе, реализующих случай постоянства приведенной потенциальной энергии	29
<i>Г.А. Котов</i> Об условиях существования прецессий твердого тела, имеющего неподвижную точку, в потенциальном поле сил	41
<i>А.Н. Курганский, И. Потапов</i> Графы де Брёйна и степени числа $3/2$	51
<i>Д.А. Зарайский</i> Об определении свёртки распределений без условия на носители	72
<i>А.С. Миненко</i> О вариационном методе исследования конвективной задачи Стефана	77
<i>А.Л. Павлов</i> Описание нулевых решений общей краевой задачи в полупространстве для дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами	89
<i>Д.А. Сапронов</i> О разрешимости задачи Коши для многомерных вырождающихся параболических уравнений второго порядка типа нестационарной диффузии-конвекции с неограниченной энергией	99
<i>О.Н. Швидкий</i> Явная оценка в пространствах Гельдера для решения уравнения с дробным оператором Лапласа	118

УДК 681.518.5

©2018. А. Б. Бирюков, А. А. Иванова

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ НА БАЗЕ АНАЛИЗА МОМЕНТАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ БАЛАНСОВ

Проиллюстрированы сущность и возможности разработанных для разных отраслей промышленности систем диагностики, анализирующих моментальные тепловые балансы. Сформулированы общие подходы к построению таких систем диагностики. Показан способ анализа погрешностей определения искомых величин. Выделены моменты, позволяющие повысить эффективность разработки и использования новых систем диагностики.

Ключевые слова: система диагностики, диагностические параметры, технологический процесс, косвенное определение величин, моментальный тепловой баланс.

1. Введение. За последние два десятилетия важную роль в технических науках приобрело такое направление как техническая диагностика, представляющая собой область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов.

Диагностика ведется по, так называемым, диагностическим параметрам, которые по своей сути являются репрезентативными и позволяют судить о состоянии объекта. Диагностические параметры могут быть прямыми и косвенными. Прямые параметры непосредственно характеризуют состояние объекта, а для косвенных имеется функциональная связь с прямыми параметрами. Различают следующие основные методы диагностики: органолептические, вибрационные, акустические, тепловые, трибодиагностика, анализ продуктов износа в продуктах сгорания, акустическая эмиссия, радиография; вихректоковый, ультразвуковой и капиллярный контроль; параметрическая диагностика, электродиагностический контроль.

Диагностика состояния оборудования становится общепринятым и необходимым элементом современных систем автоматического управления. Методы теплового контроля и диагностики играют важнейшую роль в самых разных отраслях промышленности [1]. Нормативная документация по реализации тепловой диагностики предполагает, что она базируется на измерении температур и прежде всего температур поверхности оборудования или тел и сред, подвергающихся обработке. Это позволяет в некоторой мере оценить соответствие температурного поля заданным требованиям, выявить образование некоторых дефектов [1–4].

Однако в нормативной документации по тепловой диагностике [1] не уделяется достаточное внимание как калориметрическим методам, так и интерпретации результатов, получаемых с их помощью, хотя известно, что они дают возможность практического исследования тепловых балансов оборудования. В работах [5–9] представлены системы диагностики тепловых процессов, основанные на анализе моментальных тепловых балансов, охватывающие разное оборудование (эле-

менты оборудования) и отрасли промышленности: кристаллизатор МНЛЗ, печи периодического и непрерывного действия для тепловой обработки металла, реакторы синтеза метанола, реакторы синтеза углеродных наноматериалов.

Целью данной работы является обобщение опыта в области построения и использования систем диагностики, анализирующих моментальные тепловые балансы, и выделение общих моментов, которые позволят повысить эффективность разработки новых систем.

2. Общие подходы к построению тепловых балансов. По своей сути тепловые балансы (интегральные и моментальные) отражают выполнение закона сохранения энергии в виде следующего условия: количество энергии, введенной в процесс (в виде тепловой, электрической, химической и других видов энергии), равно количеству энергии, выведенной из процесса (или используемой в нем).

Интегральный тепловой баланс можно строить, используя полные количества энергии, введенные и выведенные в течение процесса (Дж). Возможно использование количеств энергии, отнесенных к единице массы основного продукта (Дж/кг).

Для моментального теплового баланса статьи расхода и прихода энергии выражаются в единицах мощности (Вт).

Типовые статьи теплового баланса:

– *физическая теплота входящих или выходящих веществ*

$$Q_g = m \cdot c_m(t) \cdot t, \quad Q_g = V_V \cdot c_V(t) \cdot t,$$

$$Q = G \cdot c_m(t) \cdot t, \quad Q = V \cdot c_V(t) \cdot t,$$

где t – температура, К;

Q_g, Q – поступающее или выводимое с физической теплотой веществ количество энергии, в общем выражении и в единицах мощности соответственно, Дж, Вт;

c_m, c_V – массовая и объемная удельные теплоемкости веществ соответственно, Дж/(кг·К), Дж/(м³·К);

m, G – масса и массовый расход соответственно, кг, кг/с;

V_V, V – объем и объемный расход соответственно, м³, м³/с.

При реализации пересчета объемных расходов на массовые необходимо иметь в виду, что если объем и объемный расход взяты при нормальных физических условиях (н.ф.у.), то для перемножения с ними должна быть взята плотность среды при н.ф.у. Если же эти величины взяты при действительных физических условиях (д.ф.у.), то плотность также берется при д.ф.у.

В общем случае теплоемкости веществ являются функциями температуры. Для нахождения их значений можно воспользоваться табличными справочными данными [10], либо функциональными зависимостями из справочной литературы. Причем более доступными являются табличные данные. Для автоматизации расчетов соответствующие функциональные зависимости могут быть получены исследователем самостоятельно.

– *химическая энергия веществ.* В топливных технологиях для характеристики запаса химической энергии веществ, как правило, используют теплоту сгорания

для газообразных веществ:

$$Q_n^p = 0,01 \cdot (Q_{CO} \cdot \%CO + Q_{H_2} \cdot \%H_2 + Q_{CH_4} \cdot \%CH_4 + Q_{H_2S} \cdot \%H_2S + \sum_{i=1}^n (Q_{C_mH_n} \cdot \%C_mH_n))$$

где Q_{CO} , Q_{H_2} , Q_{CH_4} , Q_{H_2S} , $Q_{C_mH_n}$ – теплота сгорания соответствующих газовых компонентов, Дж/м³;

$\%CO$, $\%H_2$, $\%CH_4$, $\%H_2S$, $\%C_mH_n$ – процентное содержание газовых компонентов в газовой смеси, %.

Для твердых и жидких веществ:

$$Q_H^p = 340 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109 \cdot (Q^p - S^p) - 25 \cdot W^p,$$

где C^p , H^p , O^p , S^p , W^p – содержание углерода, водорода, кислорода, серы и влаги в элементарном рабочем составе топлива, %.

В ряде случаев для описания энергетического состояния возникает необходимость использовать не теплоту сгорания, а теплоту образования входных и выходных веществ. Иногда для упрощения формы представления теплового баланса вместо химической энергии входящих и выходящих веществ в приходной (для экзотермических реакций) или в расходной (для эндотермических реакций) статьях баланса фигурирует тепловой эффект реакции.

– *теплопотери реактора*. Для реакторов, имеющих в реакционном пространстве температуру выше температуры окружающей среды (в большинстве случаев это значительно более высокая температура) часть тепла переходит через ограждение реактора в окружающую среду. Величина потока теплопотерь определяется температурным напором (разница температур внутри и снаружи реактора), геометрическими характеристиками реактора, геометрическими и теплофизическими характеристиками ограждения реактора [11]. Обычно величина теплопотерь для современных реакторов не превышает нескольких процентов от расходной части теплового баланса (зачастую она не превышает одного процента).

– *ввод электрической энергии в процесс*, который может быть осуществлен при помощи нагревателей резистивного типа либо индукционным способом, либо при помощи дуг. Количество введенной энергии фиксируется при помощи электроизмерительных приборов.

Количественные значения ряда статей теплового баланса могут быть либо непосредственно определены при помощи измерительных приборов, либо рассчитаны на основании их показаний. Среди статей теплового баланса выделяется та, которая с одной стороны наиболее полно характеризует процесс, а, с другой стороны, не может быть непосредственно определена. Эта искомая статья определяется в результате арифметических действий над идентифицированными статьями теплового баланса.

Например, в системах диагностики тепловой работы печей периодического и непрерывного действия из теплового баланса определяется плотность теплового

потока усваиваемого поверхностью металла [6, 7]. В системе диагностики реакторов синтеза углеродных наноматериалов [9] из теплового баланса определяется количество теплоты, идущей на покрытие эндотермических реакторов синтеза углеродных наноматериалов (УНМ).

3. Анализ погрешностей системы диагностики. По сути, система диагностики базируется на косвенном определении искомых величин (статей теплового баланса), характеризующих тепловые (энергетические) процессы в исследуемых объектах. Определение искомых величин производится за счет расчетной обработки результатов измерения величин-аргументов (входных величин). Схема измерений входных величин аргументов для нескольких систем диагностики машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) представлена на рис. 1.

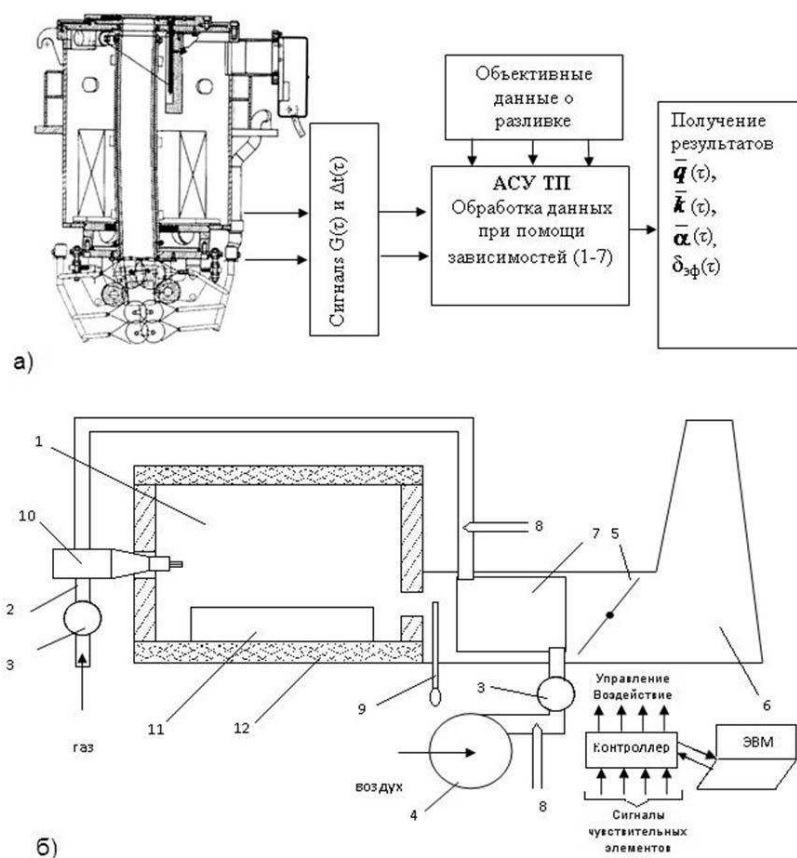


Рис. 1. Схема аппаратной части систем диагностики тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ (а) и нагревательной печи периодического действия (б). 1 – камера печи; 2 – подвод газа к горелке; 3 – расходомеры для газа и воздуха; 4 – дутьевой вентилятор для подачи воздуха на горелки; 5 – дымовой клапан; 6 – дымовая труба; 7 – рекуператор; 8 – термопара для замера температуры воздуха до и после подогрева; 9 – отсасывающая термопара для замера температуры продуктов сгорания на выходе из рабочей камеры; 10 – газовая горелка; 11 – обрабатываемый материал; 12 – футеровка.

В рамках теории инженерного эксперимента имеется стандартная методика для оценки погрешности косвенных измерений [12, 13]. Её идея заключается в том, что итоговая погрешность зависит не только от погрешностей определения каждой из входных величин, но и от функциональной связи между ними. Составляется итоговое выражение, связывающее между собой искомую величину и входные величины. Далее от него берутся частные производные и с их помощью составляется выражение для определения относительной погрешности определения искомой величины.

Использование такого подхода в ряде случаев оказывается достаточно затруднительным. Во-первых, изначально связь между входными величинами и искомой может быть представлена несколькими выражениями, в которых присутствуют промежуточные величины; составление единой функциональной связи приводит к громоздкому выражению, которое неудобно дифференцировать.

В работе [12] предложен альтернативный подход, предполагающий проведение предварительного исследования параметрической чувствительности системы. Его суть заключается в следующем:

- задается базовый уровень входных величин;
- далее поочередно для каждой входной величины задается ряд значений с равномерным шагом внутри возможного диапазона изменения величины;
- для каждого вектора исходных данных определяются результаты диагностики;
- для каждого вектора исходных данных на рассматриваемую входную величину искусственно накладывается предельная погрешность (например, только положительная), соответствующая классу точности прибора, используемого для измерения, и получается искомая величина;
- определяется относительная погрешность искомой величины, полученной при наложении погрешности на входную величину и знак этой погрешности; при этом также на основании сравнения погрешностей для разных уровней входной величины делается вывод о влиянии или не влиянии уровня величины на значение погрешности;
- после анализа по приведенной схеме влияния погрешности каждой из входных величин на погрешность искомой величины эмулируется ситуация, когда одновременно задаются погрешности всех входных величин такого знака, чтобы они однонаправленно действовали на погрешность искомой величины. Полученная погрешность искомой величины и будет предельной погрешностью системы диагностики.

4. Задание граничных условий теплообмена. Результаты работы системы диагностики могут использоваться для задания граничных условий теплообмена при параллельном моделировании процесса тепловой обработки материала в режиме реального времени в рамках прогнозной модели.

Например, установленные значения средних плотностей теплового потока, отводимых от корки, формирующейся в кристаллизаторе непрерывнолитой заготовки, к воде [5], или подводимых к поверхности металла при его тепловой обработке

в печи [6, 7], позволяют проводить в реальном времени задание граничных условий II-го рода на поверхности металла.

5. Проверка адекватности системы диагностики. Возможно несколько вариантов проведения этой процедуры. Если проводилось параллельное моделирование температурного поля металла, подвергающегося тепловой обработке при задании граничных условий на основе данных системы диагностики, то проверка реальных параметров температурного поля при выдаче материала из печи и их сопоставление с прогнозными значениями будет давать представление о мере адекватности как системы диагностики, так и прогнозной математической модели.

Например, для металла, выдаваемого из печи, сопоставление можно вести по температуре поверхности металла либо по усилию прокатки, которое для заданного размера заготовки и вида металла дает представление о его среднемассовой температуре.

Если величина, определяемая при помощи системы диагностики, связана с количеством произведенного продукта, то сопоставление реального количества произведенного продукта с прогнозным значением является мерой адекватности системы диагностики.

6. Углубленное представление о закономерностях протекающих процессов. Расчетная обработка результатов работы системы диагностики позволяет получать дополнительные сведения о количественных закономерностях протекания процессов.

Так, например, в случае анализа моментальных тепловых балансов работающей печи появляется возможность углубленного изучения процесса теплопередачи в печной камере. На основании установленных значений плотности теплового потока при наличии определенных с помощью параллельного математического моделирования значений температур поверхности металла имеется возможность перейти к итоговому коэффициенту теплоотдачи. Поскольку итоговый коэффициент теплоотдачи представляет собой сумму лучистой и конвективной составляющих, то зная одну из них, находим величину неизвестной составляющей [6].

После получения сведения о значениях коэффициента конвективной теплоотдачи для разных параметров технологии появляется возможность определения значения коэффициентов критериального уравнения, описывающего конвективный теплообмен в конкретном агрегате.

7. Получение важных параметров процесса. Также расчетная обработка результатов диагностики позволяет получить закономерности изменения во времени важных параметров процесса.

Например, при производстве метанола суждение о состоянии катализатора предложено выносить в зависимости от текущих значений доли монооксида углерода, расходуемой по реакциям синтеза, которая в свою очередь определяется в рамках системы тепловой диагностики процесса [8]:

$$\xi = \frac{G_{vap} \cdot (i_{vp} - i_w) \cdot 100 \cdot 22,4}{CO \cdot V \cdot Q_M},$$

где ξ – доля расходования монооксида углерода в реакциях синтеза;

CO – процентное содержание монооксида углерода в синтез-газе, %;

V – объемный расход синтез-газа, м³/ч;

Q_M – тепловой эффект образования метанола, Дж/кмоль;

G_{vap} – расход пара из сепаратора, кг/с;

i_{vp}, i_w – энтальпия насыщенного пара на выходе из реактора и питательной воды соответственно, Дж/кг.

Применительно к печам расчетная обработка результатов работы системы диагностики позволяет получить изменение во времени таких важнейших характеристик процесса как коэффициент использования топлива (КИТ) и коэффициент полезного действия (КПД) [6]. На рис. 2 представлено изменение во времени названных величин, полученное для конкретной печи с выкатным подом при нагреве кузнечных слитков диаметров 1 м под последующую осадку на прессе.

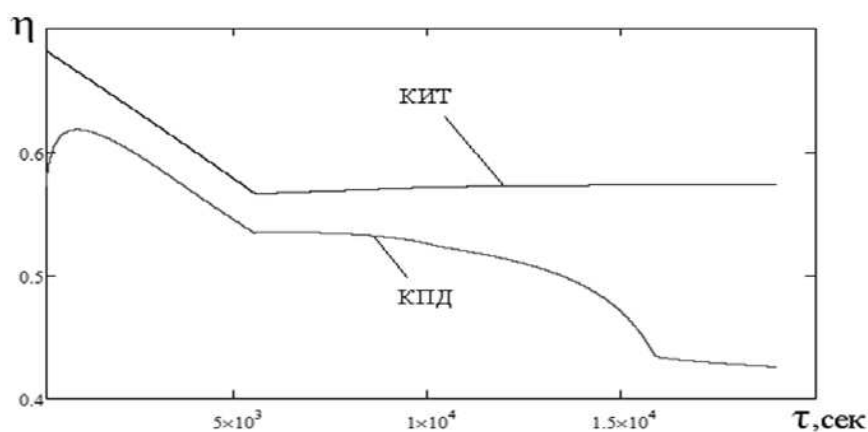


Рис. 2. Значение КИТ и КПД, восстановленное при помощи системы диагностики

Применительно к кристаллизаторам МНЛЗ в результате обработки результатов системы диагностики получаем возможность от средней плотности теплового потока в кристаллизаторе перейти к средним значениям коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, и, наконец, к эффективной толщине газового зазора в кристаллизаторе (δ_{ef}) [5]. Контроль величины эффективной толщины газового зазора в режиме реального времени при помощи системы АСУ ТП предоставляет следующие возможности:

- оперативный контроль износа внутренней поверхности гильз кристаллизаторов на основании анализа изменения во времени величины δ_{ef} ;
- практическая проверка соответствия конусности кристаллизаторов усадке заготовок на основе сопоставления средних уровней δ_{ef} для конкретных сочетаний

профилей кристаллизатора и марок стали с оптимальным значением эффективной толщины газового зазора, установленным из практического опыта;

– выбор наилучших кристаллизаторов для условий конкретного производства на основе анализа соответствующих массивов информации о среднем значении эффективной толщины газового зазора;

– установление взаимосвязи износа гильз кристаллизаторов с образованием дефекта ромбичности (достигается путем совместной обработки информации о температурно-скоростных режимах разливки, марках стали, конусности кристаллизаторов, соответствовавших им величинах эффективных толщин газовых зазоров и данных о ромбичности заготовок при помощи аппарата математической статистики).

8. Практическое использование систем диагностики. Для практического использования систем диагностики необходима разработка соответствующих программных комплексов, которые функционируют в режиме реального времени, получая информацию о значениях входных величин АСУ ТП. На начальном этапе такая система может работать просто в режиме советчика и архивирования важной информации о параметрах изучаемого процесса. В перспективе возможна интеграция систем диагностики в высокоуровневые САУ для участия в управлении объектом. На рис. 3 представлен эмулятор системы диагностики теплотехнических параметров кристаллизатора, разработанный в среде LabVIEW.

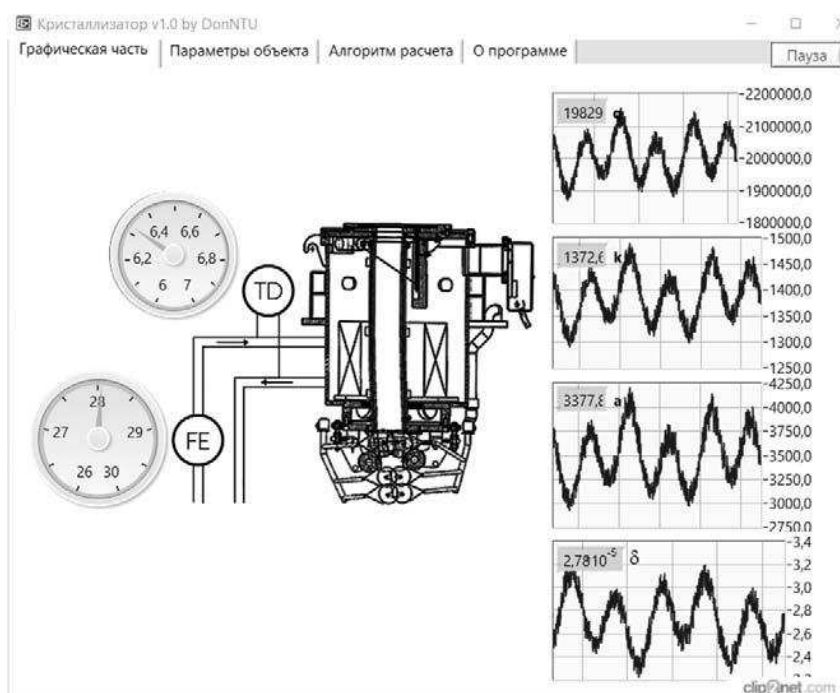


Рис. 3. Эмулятор системы диагностики теплотехнических параметров кристаллизатора сортовой МНЛЗ

9. Выводы. Сущность систем диагностики, основанных на анализе моментальных тепловых балансов, заключается в том, что среди статей теплового баланса выделяется такая, которая с одной стороны наиболее полно характеризует процесс, а, с другой стороны, не может быть непосредственно определена. Эта искомая статья определяется в результате арифметических действий над идентифицированными статьями теплового баланса.

Анализ погрешностей определения искомых величин в рамках системы диагностики можно оценить при помощи метода, базирующегося на оценке параметрической чувствительности системы по всем входным величинам и последующем эмулировании ситуации, когда одновременно возникают предельно возможные погрешности всех входных величин со знаками, обеспечивающими одинаковый характер воздействия на искомую величину.

Анализ моментальных тепловых балансов позволяет в результате расчетной обработки результатов измерения входных величин определять важные характеристики процесса, задавать граничные условия, обеспечивающие возможность прогнозного математического моделирования процесса в реальном времени.

1. ГОСТ Р 56511-2015 Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования.
2. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2013. – 544 с.
3. Будадин О.Н., Вавилов В.П., Абрамова Е.В. Тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2011. – 171 с.
4. Вавилов В.П., Климов А.Г. Тепловизоры и их применение. – М.: Интел универсал, 2002. – 87 с.
5. Бирюков А.Б., Иванова А.А. Диагностика теплотехнических параметров работы кристаллизаторов МНЛЗ // Черная металлургия. – 2015. – № 2 (1382). – С. 49–54.
6. Бирюков А.Б., Новикова Е.В., Олешкевич Т.Г. Диагностика нагревательных печей периодического действия на основании построения и анализа моментальных тепловых балансов // Промышленная теплотехника. – 2014. – **36**, № 2. – С. 29–35.
7. Бирюков А.Б., Иванова А.А. Диагностика температурного состояния металла при его тепловой обработке в печах непрерывного действия // Металлург. – 2018. – № 4. – С. 33–37.
8. Бирюков А.Б., Алехина Н.В., Дробот С.Г. Система диагностики тепловой работы современных реакторов синтеза метанола // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Проблеми екології. – 2011. – № 1–2. – С. 133–137.
9. Бирюков А.Б., Кравцов В.В., Новикова Е.В., Алехина Н.В. Системы диагностики тепловой работы лабораторных, полупромышленных и промышленных реакторов синтеза углеродных наноматериалов // Промышленная теплотехника. – 2012. – **29**, № 3. – С. 75–80.
10. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчета и проектирования, 2-е издание дополненное и переработанное. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
11. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 417 с.
12. Якимов И.М., Мошкин В.В. Компьютерные технологии моделирования и обработки экспериментальных данных: Учебное пособие. – Казань: Изд-во Казан. Гос. техн. ун-та, 2012. – 124 с.
13. Рабинович С.Г. Погрешность измерений – Л: Энергия, 1978. – 236 с.
14. Васильева А.В., Бирюков А.Б. Исследование погрешностей системы диагностики при определении величин, характеризующих тепловую работу кристаллизаторов МНЛЗ // Вестник ДонНТУ. – 2016. – № 5. – С. 31–36.

A. B. Biryukov, A. A. Ivanova

Fundamentals of construction and use of diagnostic based on analysis instant heat balance.

The essence and capabilities of diagnostic systems developed for various industries, analyzing instant heat balances, are illustrated. The general approaches for such diagnostic systems construction are formulated. The method for analyzing sought-for values determining errors is shown. Aspects that allow to improve development and use of new diagnostic systems are formulated.

Keywords: *diagnostic system, diagnostic parameters, technological process, indirect determining of quantities, instantaneous heat balance.*

ГУ «Ин-т прикл. математики и механики», Донецк
biryukov.ttf@gmail.com
ivanova.iamm@mail.ru

Получено 25.10.18