

А.Б. Бирюков /д.т.н./, П.А. Гнитиев
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ ПРИ ЕГО ВОЗДУШНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Предложенная система предназначена для контроля в режиме реального времени тепловых потоков, отводимых из печи при воздушном охлаждении металла. Система основана на измерении температур и расхода воздуха на входе и выходе из печи. Использование данной системы позволяет повысить точность достижения заданного температурного состояния металла в результате выполнения операции воздушного охлаждения и избежать нерационального затягивания операции во времени. Положительными особенностями системы являются низкая стоимость используемых компонентов, высокая оперативность получаемых результатов и достаточная их точность, возможность задания граничных условий для параллельно работающей математической модели прогнозного управления.

Ключевые слова: тепловое состояние, охлаждение металла, контроль темпа охлаждения.

Постановка проблемы

На большинстве машиностроительных предприятий при производстве массивных металлических изделий на участке воздушного охлаждения (в цикле термической обработки) диагностика теплового состояния металла сводится лишь к измерению температуры газов в печи. Такой подход не дает возможности однозначно использовать информацию для управления технологическим процессом и является грубым при оценке значений температур металла. Актуальным вопросом является создание систем, способных поддерживать заданный темп охлаждения металла с целью повышения качества выпускаемой продукции. Создание автоматизированных систем тепловой диагностики металла в операциях воздушного охлаждения является современным подходом в решении задачи точного управления процессом.

Анализ последних исследований и публикаций

В металлургической и машиностроительной практике использование термической обработки позволяет управлять конечными свойствами и качеством производимой продукции в широком диапазоне [1]. Как известно, процесс термообработки включает в себя три основные операции:

- нагрев металла до требуемой температуры;
- выдержка металла при этой температуре для ее усреднения по толщине изделия;
- охлаждение металла.

В настоящее время благодаря применению современных газогорелочных устройств поддержание заданного и равномерного темпа на-

грева является достижимой и достаточно простой задачей. Процесс выдержки зачастую осуществляется за счет уменьшения подачи газа в печь, либо прекращения его подачи, в зависимости от используемого типа футеровки. Что касается процесса охлаждения, то он является наименее контролируемым и менее изученным по ряду причин [2], хотя и является участком, в наибольшей мере влияющим на конечные свойства металла.

Так, например, в работе [3] предложен способ диагностики процесса нагрева металлов в печах, но для участка воздушного охлаждения он отсутствует.

Существует несколько различных способов охлаждения, отличающихся прежде всего скоростью проведения операции:

- медленное – в печи без подачи охлаждающих сред;
- нормальное – в потоке спокойного воздуха (нормализация);
- быстрое – в движущемся воздухе;
- резкое – в жидкостях (закалка).

Наименее исследованным является участок воздушного охлаждения металла в печи.

В работе [3] рассмотрены современные способы диагностики процесса тепловой обработки металла в печах с использованием достаточно дорогих преобразовательно-записывающих устройств для фиксации информации во время всего процесса термообработки. По опыту работы [4] можно сделать вывод о слабой изученности операции охлаждения в потоке движущегося воздуха. В настоящей работе авторами предлагается выбор коэффициента теплоотдачи из неко-

того условного диапазона, что является не точным и вносит ряд погрешностей в расчет процесса охлаждения.

Исходя из практики проведения операции термообработки металла, можно сделать вывод о том, что оценка его теплового состояния на промышленных предприятиях на сегодняшний день производится с большой погрешностью. О температуре металла судят, пользуясь методом термограмм. При этом на поверхности и по толщине исследуемой эталонной садки размещаются термопары [5]. Недостатком такого способа является зависимость результатов каждого измерения от конкретного типа садки печи. В дальнейшем принимается, что измеренные параметры справедливы для подобных и близких по геометрическим и массовым параметрам садок, что является достаточно условным способом контроля теплового состояния металла. Важным параметром, влияющим на качество конечных изделий, является скорость охлаждения и точность поддержания заданного темпа охлаждения, а, следовательно, необходимо контролировать тепловой поток, отводимый от тел в каждый момент времени.

Проведенный аналитический обзор показал необходимость создания доступных, быстрых и точных систем диагностики теплового состояния металла при термической обработке как средства повышения качества производимой продукции.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является создание системы автоматического контроля и управления процессом воздушного охлаждения металла в камерных печах.

Основной материал исследования

Используя значение моментальных количеств теплоты, удаляемой из печи, а также принесенной в печь с охлаждающим воздухом, можно составить дифференциальное уравнение первого порядка, которое представляет собой моментальный тепловой баланс печной камеры. При составлении данного уравнения принято, что температура газовой среды равномерна по объему печной камеры и равна значению температуры воздуха на выходе из печи $t_г$:

$$\frac{dt_г}{d\tau} = \frac{qF_M + V_г C^{t_{вн}} t_{вн} + Q_{вн\, ном} - V_г C^{t_г} t_г}{V_к C^{t_г}}$$

где q – плотность теплового потока от охлаждаемых тел к охлаждающему воздуху, Вт/м²; F_M – площадь охлаждаемых тел, м²; $V_г$ – секундный расход воздуха для охлаждения изделий, м/с; $V_к$ – объем воздуха в камере печи, м³; C – удельная теплоемкость воздуха при различных температурах, Дж/(м³·К); $t_{вн}$ – начальная температура охлаждающего воздуха, °С; $Q_{вн\, ном}$ – текущее значение мощности теплопотерь, Вт; $t_г$ – температура воздуха, покидающего печь, °С.

Чтобы решить предлагаемое уравнение, необходимо в каждый момент времени располагать численным значением текущих теплопотерь $Q_{вн\, ном}$, которое, в свою очередь, может быть как больше, так и меньше нуля. Для снижения значений $Q_{вн\, ном}$ необходимо использовать низкоинерционные теплоизоляционные материалы, такие как керамоволокнистые блоки, характеризующиеся наиболее низкими значениями коэффициента теплопроводности и теплоемкости

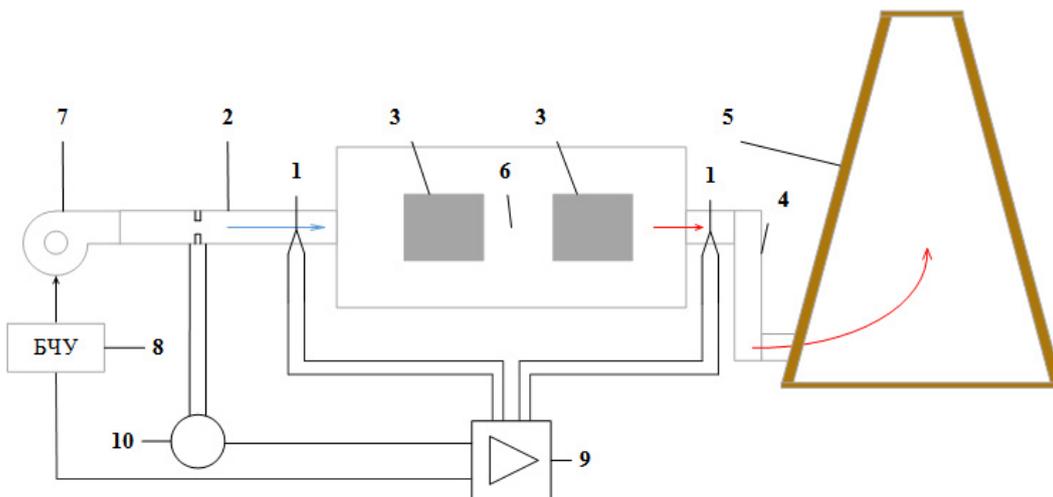


Рис. 1. Устройство системы диагностики теплового состояния металла:

- 1 – термопары для измерения температур воздуха; 2 – трубопровод охлаждающего воздуха;
- 3 – охлаждаемые изделия; 4 – трубопровод нагретого воздуха; 5 – дымовая труба; 6 – камера печи;
- 7 – вентилятор; 8 – блок частотного управления вентилятором; 9 – ПИД регулятор;
- 10 – датчик давления с цифровой обработкой сигнала



Рис. 2. Стандартная модификация TRM151 для технологических процессов

среди доступных огнеупорных и теплоизоляционных материалов [6].

Неизвестной величиной в уравнении является плотность отводимого теплового потока, обеспечивающая поддержание заданной скорости охлаждения металла.

В качестве наглядной демонстрации реализации предлагаемой системы диагностики теплового состояния металла на рис. 1 приведено схематичное изображение цепи управления.

Система работает следующим образом: в регулятор 9 закладывают необходимую скорость охлаждения, которая, в свою очередь, определяет плотность отводимого теплового потока; регулятор в реальном времени отслеживает разность температур воздуха, поступающего в печь и выходящего из нее, при помощи термопар 1. Кроме того, регистрируются показания расхода воздуха от вентилятора при помощи преобразователя 10, и, по вышеприведенной зависимости, регулятор корректирует подачу воздуха для поддержания требуемого теплового потока путем воздействия на блок частотного управления вентилятора 8.

Для измерения температур воздуха рекомендуется применять хромель-алюмелевые термопары ТХА тип К, способные измерять температуры вплоть до 1370 °С.

В качестве регулятора рекомендуется использовать универсальный двухканальный программный ПИД-регулятор ОВЕН TRM151, в модификации 03 [7]: «Одноканальное пошаговое регулирование задвижкой с датчиком положения или без него» (рис. 2), что позволит анализировать температуру обеих термопар 1 с использованием обратной связи от датчика давления воздуха 10 в трубопроводах 2 и 4 с целью точного контроля расхода воздуха.

Для измерения расхода в подающем трубопроводе установлено сужающее устройство, до и после которого снимаются показания давления датчиком типа «Сафир М» с цифровой микропроцессорной обработкой сигнала модели 5120 с диапазоном измерения избыточного давления 2,5-40 кПа [8].

Следует отметить, что при помощи данной

системы можно получить общее количество теплоты, удаляемой из печи, которое включает в себя теплоту, отданную металлом и теплоту, отданную футеровкой. На современных печах из плотной футеровки (шамотные огнеупоры) выполняется лишь подина, а стены и свод покрыты керамоволокнистыми блоками [9]. Для разделения количества отводимой теплоты по составляющим, параллельно с работой предлагаемой системы должна работать математическая модель прогнозного управления, основанная на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности как для металла, так и для футеровки. Задание граничных условий теплообмена и, соответственно, решение внешней задачи теплообмена производится путем задания значений коэффициентов теплоотдачи на основании экспериментально установленных критериальных зависимостей [10].

Для цилиндрических заготовок, обрабатываемых в печи, дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности, решаемое при реализации математической модели, записывается следующим образом:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right),$$

где $\partial t / \partial \tau$ – скорость изменения температуры, К/с; λ, ρ, c – теплофизические характеристики металла: коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), плотность, кг/м³, удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); r – координата, отсчитываемая вдоль радиус-вектора, м; φ – полярный угол, рад; z – продольная координата, отсчитываемая вдоль высоты, проведенной через центр основания цилиндра, м.

Переход от трехмерной постановки задачи к задаче меньшей размерности приводит к возникновению некоторой погрешности. Для призматических и цилиндрических тел она возникает за счет исключения из рассмотрения теплообмена на торцевых поверхностях. Зачастую эти погрешности не являются значительными, т.к. площадь торцевых поверхностей, как правило, существенно меньше площади боковой поверхности тел, а средняя плотность теплового потока для них обычно существенно меньше, чем для боковой поверхности.

Для двумерной и одномерной постановок задачи исследуемой геометрической областью являются характерное поперечное сечение или выбранный отрезок соответственно.

Для изделий с круглым поперечным сечением влиянием торцевых поверхностей и изменением температуры, в зависимости от полярного

угла, можно пренебречь. Поэтому дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности записывается в одномерной постановке:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right).$$

Для соответствия результатов решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности реальным условиям необходимо задание в математической модели условий однозначности:

– геометрические условия, учитывающие форму и размеры области пространства, для которой реализуется решение внутренней задачи;

– начальные условия, описывающие распределение температур в «нулевой» момент времени;

– граничные условия теплообмена, сформированные на основании особенностей внешней задачи теплообмена.

Геометрической областью каждого из рассматриваемых тел, для которой производится решение внутренней задачи, является цилиндр.

Для изучения процессов тепловой обработки материалов возможно использование двух вариантов начальных условий:

– задание усредненного температурного поля перед началом тепловой обработки: $0 \leq r \leq r_3$, $\tau=0: t=t_n$; где r_3 – радиус заготовки, м; t_n – начальная температура металла, °С.

– задание температурного поля, полученного в результате предыдущей тепловой операции над материалом, которое, в общем случае, является неравномерным: $0 \leq r \leq r_3$, $\tau=0: t=t(r)$.

Граничные условия определяют теплообмен на поверхности области. Их задание основывается на учете качественных и количественных характеристик теплообменных процессов в изучаемой технологии.

Сущность теплотехнических процессов, протекающих при воздушном охлаждении металла в печи, заключается в одновременном протекании следующих видов теплообмена:

– конвективная передача тепла от поверхности изделий к охлаждающему воздуху;

– лучистый теплообмен между поверхностями изделий и футеровки;

– конвективная передача тепла от внутренней поверхности футеровки к охлаждающему воздуху.

Предлагается использование граничных условий третьего рода на поверхности расчетных сечений. В общем случае, в каждый следующий момент времени необходимо проводить переосмотр граничных условий.

Для круглого поперечного сечения и решения задачи в одномерной постановке задаем следующие граничные условия для каждого из рассматриваемых цилиндров:

$$\begin{cases} r = r_3 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha_k^M (t_n - t_g^0) + \\ + C_{к\lambda\mu} \left[\left(\frac{t_n + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{n\phi} + 273}{100} \right)^4 \right], \\ r = 0 : \frac{\partial t}{\partial r} = 0, \end{cases}$$

где α_k^M – коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности металла к охлаждающему воздуху, Вт/(м²·К); t_n , $t_{n\phi}$ и t_g^0 – температуры поверхности металла, внутренней поверхности волокнистой футеровки и воздуха, натекающего струями на металл °С; $C_{к\lambda\mu}$ – приведенный коэффициент излучения в системе футеровка-металл, Вт/(м²·К⁴).

Поскольку газообразная среда, заполняющая печь, является лучепрозрачной, то для определения $C_{к\lambda\mu}$ используется следующая зависимость:

$$C_{к\lambda\mu} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_M C_0} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{к\lambda} C_0} - \frac{1}{C_0} \right) \frac{F_M}{F_{к\lambda}}},$$

где ε_M и $\varepsilon_{к\lambda}$ – степень черноты металла и кладки соответственно; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, 5,67 Вт/(м²·К⁴); F_M и $F_{к\lambda}$ – площадь поверхности металла и кладки соответственно, м².

Для описания теплообмена между футеровкой и воздухом, футеровкой и металлом необходимо создание подмодели, описывающей тепловое состояние футеровки в рассматриваемой технологии.

Учитывая геометрические особенности футеровки каждой из поверхностей печи (толщина существенно меньше двух других геометрических размеров) (рис. 3) и предполагая равномерное распределение температуры по внутренней поверхности футеровки, записываем дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в одномерной постановке в прямоугольной системе координат. В принципе, такой подход допустим и для печей с круглым поперечным сечением по причине незначительного отличия внутреннего и наружного диаметров ограждающей конструкции.

Начальные условия задаются следующим образом $0 \leq y \leq S$, $\tau=0: t=t_n$.

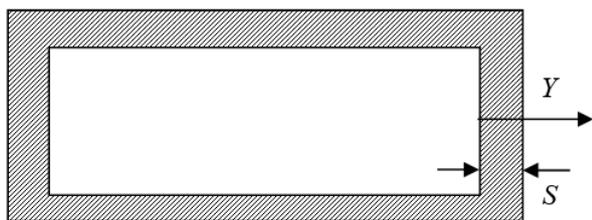


Рис. 3. Схема геометрических условий для подмодели теплового состояния футеровки: S – толщина огнеупора; Y – выбранное положительное направление на координатной оси

Граничные условия для внутренней и наружной поверхностей футеровки задаются как:

$$y = 0 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{\phi} (t_{н\phi} - t_{с}) + C_{к\lambda\mu} \times \left[\left(\frac{t_{н\phi} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{с} + 273}{100} \right)^4 \right] \frac{F_{м}}{F_{к\lambda}},$$

$$y = S : -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{oc} (t_{н\phi} - t_{oc}),$$

где $t_{н\phi}$ и t_{oc} – температуры наружной поверхности волокнистой футеровки и окружающей среды, °С; α_{oc} и α_{ϕ} – коэффициенты конвективной теплоотдачи от наружной поверхности футеровки в окружающую среду и от футеровки к воздуху в камере печи соответственно, Вт/(м²·К).

Таким образом, итоговая математическая модель включает в себя два элемента: основной – для описания температурного поля изделий и вспомогательный – для изучения температурного состояния футеровки.

Особенностью такой математической модели является возможность учета взаимного теплообмена между различными частями футеровки, что позволяет с необходимой точностью определять доли отведенной теплоты от металла и от футеровки отдельно [11]. Детально математическая модель описана в работе [12].

Результатом работы системы в целом является возможность контролирования и регулирования удаляемого количества теплоты из печи с высокой точностью.

Такие системы автоматического контроля могут служить источником дополнительной информации для автоматизированных систем управления технологическим процессом [12], в системах прогнозного расчета теплового состояния металла, путем задания граничных условий II рода.

На практике часто возникает вопрос о необходимости интенсификации операции воздуш-

ного охлаждения металла в печах. Согласно литературным источникам, существуют различные способы интенсификации конвективного теплообмена (в частности, при охлаждении металла в печах), среди которых скоростная обдувка газовой средой, введение турбулизаторов, импульсные режимы подачи охлаждающей среды [13,14] и др. Предложенная система контроля и диагностики позволяет с большей точностью определять достигаемые при этом усредненные характеристики теплосъема.

Выводы

Предложена система контроля и диагностики теплового состояния металла при его воздушном охлаждении в камерных печах с использованием минимального количества дополнительных элементов. Источником информации для работы системы выступают температуры воздуха на входе и выходе из печи с учетом расхода охлаждающего воздуха. Преимущества предлагаемой системы при работе совместно с математической моделью заключаются в возможности определения с достаточной точностью температурного состояния металла, доступности и простоте реализации, возможности задания граничных условий II рода для математической модели. Система работает в условиях интенсификации конвективного теплообмена при охлаждении металла в печах путем подачи охлаждающей среды в импульсном режиме.

Список литературы

1. Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М. Материаловедение и технология металлов. – М.: Высш. шк., 2005. – 862 с.
2. Бирюков А.Б., Сафьянц С.М., Гнителиев П.А. Анализ современного состояния технологии воздушного охлаждения металла в печах / Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2014. – №11(1379). – С. 42-47.
3. Бирюков А.Б., Сафьянц С.М., Иванова А.А., Андриенко Е.Н. Современные подходы к диагностике процессов тепловой обработки металла в печах / Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2015. – №1. – С. 50-55.
4. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей: учебно-справочное пособие. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
5. Бирюков А.Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах. – Донецк: Ноулидж, 2012. – 248 с.
6. Мазур В.Л., Рябов А.И., Мазур В.В. Произ-

- водственный опыт теплоизоляции высоко-температурных агрегатов в металлургии / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – №3. – С. 131-134.
7. Универсальный двухканальный программный ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ151 – Модификации [Эл. ресурс] / ОВЕН - измерительные приборы, датчики, регуляторы. – Режим доступа: http://www.owen.ru/catalog/universal_nij_dvuhkanal_nij_programmnyj_pid_regulyator_oven_trm151/86810059
 8. «Сафир М». Датчики давления с цифровой обработкой сигнала [Эл. ресурс] / Комплексное решение задач измерения давления, расхода, уровня. Датчики давления «Сафир». Производство, продажа и обслуживание. – Режим доступа: <http://www.manometr-kharkov.com/katalog/katalog%20SafirM%20microproc.pdf>
 9. Губинский В.И. Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра / Теория и практика металлургии. – 2004. – №6. – С. 56-60.
 10. Бирюков А.Б., Гнитиев П.А. Исследование конвективного теплообмена в печах камерного типа / Проект Sworld. Межд. науч.-практич. интернет-конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований», 18-30 марта 2014 г. – Иваново: Маркова АД, 2014. – С. 48-53.
 11. Бирюков А.Б., Гнитиев П.А. Исследование механизма отвода тепла при воздушном охлаждении металла в камерных печах / Тепловые процессы в технике. – 2016. – №1. – С. 36-41.
 12. Бирюков А.Б., Волошин А.И., Гнитиев П.А. Математическая модель для изучения процессов воздушного охлаждения металла в печах / Сталь. – 2015. – №7. – С. 78-81.
 13. Convective heat transfer of unsteady pulsed flow in sinusoidal constricted tube / J. Batina [et al.] // Convection and Conduction Heat Transfer. – 2011. – P. 83-106.
 14. Zohir A.E. The influence of pulsation on heat transfer in a heat exchanger for parallel and counter water flows / New York Science Journal. – 2011. – Issue 4(6). – P. 61-71.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.), P.A. Gnitiev
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE SYSTEM OF DIAGNOSTICS OF THE THERMAL STATE OF METAL IN CHAMBER FURNACES WITH AIR COOLING

Background. *Thermal processing is used in the production of large metal products in order to control the final properties and quality of products in the wide range. Crucially important is cooling, and therefore, it is necessary to maintain the predetermined cooling rate throughout the process. Of all cooling methods, air cooling is the least studied one, which causes some errors during the operation. This paper presents a system for control and diagnostics of the thermal state of the metal during its air cooling in chamber furnaces.*

Materials and/or methods. *The analysis of the temperature of air entering and being removed from the furnace, as well as the cooling air flow, is proposed in the paper. For the implementation of the considered system simple means to measure and control temperature and pressure are available. From the thermal balance, the incoming and being removed from the furnace heat, the desired cooling air flow is selected to provide the predetermined metal cooling rate.*

Results. *Based on the empirical research method, using the obtained parameters and the analysis of results with the help of a predictive control mathematical model working in parallel, the developed system allows to determine the current thermal state of the metal and the lining, as well as to maintain a predetermined flow of heat from the cooled metal.*

Conclusion. *The presented system with a small number of sensors allows operation of the air cooling in the heat treatment cycle with sufficient accuracy and using a mathematical model of predictive control it helps to maintain a predetermined heat flow from the metal taking into account the lining material.*

Keywords: *thermal state, metal cooling, cooling rate control.*

*Статья поступила 28.01.2016 г.
 © А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиев, 2016
 Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалев*