

# КОНТРОЛЬ РАСХОДА ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА НА ГОРЕЛКИ КОТЛОВ ТЭС

L.KESOVA, A.GEORGIEV, N.CHEREZOV, Y.POBIROVSKY

## CONTROL OF THE CONSUMPTION OF POWDERY FUEL ON BURNERS OF BOILERS OF THERMAL POWER PLANTS

**Анотація.** Досліджено гідродинамічний і тепловий методи контролю витрати та розподілу пилоподібного палива по пальниках котлів теплових електростанцій (ТЕС) при традиційному пневмотранспорті пилу і висококонцентрованої пилоподачі. Наведено результати досліджень методів на діючих двухкорпусних котлах ТПП-210А енергоблоків 300 Мвт Трипільської ТЕС.

Встановлено, що гідродинамічний метод дозволяє судити про витрату палива на пальник по зміні витрати повітря в пилопроводі. Для виміру витрати повітря можуть бути використані штатні пристрої котла. Для дистанційного керування процесом пилоподачі на пальники котла складена номограма.

Досліджено тепловий метод визначення витрати вугільного пилу в пилопроводі. Оцінено вплив витрати вугільного пилу на температуру аеросуміші. Обґрунтовано установку ежекторного змішувача перед пальниками котла при висококонцентрованої подачі пилу. Визначені ділянки гідродинамічної та теплової стабілізації потоку, місце і спосіб установки термомпари, що забезпечує показність і безінерційність сигналу по температурі. У дослідженнях на діючому котлі підтверджено, що температура аеросуміші може бути сигналом в автоматичній системі регулювання подачі палива при будь-якій технології пилоподачі.

**Ключові слова:** котел, пальник, контроль, паливо, пневмотранспорт.

**Анотация.** Исследованы гидродинамический и тепловой методы контроля расхода и распределения пылевидного топлива по горелкам котлов тепловых электростанций (ТЭС) при традиционном пневмотранспорте пыли и высококонцентрированной пылеподаче. Приведены результаты исследований методов на действующих двухкорпусных котлах ТПП-210А энергоблоков 300 МВт Трипольской ТЭС.

Установлено, что гидродинамический метод позволяет судить о расходе топлива на горелку по изменению расхода воздуха в пылепроводе. Для измерения расхода воздуха могут быть использованы штатные устройства котла. Для дистанционного управления процессом пылеподачи на горелки котла составлена номограмма.

Исследован тепловой метод определения расхода угольной пыли в пылепроводе. Оценено влияние расхода угольной пыли на температуру аэросмеси. Обоснована установка эжекторного смесителя перед горелками котла при высококонцентрированной подаче пыли. Определены участки гидродинамической и тепловой стабилизации потока, место и способ установки термомпары, которая обеспечивает представительность и безинерционность сигнала по температуре. В исследованиях на действующем котле подтверждено, что температура аэросмеси может быть сигналом в автоматической системе регулирования подачи топлива при любой технологии пылеподачи.

**Ключевые слова:** котел, горелка, контроль, топливо, пневмотранспорт.

**Annotation.** Hydrodynamic and thermal control methods of an consumption and distribution of powdery fuel on burners of boilers of thermal power plants are investigated at traditional and high-concentrated pneumatic transport of dust. Results of researches of methods on operating two-case boilers TPP-210A of power units 300 MWt of Tripolsky thermal power plant are given.

It is established that the hydrodynamic method allows to judge fuel consumption on a burner on change of a consumption of air in dust pipeline. For measurement of a consumption of air regular devices of a boiler can be used. For remote control by process pneumatic transport of dust on burners of a boiler the nomogram is made.

The thermal method of definition of an consumption of a coal dust in pipeline is investigated. Influence of an consumption of a coal dust on aero mix temperature is estimated. Installation of the ejection mixer before boiler burners is proved at the high-concentrated pneumatic transport of dust. Sites of hydrodynamic and thermal stabilization of a stream, a place and a way of installation of the thermocouple which provides imposing appearance and a signal without inertia on temperature are certain. Researches on an operating boiler a confirmed that the temperature of an aero mix can be a signal in automatic system of regulation of fuel supply at any technology pneumatic transport of dust.

**Key words:** boiler, burner, control, fuel, pneumatic transport.

В настоящее время, в связи с планируемым увеличением доли твердого топлива в топливно-энергетическом балансе Украины, вопрос экономии и экологически чистого сжигания угля на тепловых электростанциях (ТЭС) приобретает особую актуальность [1]. Эффективность сжигания угольной пыли существенно зависит от неравномерности распределения ее по горелкам котла, что приводит к пульсациям давления, невозможности поддержания соотношения «топливо-воздух», температурной разверке поверхностей нагрева. Возмущения в системе пылеподачи вызывают колебания избытка воздуха в горелках, образование оксидов серы и азота, интенсифицируют процессы шлакования и абразивно-коррозионного износа экранных поверхностей нагрева, ухудшают жидкое шлакоудаление [2]. В связи с этим, разработка и внедрение на действующих котлах методов определения расхода угольной пыли при разных технологиях пылеподачи является задачей первостепенной важности.

На протяжении ряда лет на Трипольской ТЭС (Тп ТЭС) Киевским политехническим институтом (НТУУ «КПИ») проводились исследования по контролю расхода угольной пыли на горелки котла ТПП-210А энергоблока 300 МВт при традиционном пневмотранспорте ( $\mu = 0,5 \text{ кг/кг}$ ,  $D_y = 500 \text{ мм}$ ) и высококонцентрированной пылеподаче ( $\mu = 70\text{-}200 \text{ кг/кг}$ ,  $D_y = 80 \text{ мм}$ ) [3-7]. Исследования показали, что при традиционном транспорте в диапазоне нагрузок  $N_s = 240\text{-}300 \text{ МВт}$  неравномерность распределения расхода топлива по горелкам достигает 60%, а контроль расхода топлива с целью устранения неравномерности, можно осуществлять гидродинамическим и тепловым методами [3,8]. Методы отличаются достаточной точностью, надежностью, несложным приборным оснащением, незначительными капитальными затратами и возможностью использования в условиях эксплуатации котлов ТЭС.

Гидродинамический метод позволяет определять расход угольной пыли по аэродинамическому сопротивлению участков пылепровода и сводится к расчету расхода пылевидного топлива по формуле [9]:

$$B_{тв} = \mu \cdot Q_a, \quad (1)$$

где  $Q_a$  - расход первичного воздуха на горелку, кг/с;

$\mu$  - массовая концентрация угольной пыли в потоке воздуха, кг/кг.

Исследованиями на пылепроводах котла ТПП-210А установлено, что при наличии угольной пыли в пылепроводе расходы первичного воздуха и угольной пыли изменяются в противофазе, и о расходе топлива можно судить по расходу первичного воздуха, расход которого при полностью открытых шиберях снижается в среднем на 10-15% (Рис1).

Контроль расхода воздуха на ТЭС осуществляют обычно штатными средствами (например, по перепаду давления на трубе Вентури), а точность расчета по формуле (1) определяется в основном точностью экспериментального определения концентрации угольной пыли. Любые изменения подачи пыли влияют на расход воздуха и скорость аэросмеси в пылепроводах. Зависимость перепадов давления на трубах Вентури котла ТПП-210А от степени открытия регулирующих клапанов пылепитателей приведена на Рис.2.

Поскольку перепады давлений в пылепроводах при изменении расхода пыли изменяются незначительно, расчет расхода топлива можно производить по упрощенной методике [9- 11], а массовую концентрацию угольной пыли определять из выражения:

$$\mu = H_a^{\dot{}} / H_a - 1, \quad (2)$$

где  $H_a^{\dot{}}$ ,  $H_a$  - динамический напор, создаваемый потоком воздуха при отсутствии пыли в пылепроводе и при ее наличии, соответственно, кг/см<sup>2</sup>.

Таким образом, при использовании гидродинамического метода определение расхода топлива сводится к измерению расхода первичного воздуха, его температуры и давления на входе в пылепровод, а также (для определения  $H_a^{\dot{}}$ ) к проведению экспериментальной оценки распределения воздуха по пылепроводам котла при отключенных пылепитателях. Обобщение опытных данных, полученных на котле ТПП-210А Тп ТЭС, позволило для расчета концентрации угольной пыли в пылепроводе на горелку предложить зависимость вида:

$$\mu = (Q_a^{\circ} / Q_a - 2,36)^2 - 1,74, \quad (3)$$

где  $Q_a^{\circ}$  - расход запыленного воздуха при работающем пылепитателе, кг/с;

$Q_a$  - расход чистого воздуха в пылепроводе (при отключенном пылепитателе и полностью открытом воздушном шибере), кг/с.

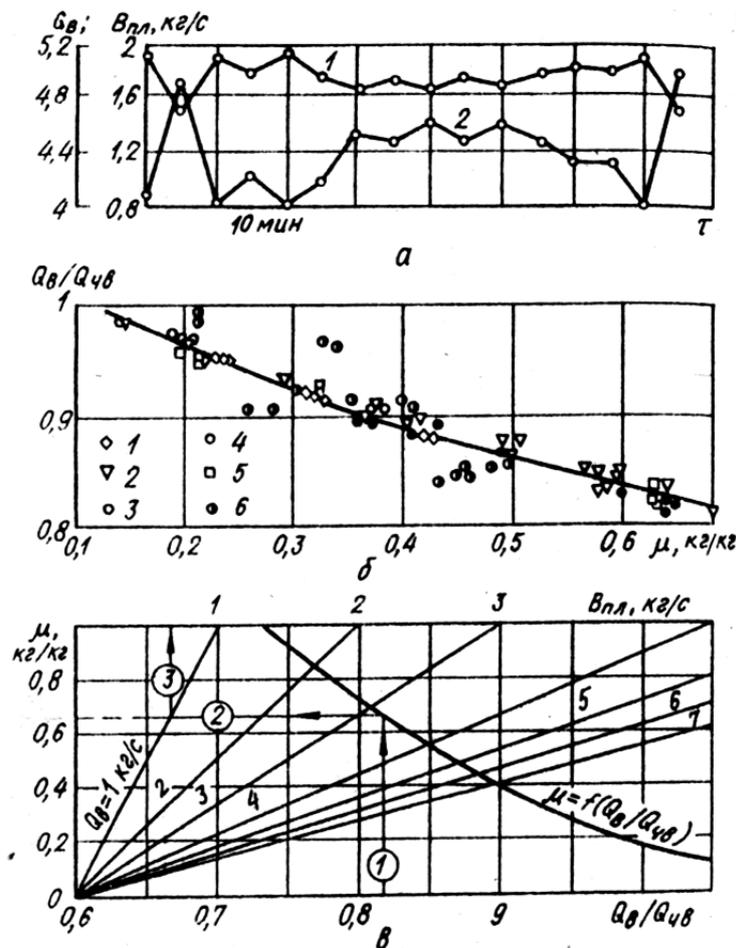


Рис. 1. Определение расхода угольной пыли по изменению расхода первичного воздуха в пылепроводе [3]:  
 а - изменение расхода пыли и воздуха в пылепроводе котла ТПП-210А (горелка № 4 корпуса ЗБ);  
 б - зависимость изменения расхода первичного воздуха от концентрации пыли (экспериментальные данные);  
 в - номограмма для определения расхода топлива на горелки котла по изменению расхода первичного воздуха в пылепроводе (котел ТПП-210А).

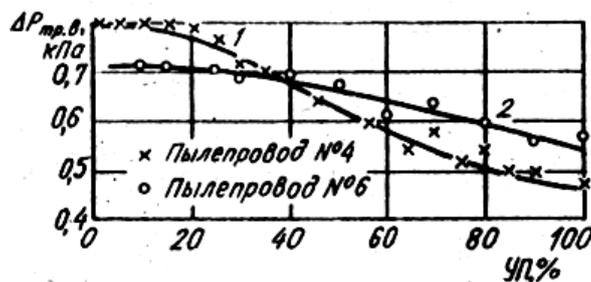


Рис. 2. Зависимость перепада давления на трубе Вентури

Поскольку погрешность определения концентрации угольной пыли по формуле (3) превышает  $\pm 5\%$ , гидродинамический метод можно считать рабочим и использовать его в процессе эксплуатации. Для оперативного дистанционного управления процессом пылеподачи на горелки при изменении режимов работы котла разработана номограмма (рис.1,в).

Тепловой метод позволяет определять расход угольной пыли в пылепроводе по степени охлаждения первичного воздуха, транспортирующего пыль в горелку [3,5-14]. Расход топлива  $B_{г.е}$  (кг/ч) на горелку рассчитывался по зависимости, полученной из уравнения теплового баланса пылепровода:

$$B_{i\bar{e}} = \frac{3600 \cdot Q_{\bar{a}}^{\bar{a}} \cdot c_{\bar{a}} \cdot (t_{\bar{a}\bar{a}} - t_{\bar{m}}) - Q_{i\bar{i}\bar{o}}}{c_{i\bar{e}} \cdot (t_{\bar{m}} - t_{i\bar{e}})}, \quad (4)$$

где, кроме ранее указанных величин,

$c_{\bar{a}}, c_{i\bar{e}}$  - теплоемкость воздуха и пыли, соответственно, кДж/кг;

$t_{\bar{a}\bar{a}}$  - температура первичного воздуха, °С;

$t_{\bar{m}}$  - температура пылеугольной аэросмеси, °С;

$t_{i\bar{e}}$  - температура угольной пыли, °С;

$Q_{i\bar{i}\bar{o}}$  - потери тепла в окружающую среду, кДж/ч.

Потери тепла в окружающую среду определялись по перепаду температур в начале и конце пылепровода при отключенном пылепитателе:

$$Q_{i\bar{i}\bar{o}} = 3600 \cdot Q_{\bar{a}}^{\bar{a}} \cdot c_{\bar{a}} \cdot (t_{\bar{a}\bar{a}}^I - t_{\bar{a}\bar{a}}^{II}), \quad (5)$$

где  $t_{\bar{a}\bar{a}}^I, t_{\bar{a}\bar{a}}^{II}$  - температура первичного воздуха в начале и конце пылепровода, °С.

Таким образом, точность теплового метода определяется точностью измерения температур, расхода воздуха, потерь тепла в окружающую среду. Однако, для измерения температуры пылеугольной аэросмеси необходимо правильно выбрать место установки термопреобразователя (ТП). Опыт НТУУ «КПИ» показал, что представительный и малоинерционный сигнал по температуре аэросмеси можно получить при установке (ТП) в тонкостенной гильзе в изгибе трубопровода – по биссектрисе, со стороны внутренней образующей поворота, где угольные частицы под воздействием центробежных сил отжимаются в направлении внешнего радиусагиба. У внутреннего радиуса появляется чистая зона, расширяющаяся с ростом угла поворота колена, где частицы пыли отсутствуют, и ТЭП износу не подвергается [3,5]. Исследования теплового метода на котле ТПП-210А показали, что при традиционном пневмотранспорте измерение температуры аэросмеси следует производить не у горелки, как рекомендуется в [10,11], а за смесителем пыли с первичным воздухом. (Измерения у горелки превышают значения температуры за счет излучения топки на ~8°С). Для получения представительного и надежного сигнала по расходу топлива на горелки котла при традиционном пневмотранспорте пыли от лопастных пылепитателей были оценены характеристики системы пылеподдачи по косвенным показателям: перепаду давления на расходомерном сопле; сопротивлениям пылевого смесителя и пылепровода; температуре аэросмеси за смесителем и перед горелкой. Испытания проводились при дистанционном управлении подачей топлива, что позволило оценить случайные изменения его расхода и пренебречь влиянием обратной связи на характеристики взаимосвязей в системы автоматического регулирования (АСР) [3,5,12, 13].

Так как характеристики пылевоздушного потока (плотность, температуры горячего воздуха и пыли, теплоемкости пыли и воздуха) в широком диапазоне нагрузок энергоблока изменяются незначительно, с достаточной степенью точности значения их можно усреднить и формула (4) для расчета расхода топлива на горелку приводится к виду

$$B_{i\bar{e}} = \frac{1952,7 \cdot \sqrt{\Delta P_{\bar{a}}} \cdot (300 - t_{\bar{m}})}{(t_{\bar{m}} - 105)}, \quad (6)$$

где  $\Delta P_{\bar{a}}$  - перепад давления на трубе Вентури.

По выражению (6) построена номограмма для использования оператором энергоблока в процессе эксплуатации [8].

Оценка представительности косвенных показателей расхода топлива выполнялась с использованием методов математической статистики и теории вероятности (регрессионный анализ, корреляционные функции) [3,5]. Сравнение результатов расчета расхода угольной пыли в пылепроводе гидродинамическим и тепловым методами показало достаточно хорошее согласование их в эксплуатационных условиях и возможность использования в АСР пылеподдачи [6, 12, 13].

Установлено, что наивысший коэффициент корреляции с расходом топлива в пылепроводе (практически без инерционности) дает связь расхода топлива на горелки с температурой аэросмеси за пылевым смесителем ( $r = 0,8-0,9$ ). Такие качественные показатели расхода как сопротивление пылевых смесителей и пылепроводов менее представительны и более подвержены влиянию различных помех (изменение качества топлива, характера истечения пыли из бункера, расхода первичного воздуха и др.) [3,5]. Статистический анализ связи расхода топлива в

пылепроводах с косвенными показателями позволил отдать предпочтение по чувствительности к изменению расхода угольной пыли, эксплуатационной надежности преобразователя, простоте его конструкции и удобству эксплуатации температуре аэросмеси за смесителем пыли. Важным фактором при решении поставленной задачи являлся выбор места и способа установки ТП, обеспечивающих представительность и безинерционность сигнала. Методом изокинетических измерений установлено, что температурная и гидродинамическая стабилизация потока аэросмеси при традиционном пневмотранспорте пыли наступает на расстоянии  $\sim 5-8$  диаметров пылепровода  $D_y = 500$  мм от точки смешения угольной пыли с первичным воздухом [9-12]. Предложена и исследована возможность изготовления и установки на пылепроводах котла ТПП-210А термопар из тонкого провода марки ХК с оголенным горячим спаем. Горячий спай термопары следует располагать точно в плоскости среза массивной бобышки по линии внутренней образующей трубы (рис. 3). Бобышка для установки ТП приваривается в трубопровод за точкой смешивания угольной пыли с первичным воздухом на расстоянии, где обеспечивалась температурная и гидродинамическая стабилизация потока. Такая установка ТП позволила получить сигнал с хорошими статическими и динамическими характеристиками. (Запаздывание сигнала по температуре аэросмеси практически не наблюдалось, а постоянная времени находилась в пределах 20-30 сек.). Кроме того, изменение сигнала во времени является плавным, четким; влияние помех невелико. Хорошая статика и динамика температурного сигнала позволили рекомендовать его для целей автоматизации подачи и равномерности распределения топлива по горелкам котла ТПП-210А Тп ТЭС [3,4,5].

Разработка системы подачи пыли с высокой концентрацией под давлением (ПВК<sub>д</sub>) на котле ТПП-210А Тп ТЭС, оборудованном аэрационными пылепитателями (АПП), потребовала специальных исследований для определения возможностей использования теплового метода контроля расхода топлива на горелки котла при новой технологии пылеподачи [3,8,13,14].

Для обеспечения представительности сигнала по температуре аэросмеси был применен эжекторный смеситель - новый узел ввода высококонцентрированной аэросмеси в пылепровод первичного воздуха (рис.4) [ 12,14].

Пылепровод  $D_y = 80$  мм ПВК<sub>д</sub> врезался в суженную часть эжекторного смесителя, который обеспечивает инжектирующий эффект, раскрывает струю пылевоздушного потока перед горелкой, осуществляя быстрый и равномерный прогрев пыли и обеспечивая равномерность ее распределения в сечении пылепровода  $D_y = 500$  мм.

На рис. 5 приведены поля температур пылеугольной аэросмеси перед горелкой горелкой №6 (корп. 3Б котла ТПП-210А), снятые специальным подвижным термозондом на расстоянии  $\sim 1,5-2$  диаметра трубопровода первичного воздуха от конца диффузора эжекторного смесителя и на том же расстоянии, но без эжекторного смесителя.

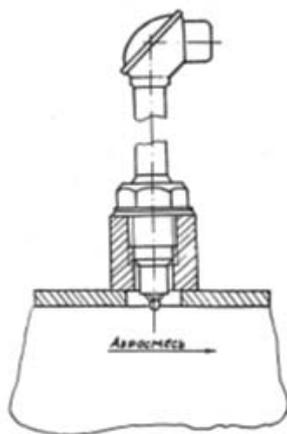


Рис. 3. Схема установки термопары на трубопроводе первичного воздуха.

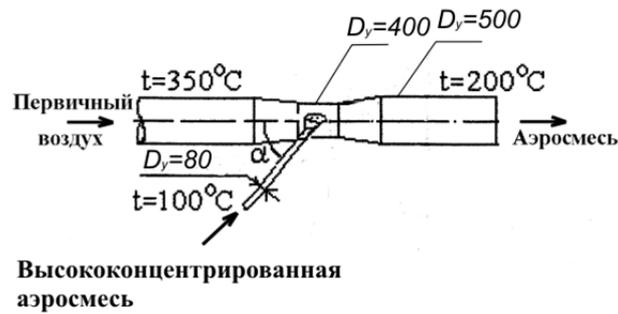


Рис. 4. Узел ввода аэрозоли с высокой концентрацией в пылепровод первичного воздуха (эжекторный смеситель) при ПВК<sub>д</sub>

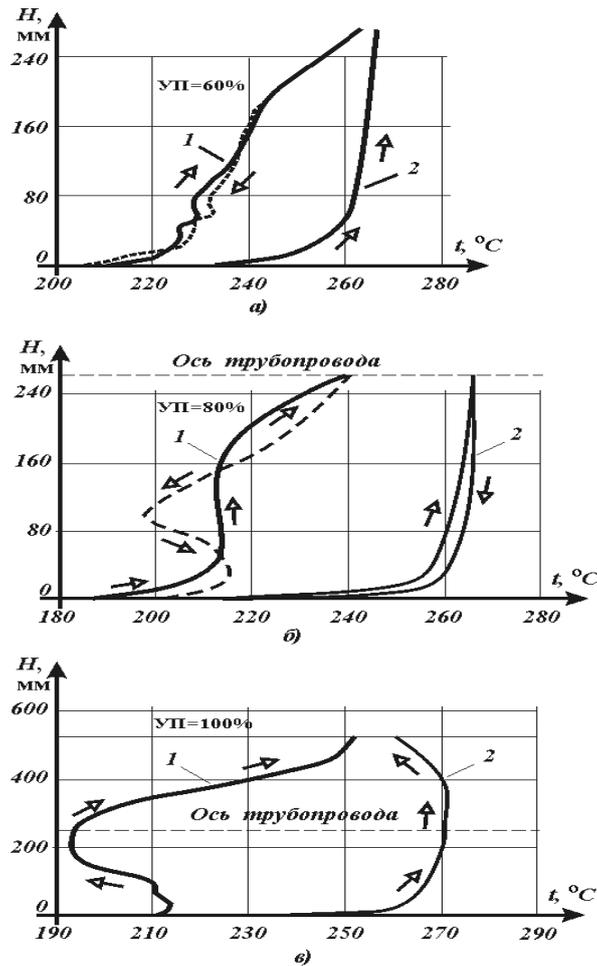


Рис. 5. Поля распределения температуры аэрозоли в пылепроводе перед горелкой при различных степенях открытия регулирующего органа (УП, %) аэропитателя:  
 а) УП = 60%; б) УП = 80%; в) УП = 100%.  
 1 – без эжекторного смесителя; 2 – с эжекторным смесителем [14].

Установлено, что при отсутствии эжекторного смесителя (поз.1) поле температур в сечении пылепровода неравномерно, разверка температуры составляет 10-30°C. Использование эжекторного смесителя позволило на расстоянии 1,5 ~ 2 диаметров трубопровода от конца его диффузора выровнять поля распределения температуры по сечению канала (поз.2), что свидетельствует о наличии на таком расстоянии перед горелкой гидродинамической и тепловой стабилизации потока пылеугольной аэрозоли, обеспечивая представительность сигнала по ее температуре в систему автоматического регулирования.

С учетом того, что при переменных режимах работы энергоблока происходит изменение полей распределения температуры аэросмеси по сечению пылепровода, рекомендовано некоторое заглубление ТП. Для защиты «горячего» спая от абразивного истирания использованы малоинерционные абразивостойкие чехлы из самосвязанного карбида кремния, рассчитанные для работы в средах с температурой до 1000<sup>0</sup>С, с углублением их в поток аэросмеси на 100 мм.

Исследования динамических свойств сигнала по температуре аэросмеси за эжекторным смесителем показали, что запаздывание сигнала составляет  $\tau_{сдт} = 2,5$  с, а инерционность не превышает 30-60 с. Поскольку перемещение регулирующего клапана АПП занимает до 10 с, то запаздывание в переходной характеристике на динамические свойства объекта существенно не влияет [5].

Выполненные НТУУ «КПИ» исследования позволили разработать систему АСР пылеподачи для системы ПВК<sub>д</sub> с сигналом по температуре аэросмеси, эксплуатация которой в течении более 20 лет на котлах ТПП-210А ТпТЭС показала надежность и высокую чувствительность к изменению расхода топлива на горелки [4,12,14].

### Выводы

1. Гидродинамический метод контроля расхода угольной пыли в пылепроводах отличается простотой, может быть реализован на котлах любой мощности.
2. Оценка представительности косвенных показателей расхода угольной пыли в пылепроводах с использованием методов математической статистики и теории вероятности показала, что наилучшими статическими и динамическими свойствами его обладает сигнал по температуре аэросмеси за смесителями пыли, измеряемый термопарой с оголенным «горячим» спаем (при традиционном пневмотранспорте) - на расстоянии 5-8 диаметров пылепровода первичного воздуха  $D_p = 500$  мм от места ввода пыли в трубопровод, при ПВК<sub>д</sub> - на расстоянии 1,5-2,0 диаметра пылепровода 500 мм от конца диффузора эжекторного смесителя первичного воздуха с пылеугольной аэросмесью.
3. Тепловой метод контроля расхода пылевидного топлива на горелки котла имеет достаточно высокую точность (погрешность 5%).
4. Сигналы по температуре аэросмеси в пылепроводах могут быть использованы в АСР стабилизации подачи топлива на горелки котла как при традиционном пневмотранспорте пыли так при высокой концентрации пыли в потоке воздуха.

### Литература

1. Энергетическая стратегия Украины до 2030 года.
2. Гусев Л.Н., Яхимович В.Е., Заболотский Ю.О. Исследование динамики подачи пылепитателей и ее влияние на экономичность работы парогенератора ТПП-210А Змиевской ГРЭС.- Теплоэнергетика, 1976, №4, с.37-40.
3. Л.А.Кесова Контроль и автоматическое управление пылеподачей на ТЭС – К.:Вища школа, 1991.- 142 с.
4. Кесова Л.А., Красноштан Н.Н. Система пылеподачи с высокой концентрацией котла ТПП-210А Трипольской ГРЭС.- К.: Знание, 1982. – 20с.
5. Кесова Л.А., Першин В.Й., Георгиев А.В. Система стабилизации подачи угольной пыли на горелки парогенератора ТПП-210А Трипольской ГРЭС.- К.: Знание, 1982.- с.20.
6. Кесова Л.А., Хоанг Тьен Зунг, Побировский Ю.Н. Контроль расхода угольной пыли на горелки котла, оборудованного системой пылеподачи высокой концентрации.- Промышленная теплотехника.- 1996.- №9, т.16.- с.44-48.
7. Кесова Л.А., Супрун А.В., Трифанов В.Г., Хайрулин Ф.С. Тепловой метод контроля расхода и распределения угольной пыли по горелкам парогенератора.- Делонир. В ЦКТИ «Информэнерго», №1091 эн-Д82.
8. Кесова Л.А., Георгиев А.В., Черезов Н.Н. Контроль и автоматическое управление подачей угольной пыли высокой концентрации на горелки котла ТПП-210А.- Энергетика и электрификация.- 2001, №2.- с.17-21.
9. Маслов В.И., Рабинович Я.Ф. Контроль за подачей пыли на отдельные горелки.- Теплоэнергетика, 1963, №12.
10. Ковалев А.П., Коган Я.А. Определение расхода топлива в пылепроводе и предельной производительности ШБМ по сопротивлению пылепровода.- Теплоэнергетика, 1964, №5.- с.38-42.

11. Г.П.Плетнев, М.Н.Бабкин и др. Исследование некоторых видов сигналов по расходу угольной пыли. – Теплоэнергетика, 1971, №12.- с. 13-16.
  12. А.С. 1170228 СССР, МКИ F23N1/100. Устройство для регулирования производительности пылепитателей котлоагрегата. В.И.Першин, А.В.Георгиев, Л.А.Кесова и др.- Оpubл. 30.07.85, №28.
  13. А.С. 1612179 СССР, МКИ F23N1/100. Способ автоматического управления подачей угольной пыли на горелки котла. Л.А.Кесова, А.В.Георгиев и др.- Оpubл. 7.12.90, №45.
  14. Разработка, исследование, внедрение и опыт эксплуатации системы высококонцентрированной пылеподачи (под давлением) котлов ТПП-210А Трипольской ТЭС (под общ. ред. проф. Кесовой Л.А.). - К.: Знание Украины, 2001.- 96 с.
- 
- 
-