

## ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 622.613.124; 662.87.001

Л.О. Кесо́ва, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-3060-8645  
Ю.М. Побіровський, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-2786-6499  
П.П. Меренгер, ст. викл., ORCID 0000-0003-3969-2270

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИБІР МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ВИТРАТИ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ НА ПАЛЬНИКИ ДІЮЧИХ КОТЛІВ ТЕС ПРИ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ПИЛОПОДАЧІ В УМОВАХ ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Наведено результати досліджень методів з контролю витрати вугільного пилу на пальники котлів ТПП-210А енергоблоку 300 МВт при традиційній і висококонцентрованій пилоподачі з використанням гідродинамічного та теплового методів. Гідродинамічний метод контролю витрати пилу може бути застосований на котлах різної потужності. Тепловий метод контролю має достатньо високу точність визначення витрати палива на пальники, сигнал по температурі аеросуміші має високі статичні та динамічні характеристики. На базі теплового методу розроблена та впроваджена автоматична система регулювання (АСР) пилоподачею на котлах ТПП-210А Трипільської ТЕС (Тп ТЕС). АСР може використовуватися для стабілізації подачі палива на пальники при різних технологіях пилоподачі.

**Ключові слова:** котел, пилоподача, витрата, вугільний пил.

#### Вступ

Ефективність спалювання вугільного пилу в котлах теплових електричних станцій (ТЕС) істотно залежить від нерівномірності розподілу його по пальниках, що призводить до пульсацій тиску, неможливості підтримки співвідношення «паливо-повітря». Збурювання в системі пилоподачі викликають коливання надлишку повітря в пальниках, підвищення утворення оксидів сірки і азоту, інтенсифікують процеси шлакування та абразивно-корозійного зношування екранних поверхонь нагрівання, погіршують рідке шлаковидалення, тому дослідження методів вимірювання вугільного пилу є задачею першочергової важливості [1, 2].

#### Постановка задачі

Метою роботи є проведення досліджень та обґрунтування методів контролю витрат вугільного пилу на пальники діючого двокорпусного котла ТПП-210А енергоблоку 300 МВт при традиційному пневмотранспорті ( $\mu=0,5$  кг/кг,  $D_y=500$  мм) і висококонцентрованої пилоподачі ( $\mu=(70-200)$  кг/кг,  $D_y=80$  мм). Дослідження показали, що при традиційному пневмотранспорті в діапазоні навантажень енергоблоку  $N_e=(240-300)$  МВт нерівномірність розподілу палива по пальниках досягає 60%, а контроль витрати палива з метою усунення нерівномірності можливо здійснювати гідродинамічним і тепловим методами. Методи відрізняються достатньою точністю, надійністю, нескладним приладовим оснащенням, незначними капіталовкладеннями і можливістю використання в умовах експлуатації котлів ТЕС.

#### Результати досліджень

Гідродинамічний метод дозволяє визначати витрату вугільного пилу за аеродинамічним опором ділянок пилопроводів і зводиться до розрахунку витрати пилоподібного палива за формулою [2]:

$$B_{пл} = \mu \cdot Q_n, \quad (1)$$

де  $Q_n$  – витрата первинного повітря на пальник, кг/с;  $\mu$  – масова концентрація вугільного пилу в потоці повітря, кг/кг.

Встановлено, що при наявності вугільного пилу в пилопроводі витрати первинного повітря і вугільного пилу змінюються в протифазі та про витрату палива можна судити по витраті первинного повітря який транспортує пил, що підтверджується залежністю витрати первинного повітря від концентрації пилу (рис. 1).

© Л.О. Кесо́ва, Ю.М. Побіровський, П.П. Меренгер, 2019

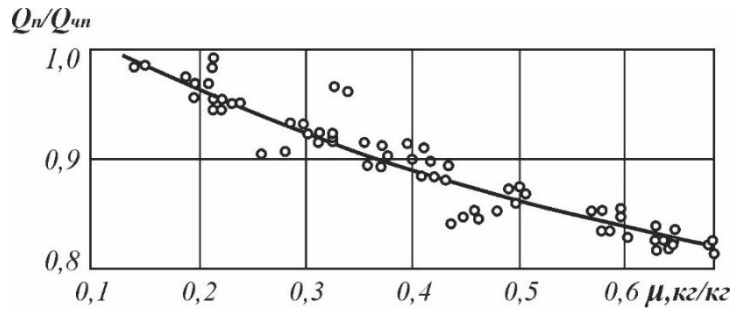


Рисунок 1 – Залежність зміни відносної витрати первинного повітря від концентрації пилу (експериментальні дані), де  $Q_{un}$  – витрата первинного повітря на пальник без палива (чисте повітря)

На ТЕС контроль витрати повітря звичайно здійснюється штатними засобами (наприклад, за перепадом тиску на трубах Вентурі, встановлених в повітропроводах), а точність розрахунку за формулою (1) визначається точністю експериментального визначення концентрації вугільного пилу. Будь-які зміни подачі пилу впливають на витрату повітря і швидкість аеросуміші в пилопроводах. Залежність перепадів тиску на трубах Вентурі котла ТПП-210А від ступеня відкриття регулювальних клапанів пиложивильників (УП) наведена на рис. 2.

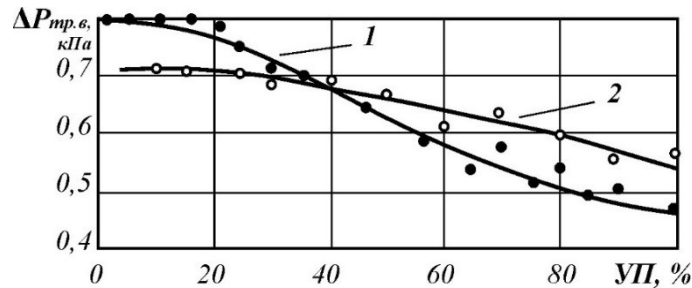


Рисунок 2 – Залежність перепаду тиску на трубах Вентурі пилопроводів котла ТПП-210А Тп ТЕС (котел №3Б): 1 – пилоповід №4; 2 – пилоповід №6

Оскільки перепади тисків у пилопроводах при зміні витрати пилу змінюються несуттєво, розрахунок витрати палива можна виконувати за спрощеною методикою [2, 3], а масову концентрацію вугільного пилу визначати з залежності виду:

$$\mu = H_o^n / H_o - 1, \quad (2)$$

де  $H_o^n, H_o$  – динамічний напір потоку повітря при відсутності пилу і при його наявності в пилопроводі, відповідно,  $\text{кг}/\text{см}^2$ .

Таким чином, при використанні гідродинамічного методу визначення витрати палива зводиться до вимірювання витрати первинного повітря, його температури і тиску на вході в пилоповід, а також (для визначення  $H_o^n$ ) до проведення експериментальної оцінки розподілу повітря по пилопроводах котла при відключених пиложивильниках. Узагальнення даних, що отримані у дослідженнях на котлі ТПП-210А, дозволило для розрахунку концентрації вугільного пилу в пилопроводі на пальник запропонувати залежність виду:

$$\mu = (Q_n^m / Q_n - 2,36)^2 - 1,74, \quad (3)$$

де  $Q_n^m$  – витрата запиленого повітря при працюючому пиложивильнику,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $Q_n$  – витрата чистого повітря в пилопроводі (при відключеному пиложивильнику і повністю відкритому повітряному шибері),  $\text{кг}/\text{с}$ .

Похибка визначення концентрації вугільного пилу не перевищує  $\pm 5\%$ , достовірність похибки підтверджена багаторазовими вимірами витрат первинного та вторинного повітря на корпусі котла ТПП-210А Тп ТЕС в умовах експлуатації, тому гідродинамічний метод можна вважати робочим і використовувати в автоматизованій системі регулювання (АСР) пилоподачі.

Тепловий метод дозволяє визначати витрату вугільного пилу в пилопроводі за ступенем

охолодження первинного повітря, що транспортує пил в пальник [1, 3]. Витрата палива  $B_{nl}$  (кг/год) на пальник розраховувалася за залежністю, яка отримана з рівняння теплового балансу пилопроводу:

$$B_{nl} = \frac{3600 \cdot Q_n^m \cdot c_n \cdot (t_{z,n} - t_{cm}) - Q_{em}}{c_{nl} \cdot (t_{cm} - t_{nl})}, \quad (4)$$

де, крім раніше зазначених величин,  $C_n, C_{nl}$  – теплоємність повітря і пилу, відповідно, кДж/кг;  $Q_{em}$  – втрати тепла в навколишнє середовище, кДж/год;  $t_{z,n}, t_{cm}, t_{nl}$  – температури гарячого первинного повітря, пиловугільної аеросуміші, вугільного пилу, відповідно, °С.

Для виміру температури пиловугільної аеросуміші важливо правильно вибрати місце установки термоперетворювача (ТП) на пилопроводі.

Втрати тепла в навколишнє середовище визначалися за перепадом температур на початку і кінці пилопроводу при відключеному пиложивильнику:

$$Q_{em} = 3600 \cdot Q_e^m \cdot c_n \cdot (t'_{z,n} - t''_{z,n}), \quad (5)$$

де  $t'_{z,n}, t''_{z,n}$  – температура первинного повітря на початку і кінці пилопроводу, відповідно, °С.

Дослідження показали, що представницький і малоінерційний сигнал по температурі аеросуміші можна одержати при встановленні ТП у тонкостінній гільзі у вигині трубопроводу – по бісектрисі, з боку внутрішньої поверхні повороту, де вугільні частки під впливом відцентрових сил віджимаються в напрямку зовнішнього радіуса гнуття. У внутрішнього радіуса з'являється чиста зона, що розширюється з ростом кута повороту коліна, де частки пилу відсутні і ТП зношуванню не піддається. Крім того, дослідження цього методу на котлі ТПП-210А показали, що при традиційному пневмотранспорті вимір температури аеросуміші варто робити не у пальника, як рекомендується в [1], оскільки значення температури при цьому зростає за рахунок випромінювання з топки десь на ~8 °С. Тому для одержання надійного сигналу по витраті палива на пальники котла при традиційному пневмотранспорті пилу від лопатевих пиложивильників були оцінені характеристики системи пилоподачі за непрямими показниками: перепаду тиску на витратомірному соплі; опорам пилового змішувача і пилопроводу; температурам аеросуміші за змішувачем і перед пальником.

Випробування проводилися при дистанційному керуванні подачею палива, що дозволило враховувати випадкові зміни його витрати і знехтувати їх впливом на характеристики взаємозв'язків у автоматичній системі регулювання [1, 3, 4]. Оскільки характеристики пилоповітряного потоку (щільність, температури гарячого повітря і пилу, теплоємності пилу і повітря) у широкому діапазоні навантажень енергоблоку змінюються несуттєво, їх необхідно усереднити і формула (4) для розрахунку витрати палива на пальник має вигляд:

$$B_{nl} = \frac{1952,7 \cdot \sqrt{\Delta P_n} \cdot (300 - t_{cm})}{(t_{cm} - 105)}, \quad (6)$$

де  $\Delta P_n$  – перепад тиску на трубці Вентурі.

Оцінка представництва непрямих показників витрати палива для розробки АСР виконувалася методами математичної статистики і теорії ймовірності (регресійний аналіз, кореляційні функції). Дослідженнями встановлено, що найвищий коефіцієнт кореляції з витратою палива в пилопроводі дає зв'язок  $B_{nl}$  з температурою аеросуміші за пиловим змішувачем ( $r=0,8-0,9$ ). Такі якісні показники витрати, як опір пилових змішувачів і пилопроводів, менш представницькі і більше піддаються впливу різних перешкод (зміна якості палива, характеру витікання пилу з бункера, витрати первинного повітря) [1].

Важливим фактором при рішенні поставленого завдання був вибір місця і способу установки ТП, що забезпечують представництво і безінерційність сигналу. Виміри показали, що температурна й гідродинамічна стабілізація потоку аеросуміші при традиційному пневмотранспорті пилу наступають на відстані ~5–8 діаметрів пилопроводу  $D_y$ , ~500 мм від точки змішування вугільного пилу з первинним повітрям, де процес змішування пилу з ним вже закінчено та має місце тепла стабілізація потоку аеросуміші [1]. Тому досліджено використання на пилопроводах котла ТПП-210А термопар із оголеним гарячим спаєм в спеціальних бобишках. Така установка ТП дозволила одержати сигнал з гарними статичними та динамічними характеристиками (стала часу – в межах 20–30 с). Крім того, зміна сигналу в часі стала плавною, чіткою; вплив збурень незначним. Гарна статика і динаміка температурного сигналу дозволили рекомендувати його для цілей автоматизації пилоподачі та рівномірності розподілу палива по пальниках (впроваджено на 8-ми корпусах котла ТПП-210А Тп ТЕС) [5]. Порівняння результатів досліджень і розрахунків  $B_{nl}$  у пилопроводах гідродинамічним і тепловим методами показало достатньо

гарне узгодження їх в експлуатаційних умовах і можливість використання в АСР пилоподачі на пальники котлів з забезпеченням рівномірності розподілу пилу і температури в топці [3, 5].

Статистичний аналіз зв'язку витрати палива в пилопроводах з непрямими показниками дозволив віддати перевагу за чутливістю до зміни витрати вугільного пилу, експлуатаційної надійності перетворювача, простоти його конструкції й зручності експлуатації сигналу за температурою аеросуміші за змішувачем пилу [4].

Розробка системи подачі пилу з високою концентрацією під тиском (ПВК<sub>Т</sub>) для котла ТПП-210А, обладнаного аераційними пиложивильниками, вимагала спеціальних досліджень для визначення можливостей використання теплового методу контролю витрати палива на пальники котлів при новій технології пилоподачі [1].

Для забезпечення представницького сигналу по температурі аеросуміші був застосований ежекторний змішувач – новий вузол введення висококонцентрованої аеросуміші в пилопровід первинного повітря (рис. 3).

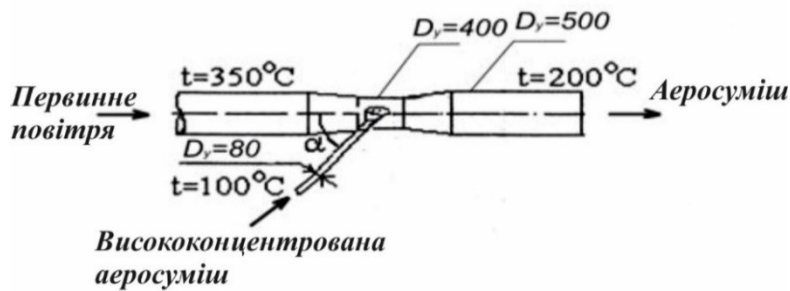


Рисунок 3 – Ежекторний змішувач – вузол введення аеросуміші з високою концентрацією в пилоповід первинного повітря при ПВК<sub>Т</sub>

Пилоповід  $D_p=80$  мм ПВК<sub>Т</sub> врізаний у звужену частину ежекторного змішувача, що забезпечує ефект інжектування, розкриває струмінь пилоповітряного потоку перед пальником, здійснюючи швидкий і рівномірний прогрів пилу і забезпечуючи рівномірність її розподілу в перетині пилоповіду  $D_p=500$  мм.

На рис. 4 наведені поля температур пилувугільної аеросуміші перед пальником №6 (корп. ЗБ котел ТПП-210А), зняті спеціальним рухливим термозондом на відстані 1,5–2 діаметри трубопроводу первинного повітря від кінця дифузора ежекторного змішувача і на тій же відстані, але без ежекторного змішувача.

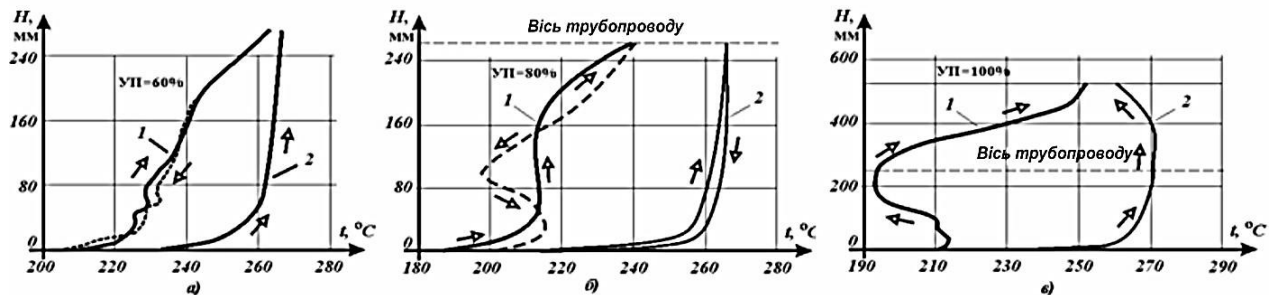


Рисунок 4 – Поля розподілу температури аеросуміші в пилоповоді перед пальником при різних ступенях відкриття регулюючого органу (УП, %) аеропиложивильника [6]:

а) УП=60%; б) УП=80%; в) УП=100%,

1 – без ежекторного змішувача; 2 – з ежекторним змішувачем

Встановлено, що при відсутності ежекторного змішувача (поз. 1) поле температур у перетині пилоповіду нерівномірне, розвірка температури становить (10–30) °С. Використання ежекторного змішувача дозволило на відстані 1,5–2 діаметри трубопроводу від кінця його дифузора вирівняти поля розподілу температури по перетині каналу (поз. 2), що свідчить про наявність перед пальником гідродинамічної й теплової стабілізації потоку пилувугільної аеросуміші, що забезпечує показовість сигналу по її температурі, який вводиться в АСР котла.

Для захисту «гарячого» спаю термопари від абразивного стирання використані малоінерційні абразивостійкі чохла із карбіду кремнію, розраховані для роботи в середовищах з температурою до

1000 °С, з поглибленням їх у потік аеросуміші на 100 мм. Оскільки при змінних режимах роботи енергоблоку відбувається зміна полів розподілу температури аеросуміші по перетину пилопроводу, рекомендоване деяке заглиблення ТП [6].

Дослідження динамічних властивостей сигналу по температурі аеросуміші за ежекторним змішувачем показали, що запізнювання сигналу становить  $\tau_{\text{зан}} \approx 2,5$  с, а інерційність не перевищує (30–60) с. Переміщення регулювального клапана АПЖ займає до 10 с; це запізнювання в перехідній характеристиці на динамічні властивості об'єкта істотно не впливає [6].

Виконані КПІ ім. Ігоря Сікорського дослідження для технології ПВК<sub>т</sub> дозволили розробити систему автоматичного регулювання пилоподачею з сигналом по температурі аеросуміші, експлуатація якої на протязі більш 20 років на котлах ТПП-210А Трипільської ТЕС показала надійність і високу чутливість до зміни витрати палива на пальники при змінних навантаженнях енергоблоків [1, 2, 6, 7].

### Висновки

1. Гідродинамічний метод контролю витрати вугільного пилу в пилопроводах відрізняється технологічною простотою і може бути реалізований на котлах будь-якої потужності.

2. Найкращі статистичні та динамічні властивості має АСР з сигналом по температурі аеросуміші за змішувачами пилу (вимірюється термпарою з оголеним «гарячим» спаєм: при традиційному пневмотранспорті на відстані 5–8 діаметрів, при ПВК<sub>т</sub> – на відстані 1,5–2,0 діаметра від кінця дифузора ежекторного змішувача пилопроводу первинного повітря  $D_p$ –500 мм).

3. Тепловий метод контролю витрати пилоподібного палива на пальники котла має достатньо високу точність (похибка  $\pm 5\%$ ).

4. Сигнали по температурі аеросміші в пилопроводах можуть бути використані в АСР стабілізації подачі палива на пальники котлів з різними технологіями пилоподачі і роботі на змінних навантаженнях.

### Список використаної література

1. Шницер И.Н. Технологии сжигания топлива в пылеугольных котлах / С.-Петербург.– Энергоиздат, 1994.– 284 с.

2. Контроль и автоматическое управление пылеподачей на ТЭС / Л.А. Кесова. – К.: Вища шк., 1991.– 142 с. – ISBN 5-11-002122-8.

3. Кесова Л.А., Шиллинг В. О гидродинамике пылепроводов тепловых электростанций // Теплоэнергетика, 1978.– №9.– С. 46–48.

4. Кесова Л.А., Георгиев А.В., Черезов Н.Н. Контроль и автоматическое управление подачей угольной пыли высокой концентрацией на горелках котла ТПП-210А // “Енергетика и электрификация”, 2001.– №2, с. 17–21.

5. Л.А. Кесова, Хоанг Тьен Зунг, Ю.Н. Побировский / Контроль расхода угольной пыли на горелки котла, оборудованного системой пылеподачи высокой концентрации // Промышленная теплотехника, 1996.– №9, т.16.– с. 44–48.

6. Разработка, исследование, внедрение и опыт эксплуатации системы высококонцентрированной пылеподачи (под давлением) котлов ТПП-210А Трипольской ТЭС / Кесова Л.А., Черезов Н.Н., Георгиев А.В. и др. К.: О-во "Знание Украины", 2001.– 96 с.

7. Кесова Л.О., Меренгер П.П., Побіровський Ю.М. Методи контролю витрати вугільного пилу на пальники котлів ТЕС / «Метрологія, інформаційно-вимірні технології та системи» (МІИТС-2017): Тезиси докладів VI Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків, 2017. – с. 62–63.

L. Kesova, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-3060-8645

Yu. Pobirovsky, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2786-6499

P. Merenger, Assis. Prof., ORCID 0000-0003-3969-2270

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

### RESEARCH AND SELECTION OF METHODS FOR CONTROLLING COAL DUST CONSUMPTION ON BURNERS OF EXISTING HPSS IN DIFFERENT A DUST FEED TECHNOLOGIES UNDER VARIABLE LOAD CONDITIONS.

The results of studies of hydrodynamic and thermal methods for controlling the consumption of coal dust on burners for boilers TPP-210A, power unit 300 MW are presented. Two technologies of coal dust supply are considered: traditional and highly concentrated. The hydrodynamic method of controlling the dust consumption can be used on boilers of any steam generating capacity; it makes it possible to determine the consumption of coal dust by the aerodynamic resistance of the dust pipe. It has been established that the amount of dust in the dust pipe affects the flow of primary air to the burner, this allows judging by its share in the dust-air stream about fuel consumption and regulating the flow of coal dust to the boiler burners. Calculated dependencies were obtained for estimating the consumption of coal dust. The advantage of the method is that its implementation uses standard boiler instruments. The results of operation showed that the method can be applied in the system for regulating the supply of coal dust to the burners. The thermal method determines the flow of dust to the burner according to the degree of cooling of the primary air with coal dust in the dust pipe. The method is investigated on the operating boiler. It is important to choose the location and method of installation of the thermal receiver to obtain the correct signal from the air mixture temperature. To work on a highly concentrated supply of coal dust, a special ejector mixer was developed and the dependence of the consumption of coal dust on the temperature of the air mixture was obtained. This control method has a fairly high accuracy in determining the fuel consumption on burners, and the signal based on the air mixture temperature has good static and dynamic characteristics. On the basis of the thermal method, an automatic control system (ACS) for the supply of coal dust on the TPP-210A boilers of the Trypils'ka TPP has been developed and implemented. ACS can be used to regulate the supply of fuel to the burners with various technologies for the supply of coal dust.

**Keywords:** boiler, supply of coal dust, consumption, air mixture.

#### References

1. Shnitser I.N. Tekhnologii szhiganiya topliva v pyleugol'nykh kotlakh / S.-Peterburg.– Energoizdat, 1994.– 284 s.
2. Kontrol' i avtomaticheskoye upravleniye pylepodachey na TES / L.A. Kesova. – K.: Vishcha shk., 1991.– 142 s. – ISBN 5-11-002122-8.
3. Kesova L.A., Shilling V.O gidrodinamike pyleprovodov teplovykh elektrostantsiy // Teploenergetika, 1978.– №9.– S. 46–48.
4. Kesova L.A., Georgiyev A.V., Cherezov N.N. Kontrol' i avtomaticheskoye upravleniye podachey ugol'noy pyli vysokoy kontsentratsiyey na gorelках kotla TPP-210A // “Energetika i elektrifikatsiya”, 2001 №2.– s. 17–21.
5. . L.A.Kesova, Khoang T'yen Zung, YU.N.Pobirovskiy / Kontrol' raskhoda ugol'noy pyli na gorelki kotla, oborudovannogo sistemoy pylepodachi vysokoy kontsentratsii // Promyshlennaya teplotekhnika, 1996.– №9, t.16.– s.44-48.
6. Razrabotka, issledovaniye, vnedreniye i opyt ekspluatatsii sistemy vysokokontsentririrovannoy pylepodachi (pod davleniyem) kotlov TPP-210A Tripol'skoy TES / Kesova L.A., Cherezov N.N., Georgiyev A.V. i dr. K.: O-vo "Znaniye Ukrainy", 2001.– 96 s.
7. Kêsova L.O., Merenger P.P., Pobírovs'kiy YU.M. Metodi kontrolyu vitrati vugíl'nogo pilu na pal'niku kotlív TES / «Metrologiya, informatsionno-izmeritel'nyye tekhnologii i sistemy» (MIITS-2017): Tezisy dokladov VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. – Khar'kov, 2017. – s. 62–63.

**Л.А. Кесова**, доктор техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-3060-8645

**Ю.Н. Побировский**, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-2786-6499

**П.П. Меренгер**, ст. преп., ORCID 0000-0003-3969-2270

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

## **ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ РАСХОДОВ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА ГОРЕЛКУ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОТЛОВ ТЭС ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПЫЛЕПОДАЧИ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК**

*Приведены результаты исследований методов контроля расхода угольной пыли на горелки котлов ТПП-210А энергоблока 300 МВт при традиционной и высококонцентрированной системах пылеподачи с использованием гидродинамического и теплового методов. Гидродинамический метод контроля расхода пыли может быть применен на котлах разной мощности. Тепловой метод контроля имеет достаточно высокую точность определения расхода топлива на горелки, сигнал по температуре аэросмеси имеет высокие статические и динамические характеристики. На базе теплового метода разработана и внедрена автоматическая система регулирования (АСР) пылеподачи на котлах ТПП-210А Трипольской ТЭС. АСР может использоваться для стабилизации подачи топлива на горелки при различных технологиях пылеподачи.*

**Ключевые слова:** котел, пылеподача, расход, угольная пыль.

Надійшла 16.02.2019

Received 16.02.2019