

## Приборы и оборудование

УДК 662.933.1:628.5

**Вольчин І.А.**, канд. техн. наук, **Коломієць О.М.**, канд. техн. наук  
**Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ**  
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

### Модернізація соплового блоку котла ТП-10 для зменшення викидів оксидів азоту

Представлено основні результати числового дослідження процесу горіння газового вугілля у топці котельного агрегату ТП-10. Показано, що послідовність вертикального розміщення пальників та реєстрів вторинного повітря у сопловому блоці впливає на утворення оксидів азоту. Розрахунки виявили залежність емісії  $\text{NO}_x$  від напрямку подачі вторинного повітря та перерозподілу його витрати між реєстрами різних ярусів. На підставі проведеного аналізу роботи котлоагрегату запропоновано маловитратну модернізацію соплового блоку. Нова конструкція соплового блоку, а також відповідні напрямки та режим подачі вторинного повітря дають змогу майже на чверть знизити емісію оксидів азоту у топці котельного агрегату. *Бібл. 6, рис. 4, табл. 3.*

**Ключевые слова:** котлоагрегат, пальник, повітряний реєстр, оксиди азоту.

Більшість котельних агрегатів теплових електростанцій України вже виробили свій ресурс, що призводить до понаднормованих витрат палива на виробіток електроенергії та значних викидів забруднюючих речовин, різкого зменшення яких вимагає екологічне законодавство [1]. Для зменшення викидів оксидів азоту слід або споруджувати нові ефективні установки азотоочищення, або впроваджувати режимно-технологічні заходи скорочення виходу оксидів азоту з умовою мінімізації їх негативного впливу на процес горіння.

Одним з режимно-технологічних заходів є організація тангенціального спалювання вугільного пилу, куди потік вторинного повітря спрямовується не до центру паливної, а вздовж екранних поверхонь [2]. Це дає можливість здійснити займання летких у відновлювальній зоні, що сприятиме основній конверсії азотних

сполук палива не у паливний оксид азоту, а у молекулярний азот [3]. Для оцінки можливості реалізації тангенціального спалювання на котлоагрегатах ТП-10, якими оснащена II черга Добротвірської ТЕС, було проведено числові дослідження процесу горіння вугільного пилу з різним розташуванням пальників та повітряних реєстрів у сопловому блоці, кутами подання та розподілом вторинного повітря між реєстрами.

Котлоагрегат ТП-10 Таганрозького котельного заводу з твердим шлаковидаленням призначений для спалювання високореакційного вугілля. Він має прямокутну у поперечному розрізі паливню. В оригінальних конструкціях котла ТП-10 на бічних стінах паливни встановлено по два соплових блока пальників та реєстрів вторинного повітря. У кожному сопловому блоці розташовано по два квадратні прямокутні пальники з розміром поперечного

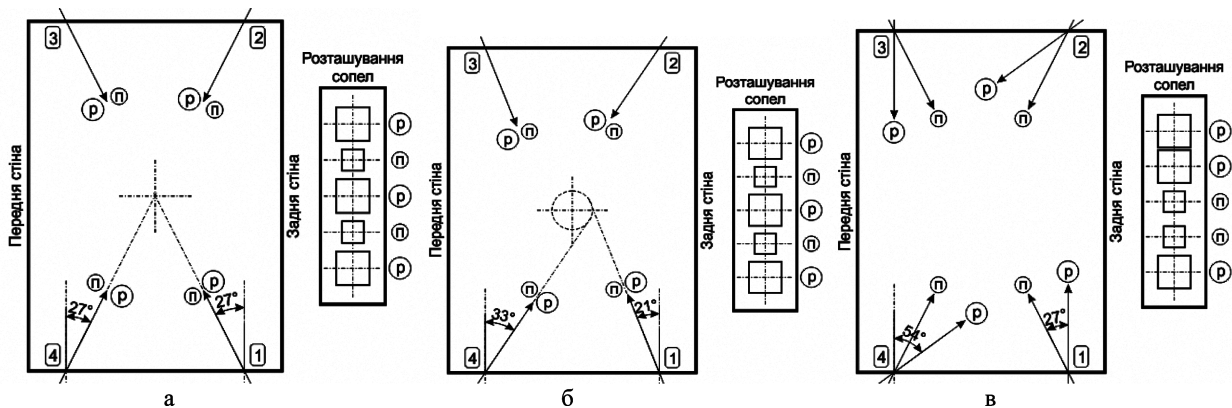


Рис.1. Розташування пальників та повітряних реєстрів у сопловому блоці за варіантом 1 (а), 2 (б), 3 (в): 1–4 – номери соплових блоків.

перерізу  $300 \times 300$  мм та по три квадратні прямокутні повітряні реєстри з розміром поперечного перерізу  $467 \times 467$  мм. У першій конструкції соплового блоку у горизонтальній площині вісі пальників та реєстрів спрямовані на центр паливни (рис.1, а); у другій конструкції – тангенціально до умовного центрального кола діаметром 1200 мм, тобто спрямовані на умовне «мале коло» (рис.1, б). В обох конструкціях у вертикальній площині пальники й реєстри чергуються за схемою «р-п-р-п-р» («п» – пальник, «р» – повітряний реєстр).

Було виконано розрахунки параметрів процесу горіння палива та динаміки газів у паливні за цими варіантами конструкції соплового блоку, які потрібні для дослідження робочих характеристик котельного агрегату та подальшого порівняння з ними параметрів процесу при застосуванні конструкції модернізованого соплового блоку за іншими варіантами.

У третьому варіанті сопла пальників та реєстрів квадратні у поперечному перетині, як у перших двох варіантах. Відмінність останнього варіанту від попередніх полягає у наступному. Вісі пальників повернуті у горизонтальній площині на  $27^\circ$  від нормалі до стіни (на центр топки). Вісі повітряних реєстрів у соплових блоках 1 та 3 спрямовані у горизонтальній площині вздовж передньої та задньої стін котлоагрегату (див. рис.1, в), а вісі реєстрів у соплових блоках 2 та 4 повернуті у горизонтальній площині на  $54^\circ$  від нормалі до стіни (максимальний кут, на який дозволяє повернути ширина вікна у стіні для встановлення блоку). Тобто вісі реєстрів спрямовані на умовний «великий овал».

Знизу вгору за газовим трактом у вертикальній площині пальники й повітряні реєстри розташовані за схемою «р-п-п-р-р». Таке розташування пальників має створити у центрі паливни зону з нестачею окисника, що дасть змогу загальмувати процес утворення оксидів азоту

під час згоряння палива. Окисник для подальшого горіння поступово додається крізь повітряні реєстри верхніх ярусів. Направлення реєстрами потоків вторинного повітря вздовж стін має створити буферні області задля захисту екранних поверхонь теплообміну у паливні від високотемпературної корозії.

У розрахунках використовувалося газове вугілля Львівсько-Волинського басейну з нижчою теплотою згоряння  $20,72$  МДж/кг на робочий стан, повна витрата якого становить  $8,269$  кг/с. Дані про його склад отримано з довідників [4, 5]. При коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 1,2$  витрата повітря становить  $46,644$   $\text{м}^3/\text{с}$ . Через пальники до паливни подається паливно-повітряна суміш з масовим співвідношенням 1,1. Таким чином, транспортне (первинне) повітря становить  $12,08$  % від загальної кількості, а вторинне  $87,92$  %. Дані про розподіл вугільного пилу за розмірами твердих частинок (див. рис.2) прийнято відповідно до функції Розін-Раммлера [6] з параметрами, наведеними нижче:

мінімальний діаметр частинок $D_{\text{мін}}$	–	5 мкм
максимальний діаметр частинок $D_{\text{макс}}$	–	200 мкм
середній діаметр частинок $D_{\text{ср}}$	–	69 мкм
параметр розсіювання розмірів частинок $n$	–	1,5
кількість фракцій вугільного пилу $m$	–	10

При аналізі результатів враховувалася не тільки емісія оксидів азоту, а й вміст вуглецю у коксозольному залишку. Розрахунки паливни з оригінальними конструкціями соплових блоків (варіанти 1 та 3) показали, що емісія  $\text{NO}_x$  становить  $923$  та  $950$   $\text{мг}/\text{м}^3$  відповідно, а вміст горючих у коксозольному залишку становить  $4,66$  та  $4,46$  % відповідно. Перехід у першому варіанті конструкції зі схеми розташування сопел пальників й повітряних реєстрів у блоці з «р-п-р-п-р» на «р-п-п-р-р» дасть змогу знизити емісію  $\text{NO}_x$  на  $14,49$  % ( $789$   $\text{мг}/\text{м}^3$ ). Тут і далі розрахункова емісія оксидів азоту приведена до

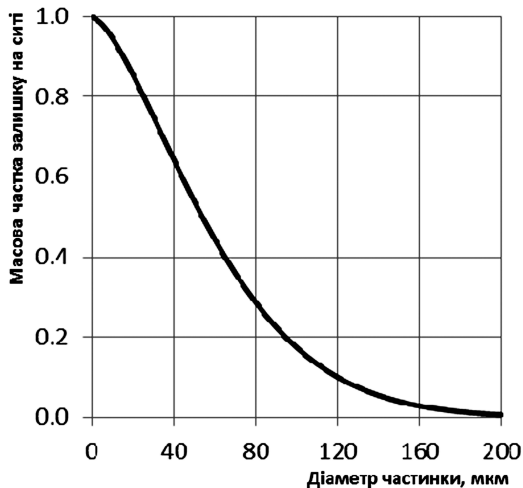
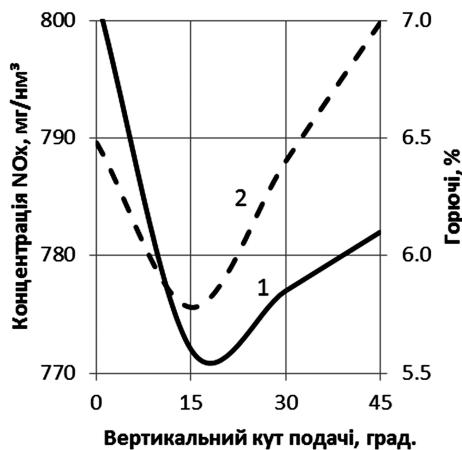


Рис.2. Розподіл маси вугільних частинок за розміром.

нормальних умов (тиск 101325 Па, температура 273,15 К) сухих димових газів при стандартному вмісті кисню (6 %). Розрахунок паливної за 3-м варіантом конструкції соплового блоку показав, що емісія  $\text{NO}_x$  становила 802 мг/м<sup>3</sup> (зниження на 13,12 % у порівнянні з першим варіантом), а вміст горючих у коксозольному залишку становив 6,48 %. Важливо зауважити, що при переході у 3-му варіанті конструкції зі схеми розташування сопел у блоці з «р-п-р-р» на «р-п-р-п-р» емісія оксидів азоту збільшується на 5,96 % (978 мг/м<sup>3</sup>). В описаних вище варіантах конструкції витрату паливно-повітряної суміші крізь пальники та вторинного повітря крізь реєстри розподілено рівномірно.

З метою детального дослідження роботи котлоагрегату та поліпшення характеристик 3-го варіанту конструкції соплового блоку розглянуто додаткові варіанти. Так, у реєстрах верхнього ярусу передбачено встановлення жалюзійних решіток для керування напрямом по-

Рис.3. Емісія  $\text{NO}_x$  та недопал вуглецю при різних вертикальних кутах подачі вторинного повітря: 1 — концентрація  $\text{NO}_x$ ; 2 — недопал вуглецю.

токів вторинного повітря у вертикальній площині з метою створення умов кращого вигорання вуглецю у коксозольному залишку задля імітації технології «верхнього повітря» (Over Fire Air).

На рис.3 показані залежності емісії  $\text{NO}_x$  та недопалу вуглецю у коксозольному залишку при різних вертикальних кутах подачі вторинного повітря крізь реєстри верхнього ярусу. За базовий прийнято третій варіант конструкції соплового блоку з горизонтальною подачею вторинного повітря на всіх ярусах. Видно, що мінімуми кривих знаходяться у діапазоні кута (14–16)°. Вочевидь, при більших кутах потік повітря спрямовується вище зони горіння, що збільшує недопал, та надлишок кисню витрачається на утворення оксидів азоту.

Для поглибленого дослідження зроблено розрахунки варіантів конструкції соплового блоку з різними горизонтальними та вертикальними кутами повороту вісі повітряних реєстрів. Результати у табл.1 показують, що горизонтальний поворот повітряних реєстрів на «мале коло» має позитивний ефект щодо емісії оксидів азоту, але краще це робити для верхнього ярусу. Задля підсилення ефекту повітря з реєстрів цього ярусу спрямовується ще й у вертикальній площині вгору під кутом 15°.

Первинне (транспортне) повітря становить тільки 52,47 % від потрібного для повного згорання легких речовин вугілля. Нестача окислювача покривається за рахунок вторинного повітря, що поступає з реєстрів нижнього ярусу. Решта цього повітря (62,76 %), як показують розрахунки, витрачається на спалювання вуглецю у коксозольному залишку та утворення  $\text{NO}_x$ . Виходячи з цього, доцільно зменшити витрату вторинного повітря крізь реєстри нижніх ярусів і подавати його поступово, в міру вигорання вуглецю.

На основі 3-го варіанту конструкції соплового блоку розраховано процеси у топці котельного агрегату з різним розподілом між ярусами реєстрів витрати вторинного повітря. Результати

Таблиця 1. Вплив кутів повороту повітряних реєстрів для варіантів 1–4

Параметр	1	2	3	4
Кути повороту реєстрів, град.:				
1-го ярусу	0; 54	0; 54	0; 54	21; 33
2-го ярусу	0; 54	0; 54	0; 54	0; 54
3-го ярусу	0; 54	21; 33	21; 33	0; 54
Вертикальний кут подачі з 3-го ярусу, град.	0	0	15	0
Зменшення емісії $\text{NO}_x$ , %	13,12	17,33	18,47	14,46
Недопал вуглецю коксозольного залишку, %	6,48	7,92	8,23	4,74

**Таблиця 2. Вплив розподілу вторинного повітря між ярусами реєстрів для варіантів 1–4**

Параметр	1	2	3	4
Витрата повітря у реєстрах, %:				
1-го ярусу	33,33	25	20	30
2-го ярусу	33,33	25	30	20
3-го ярусу	33,33	50	50	50
Зменшення емісії NO <sub>x</sub> , %	13,12	22,30	21,77	20,32
Недопал вуглецю коксозольного залишку, %	6,48	7,04	8,17	6,88

**Таблиця 3. Вплив кутів подачі вторинного повітря для варіантів 1–4**

Параметр	1	2	3	4
Кути повороту реєстрів, град.:				
1-го ярусу	0; 54	0; 54	0; 54	21; 33
2-го ярусу	0; 54	0; 54	0; 54	0; 54
3-го ярусу	0; 54	21; 33	21; 33	27
Вертикальний кут подачі з 3-го ярусу	0	0	15	15
Зменшення емісії NO <sub>x</sub> , %	22,30	15,16	17,03	15,88
Недопал вуглецю коксозольного залишку, %	7,04	6,95	6,10	6,66

розрахунків наведено у табл.2, які показують позитивний ефект щодо зменшення емісії оксидів азоту, але разом з цим дещо збільшується недопал вуглецю у коксозольному залишку.

Для повноти дослідження зроблено розрахунки варіантів конструкції соплового блоку з різними горизонтальними кутами повороту вісі повітряних реєстрів та вертикальними кутами подачі при нерівномірному розподілі вторинного повітря між ярусами (нижній та середній – по 25 %, верхній – 50 %). Результати розрахунків наведено у табл.3. Найкращі результати має варіант, у якому реєстри нижніх ярусів спрямовані на «великий овал», а реєстри верхнього ярусу – на «мале коло» та подають повітря вгору під кутом 15°. З такими параметрами емісія NO<sub>x</sub> знижується на 17,03 % у порівнянні з першим оригінальним варіантом.

На рис.4 показано розрахункові точки для всіх варіантів конструкцій соплових блоків, а також кутів подачі потоку та розподілу вторинного повітря між ярусами реєстрів. Емісію NO<sub>x</sub> представлено у порівнянні з першим оригінальним варіантом. Набагато вище основної групи знаходяться три точки (позначені квадратом) для варіантів конструкції зі схемою «р-п-р-р». Найгірша з них відповідає варіанту, коли застосовуються кути повороту сопел, як у 3-му варіанті (на «великий овал»). Для варіантів конструкції зі схемою «р-п-п-р» точки (позначені ромбом) на рисунку гуртуються окремо. У групі спостерігається кореляція

між емісією NO<sub>x</sub> та недопалом вуглецю у коксозольному залишку. Нижче основної групи знаходиться точка (позначена трикутником), яка відповідає, на погляд авторів, найкращому варіанту. Ці факти підтверджують необхідність використання схеми «р-п-п-р».

Характерні риси конструкції соплових блоків найкращого варіанту є такими:

- схема розташування сопел у блоці – «р-п-п-р»;
- вісі усіх пальників повернуті на 27° від нормалі до стіни (у центр топки);
- вісі реєстрів першого ярусу у блоках 1 та 3 не повернуті від нормалі до стіни, а у блоках 2 та 4 повернуті на 54° від нормалі до стіни – спрямованість на «великий овал» у прямому напрямку;
- вісі реєстрів другого ярусу у блоках 1 та 3 повернуті на 54° від нормалі до стіни, а у блоках 2 та 4 не повернуті від нормалі до стіни – спрямованість на «великий овал» у зворотному напрямку;
- вісі реєстрів третього ярусу у блоках 1 та 3 повернуті на 21° від нормалі до стіни, а у блоках 2 та 4 повернуті на 33° від нормалі до стіни – спрямованість на «мале коло» у прямому напрямку;
- вертикальний кут подачі вторинного повітря з реєстрів 3-го ярусу становить 15°;
- витрата вторинного повітря крізь реєстри нижнього та середнього ярусів – по 25 %, верхнього ярусу – 50 %.

Емісія оксидів азоту для цього варіанту становить 674 мг/м<sup>3</sup>, що на 26,93 % менше у порівнянні з першим оригінальним варіантом, а недопал вуглецю у коксозольному залишку складає 6,49 %.

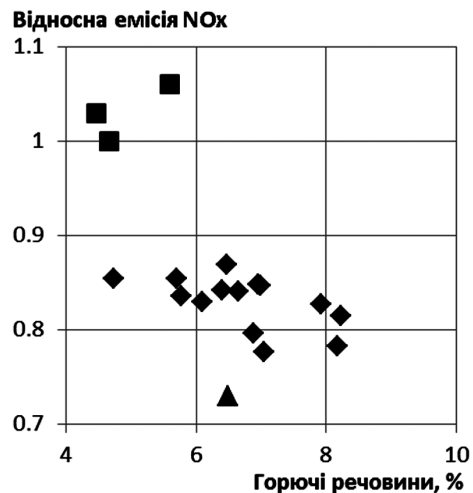


Рис.4. Взаємозв'язок між емісією NO<sub>x</sub> та кількістю горючих речовин.

### Висновки

Реалізація тангенціального спалювання для котла ТП-10 з прямокутною паливною камерою завдяки модернізації пальників дасть можливість зменшити вихід оксидів азоту без значної реконструкції котла.

У процесі згоряння вугілля утворюються тільки паливні оксиди азоту.

Розташування пальників та повітряних регістрів у сопловому блоці за схемою спільного розміщення пальників («р-п-п-р») створює область з низьким вмістом окисника, що гальмує утворення паливних оксидів азоту, які є головними для вугільних котлів з твердим шлаковиданням.

У порівнянні з оригінальними конструкціями у модернізованих варіантах прогнозується збільшення вмісту вуглецю у коксозольному залишку. Спрямування вгору вторинного повітря з регістрів третього ярусу зменшує механічний недопал тільки до певного вертикального кута подачі.

Конструкція блоку та режим подачі вторинного повітря дозволить знизити емісію  $\text{NO}_x$  майже на чверть у порівнянні з оригінальними конструкціями.

Збільшення швидкості потоку димових газів з високим вмістом кисню біля екранів

знижує ймовірність високотемпературної корозії поверхонь теплообміну.

### Список літератури

1. Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С. та ін. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України. — Київ : ГНОЗІС, 2013. — 308 с.
2. Алехнович А.Н., Богомолів В.В. Конструкции топочно-горелочных устройств для снижения оксидов азота и шлакования, сжигания низкорекционных углей (Обзор) // V науч.-практ. конф. «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы», Челябинск, 7–9 июня 2011 г. — Челябинск, 2011. — С. 72–89.
3. Glarborg P., Jensen A.D., Johnsson J.E. Fuel Nitrogen Conversion in Solid Fuel Fired Systems // Progress in Energy and Combustion Science. — 2003. — Vol. 29, № 2. — P. 89–113.
4. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Под ред. Н.В.Кузнецова и др. — М. : Энергия, 1973. — 296 с.
5. Тепловые и атомные электрические станции : Справ. / Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. — М. : Энергоиздат, 1982. — 624 с.
6. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. — Л. : Химия, 1987. — 264 с.

Надійшла до редакції 26.02.14

**Вольчин І.А.**, канд. техн. наук, **Коломиец А.М.**, канд. техн. наук

**Інститут угольних енерготехнологій НАН України, Київ**

ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: ceti@i.kiev.ua

## Модернізація соплового блоку котла ТП-10 для уменшення вибросов оксидов азота

Представлены основные результаты численного исследования процесса горения газового угля в топке котельного агрегата ТП-10. Показано, что последовательность вертикального размещения горелок и регистров вторичного воздуха в сопловом блоке влияет на образование оксидов азота. Расчеты выявили зависимость эмиссии  $\text{NO}_x$  от направления подачи вторичного воздуха и перераспределения его расхода между регистрами разных ярусов. На основе проведенного анализа работы котлоагрегата предложена малозатратная модернизация соплового блока. Новая конструкция соплового блока, а также соответствующие направление и режим подачи вторичного воздуха позволят почти на четверть снизить эмиссию оксидов азота в топке котельного агрегата. *Библ. 6, рис. 4, табл. 3.*

**Ключевые слова:** котлоагрегат, горелка, воздушный регистр, оксиды азота.

**Volchyn I.A.**, Candidate of Technical Science,  
**Kolomiets A.M.**, Candidate of Technical Science

**Coal Energy Technology Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kiev**

19, Andriyvska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: ceti@i.kiev.ua

## Modernization of the Nozzle Block for the Boiler TP-10 to Reduce Emissions of Nitrogen Oxides

The paper presents the main results of numerical investigation of the process of burning gas coal in the furnace of boiler TP-10. It is shown that a sequence of vertical arrangement of burners and registers of secondary air in the nozzle block affects the formation of nitrogen oxides. Calculations revealed the dependence of  $\text{NO}_x$  emission from the direction of the secondary air and from redistribution its consumption between the registers of different layers. On the basis of the analysis of the boiler operation is offered low-expensive modernization of the nozzle unit. New design of the nozzle unit as well as the appropriate direction and mode of secondary air will allow to lower almost a quarter of the emissions of nitrogen oxides in the furnace of boiler unit. *Bibl. 6, Fig. 4, Table 3.*

**Key words:** boiler, burner, air register, nitrogen oxides.

### References

1. Vol'chyn I.A., Dunaevs'ka N.I., Gaponich L.S., Chernjavs'kij M.V., Topal O.I., Zasad'ko Ya.I. Prospects for the Introduction of Clean Coal Technologies in Power Engineering of Ukraine. Kiev : GNOZIS, 2013, 308 p. (Ukr.)
2. Alehnovich A.N., Bogomolov V.V. Construction of Furnace and Burners to Reduce Nitrogen Oxides and Slagging, Burning Low-reactive Coals (Review). *V nauchno-prakticheskaja konferencija «Mineral'naja chast' topliva, shlakovanie, ochildka kotlov, ulavlivanie i ispol'zovanie zoly»*, Chelyabinsk, June 7–9, 2011, Chelyabinsk, 2011, pp. 72–89. (Rus.)
3. Glarborg P., Jensen A.D., Johnsson J.E. Fuel Nitrogen Conversion in Solid Fuel Fired Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003, 29, (2), pp. 89–113.
4. Thermal Computation of Boiler Units (normative method) / Ed. N.V. Kuznecova, Moscow : Energija, 1973. 296 p. (Rus.)
5. Thermal and Nuclear Power Plants. Ed. V.A. Grigor'eva and V.M. Zorina. Moscow : Energoizdat, 1982, 624 p. (Rus.)
6. Kouzov P.A. Principles of Analysis of the Disperse Composition for Industrial Dusts and Particulate Materials. Leningrad : Himija, 1987, 264 p. (Rus.)

Received February 26, 2014