

УДК 662.62.004.3

В.П. ЯЦЕНКО, канд. техн. наук (Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ)

АНАЛІЗ ШЛАКУЮЧИХ І ЗАБРУДНЮЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА ТА ЙОГО СУМІШЕЙ

Проаналізовано методи оцінки шлакуючих і забруднюючих властивостей вугільного палива. Розроблено комп'ютерну програму для розрахунків показників схильності вугілля до шлакування і забруднення поверхонь нагрівання при спалюванні його в топках котлів. Виконано розрахунки цих показників для індивідуальних палив та їх сумішей. Отримані дані дозволяють обрати оптимальні склади сумішей.

При спалюванні вугілля в топках котлів теплових електростанцій (ТЕС) має місце відкладення частинок золи на поверхнях нагрівання і стінках топков. Відкладення призводять до шлакування поверхонь (екрани, ширмові та конвективні пароперегрівачі) або їх забруднення (хвостові поверхні котла). Накопичений на ТЕС багаторічний досвід дозволяє забезпечити довгострокову роботу котлів без шлакування поверхонь при спалюванні проектних палив. Але при постачанні на електростанції непроектного палива або при використанні ними вугільних сумішей можуть виникнути проблеми, пов'язані зі шлакуванням і забрудненням поверхонь. Для прогнозування цих негативних явищ потрібні відповідні аналітичні чи емпіричні моделі.

Процес утворення відкладень умовно можна поділити на два етапи. На першому частинки золи рухаються до теплообмінних поверхонь (ТП). Траєкторії руху зумовлюються аеродинамічними і теплофізичними характеристиками двофазового середовища в топці та газоходах котла, розмірами частинок, їх густиною тощо. Деякі аспекти моделювання руху частинок при обтіканні двофазовим потоком циліндричної теплообмінної поверхні наведено в [1].

На другому етапі частинки взаємодіють з поверхнями, фіксуються на них, утворюючи шар відкладень, або відбиваються в потік димових газів. Для моделювання фіксації та еволюції шару відкладень потрібна інформація про шлакуючі та забруднюючі властивості вихідного вугілля. Ця інформація може бути отримана з використанням відомих критеріїв, які розраховуються за даними про технічні характеристики палива та хімічний склад (вміст оксидів) його мінеральної частини.

В літературі [2-5] наводяться результати досліджень зазначених властивостей вугілля і пошуку методів їх числової оцінки. Зокрема, в УралВТІ [2] вивчено зразки вугілля багатьох родовищ Росії та деяких родовищ КНР. У дослідях визначався компонентний склад палива, вимі-

рювались температури початку шлакування $T_{шл}$ і коефіцієнти осадження частинок на теплообмінну поверхню. Встановлено, що величину $T_{шл}$ можна апроксимувати лінійною залежністю $T_{шл} = f(k_o)$, де k_o відношення суми кислих до суми основних (лужних) компонентів золи, $k_o = S_k/S_l$, $S_k = SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3$, $S_l = CaO + MgO + K_2O + Na_2O$. При обчисленні S_l в [2], на відміну від традиційних розрахунків цієї величини, не враховується вміст у золі оксиду заліза.

Зазначимо, що одного показника k_o недостатньо для оцінки ймовірності шлакування і забруднення ТП. У роботі [3] запропоновано показники схильності вугілля до утворення сульфатно-кальцієвих та залізистих відкладень, а також забруднень на базі активних лугів.

Аналіз результатів [2-5] та інших робіт показав, що найбільше поширення отримали три показники: індекс забруднюючих властивостей $I_{зв}$, показник шлакування $I_{ш}$, схильність вугілля до забруднення I_3 . Оберемо їх для подальшого аналізу. Наведемо вирази, за якими вони знаходяться:

– індекс оцінки забруднюючих властивостей (критерій Аттіга – Дьюзі [5])

$$I_{зв} = Na_2O(Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O) / (SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3); \quad (1)$$

– показник шлакування

$$I_{ш} = 0,707 \left\{ \left[1 - \frac{0,025(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)}{(CaO + MgO + K_2O + Na_2O)} \right]^2 + \left(1 - \frac{8 \cdot 10^{-3} A^d}{S^d} \right)^2 \right\}^{0,5}; \quad (2)$$

– схильність вугілля до забруднення

$$I_3 = I_{зв}(1 + K_2O/Na_2O). \quad (3)$$

Що більшою є кожна з величин (1)-(3), то

більшою є ймовірність шлакування і забруднення поверхонь.

Ці показники розраховано нами для золи вугілля двох вугільних басейнів України – Донецького та Львівсько-Волинського. Вони порівнювались з аналогічними величинами для палива Бородінського розрізу (Росія). Необхідні характеристики вугілля цих басейнів брались згідно з [6], а Бородінського з [7]. Для проведення розрахунків у середовищі Microsoft Excel було створено базу даних, до якої заносились виробничі об'єднання і підприємства, що випускають вугілля, його види, вміст у ньому золи і сірки та хімічний склад золи. За цими даними обраховувались показники $I_{зв}$, I_3 , $I_{ш}$, які також заносились до бази.

Як приклад, у таблиці 1 наведено деякі дані з цієї бази, з яких випливає, що шлакуючі властивості антрацитового штибу і шлаків є незначними ($I_{ш} < 0,9$). Вугілля Львівсько-Волинського басейну з підвищеним вмістом у ньому сірки більше схильне до шлакування. Можна прогнозувати, що при спалюванні його в топках ТЕС інтенсивність утворення відкладень на екранних поверхнях котла збільшиться. Індекс оцінки забруднюючих властивостей $I_{зв}$ для цього вугілля в наведеному прикладі менший від критичного $I_{зв}^*$, величина якого згідно з літературними даними має значення $I_{зв}^* \approx 0,6$. Для АШ і шлаків величина $I_{зв}$ у середньому більша за $I_{зв}^*$. Тому можна при-

пустити посилення забруднення конвективних поверхонь нагріву при їх використанні порівняно з вугіллям Львівсько-Волинського басейну. Слід зазначити, що показники забруднення і шлакування для вугілля обох басейнів у середньому вищі за аналогічні величини для палива Бородінського розрізу.

Аналіз даних таблиці 1 і бази в цілому показує, що між вмістом окремих елементів у золі і величинами $I_{зв}$, I_3 , $I_{ш}$ існує певний зв'язок. Наприклад, для АШ і шлаків у більшості випадків при зменшенні у золі вмісту оксиду алюмінію значення $I_{ш}$ підвищуються. За наявності подібного зв'язку для будь-якого палива можливо було б прогнозувати його шлакуючі та забруднюючі властивості за вмістом лише одного елемента. Для дослідження подібного припущення обчислювались коефіцієнти кореляцій K між показниками шлакування і забруднення та вмістом окремих оксидів у золі. Результати розрахунків наведено в таблиці 2 (стор. 98). Аналіз наведених даних показує, що найбільш тісний обернений зв'язок має місце між $I_{зв}$, I_3 , $I_{ш}$ і вмістом у золі оксиду кремнію. Вагомі значення величини K отримано також для деяких інших складових золи (Al_2O_3 , Fe_2O_3), але різного знаку для вугілля різних родовищ. Таким чином, при збільшенні вмісту SiO_2 у золі твердого палива його схильність до шлакування і забруднення зменшується. За ін-

Таблиця 1. Характеристики вугілля

| № п/п | Виробниче об'єднання | Підприємство | Марка, клас | A^d , % | S^d , % | Хімічний склад золи на безсульфатну масу, % | | | | | | | | | Показники | | | |
|-------|-------------------------------|------------------------|-------------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|-----|------|--------|---------|---------|----------|-----------|-------|-------|-------|
| | | | | | | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | CaO | MgO | K_2O | Na_2O | TiO_2 | $I_{зв}$ | $I_{ш}$ | I_3 | | |
| 1 | Донбасантрацит | ш. "Хрустальська" | АРШ | 42 | 2 | 54,3 | 26,7 | 9,6 | 1,2 | 1,1 | 4,6 | 1,2 | 1,2 | 0,258 | 0,774 | 1,249 | | |
| 2 | Свердловантрацит | ЗФ "Маяк" | АШ | 30,0 | 1,8 | 52,4 | 24,8 | 12,0 | 2,4 | 1,0 | 4,0 | 2,5 | 0,8 | 0,702 | 0,835 | 1,825 | | |
| 3 | Торезантрацит | ш. "№3 біс" | АРШ | 33,0 | 0,8 | 50,0 | 33,0 | 6,0 | 2,0 | 1,0 | 3,0 | 4,0 | 1,0 | 0,762 | 0,732 | 1,333 | | |
| 4 | Ровенькиантрацит | ш. "Київська" | АРШ | 33,5 | 1,9 | 43,3 | 14,3 | 32,6 | 4,3 | 1,7 | 2,7 | 1,1 | 0,6 | 0,801 | 0,855 | 2,768 | | |
| 5 | Свердловантрацит | ш. "№ 69" | АРШ | 29,0 | 1,2 | 49,0 | 27,3 | 11,5 | 4,3 | 1,9 | 2,5 | 2,8 | 0,7 | 0,836 | 0,820 | 1,583 | | |
| 6 | Донбасантрацит | ГЗФ | А, шлак | 48,4 | 1,1 | 55,6 | 26,7 | 3,5 | 2,0 | 1,1 | 4,9 | 4,9 | 1,2 | 0,962 | 0,742 | 1,925 | | |
| 7 | ДХК "Львіввугілля" | ш. "Червоноградська" | Ж | 26,6 | 3,7 | 34 | 17,2 | 28,9 | 0,8 | 14,9 | 2,2 | 1 | 1 | 0,923 | 0,938 | 1,846 | | |
| 8 | ДХК "Львіввугілля" | ш. "Межирічанська" | Ж | 35,0 | 3,3 | 44 | 23 | 19 | 0,9 | 8 | 2 | 2,5 | 0,5 | 0,236 | 0,892 | 1,414 | | |
| 9 | ВО "Волиньвугілля" | ш. "Бужанська" | ДГ | 29,1 | 2,5 | 56,5 | 20,7 | 11,1 | 1,1 | 7 | 0,5 | 2,5 | 0,6 | 0,166 | 0,862 | 0,859 | | |
| 10 | ВО "Волиньвугілля" | ш. "№5 Ново-волинська" | ДГ | 31,1 | 3,5 | 40,8 | 22,3 | 22,5 | 0,8 | 11 | 1 | 1,1 | 0,5 | 0,282 | 0,906 | 0,904 | | |
| 11 | ВО "Волиньвугілля" | ш. "№9 Ново-волинська" | ДГ | 31,1 | 2,5 | 49,4 | 26,2 | 13 | 0,9 | 4,8 | 2,2 | 3 | 0,5 | 0,154 | 0,860 | 1,075 | | |
| 12 | Вугілля Бородінського розрізу | | | | | 11,3 | 0,5 | 11,3 | 7,4 | 7,6 | 0,4 | 20,3 | 3,6 | 0,3 | 0,3 | 0,142 | 0,877 | 0,284 |
| 13 | | | | | | 9,7 | 0,3 | 9,7 | 3,3 | 6,1 | 0,1 | 22,3 | 5,4 | 0,2 | 0,2 | 0,104 | 0,847 | 0,208 |
| 14 | | | | | | 12,4 | 0,2 | 12,4 | 2,8 | 7,2 | 0,1 | 16,5 | 3,7 | 0,1 | 0,7 | 0,275 | 0,738 | 0,314 |
| 15 | | | | | | 15,6 | 0,2 | 15,6 | 2,4 | 4,8 | 0,1 | 13,3 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,050 | 0,670 | 0,075 |
| 16 | | | | | | 17,9 | 0,2 | 17,9 | 1,5 | 3,5 | 0,1 | 10,2 | 3,1 | 0,2 | 0,1 | 0,021 | 0,632 | 0,062 |

Таблиця 2. Значення кореляцій

| Масиви, між якими обраховуються кореляції | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O |
|--|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|--------|------------------|-------------------|
| Антрацитовий штиб і шлами Донецького басейну | | | | | | | | |
| $I_{зв}$ | -0,342 | 0,234 | -0,123 | -0,015 | 0,002 | -0,096 | 0,072 | 0,786 |
| I_3 | -0,630 | -0,222 | 0,454 | -0,190 | 0,177 | 0,005 | 0,132 | 0,154 |
| $I_{ш}$ | -0,448 | -0,672 | 0,740 | -0,557 | 0,805 | 0,264 | -0,630 | -0,572 |

шими складовими золи неможливо зробити однозначного висновку щодо шлакуючих і забруднюючих властивостей вугілля.

Оскільки при зменшенні у вугіллі вмісту SiO₂ показники $I_{зв}$, I_3 , $I_{ш}$ зростають, то слід чекати, що при змішуванні (шихтуванні) його з паливом, у мінеральній частині якого двоокису кремнію більше, шлакуючі та забруднюючі властивості суміші зменшаться порівняно з вихідним вугіллем. При шихтуванні високошлакуючого палива П1 (назвемо його основним) з низькошлакуючим П2 (допоміжним) у пропорції $\alpha(1-\alpha)$ утворюється суміш П з технічними характеристиками і хімічним складом золи, які залежать від величини α . На практиці потрібно вибрати таке паливо П2, яке забезпечить при його змішуванні з П1 у певній пропорції α прийнятну за умовами забруднення і шлакування ТП роботу котла.

Розв'язання цієї задачі покажемо на прикладі вугілля Донецького басейну, характеристики якого наведено в таблиці 1. Основними вибирались палива П_N, властивості яких зазначено в рядках 2-6 таблиці. Характеристики допоміжного палива П2 приймалися згідно з даними рядка 1 таблиці 1. Для певності вважалося, що $I_{зв}^* = 0,6$. Задача зводилась до знаходження таких значень α , які забезпечують для сумішей кожного палива П1 = П_N ($N = 2, 6$) з паливом П2 вказану величину α . Ця задача вирішувалась за допомогою процедури "пошук рішення" у середовищі Microsoft Excel за таких обмежень: $(S_k + S_n) = 100$; $S^d > 0$; $A^d > 0$; $G_n > 0$. Тут G_n – вміст n -го оксиду. На відміну від [2] $S_n = CaO + MgO + K_2O + Na_2O + Fe_2O_3$. У таблиці 3 наведено деякі результати розрахунків.

Аналіз цих даних дозволяє зробити наступні висновки. Більшість вугілля П_N у прикладі, що розглядається, можна перевести у прийнятне для спалювання шихтуванням його з паливом П2 при величині $\alpha > 0,5$. На наш погляд, таку величину α слід вважати економічно доцільною, оскільки при $\alpha < 0,5$ для шихтування потрібно більше вугілля П2, яке з огляду на його низькі показники $I_{зв}$, I_3 , $I_{ш}$ є більш цінним. Слід вказати також на неоднозначний зв'язок між забруднюючими і шлакуючими властивостями вихідних палив П1, П2, величиною α та індексами $I_{зв}$, I_3 , $I_{ш}$ для сумішного палива П. Наприклад, при змішуванні допоміжного вугілля з паливом П3, яке має величину $I_{зв} = 0,762$ потрібне значення критерію Аттіга і Дьюзі досягається при $\alpha = 0,648$. Водночас при змішуванні П2 з паливом П4, яке має вищий показник $I_{зв}$, величина $\alpha = 0,692$. Якщо у якості П1 і П2 вибрати вугілля П4 і П6, то при змішуванні їх у пропорції 0,5 : 0,5 величина $I_{зв} = 1,127$, тобто є більшою, ніж аналогічні показники для кожного вихідного палива. Наведені приклади свідчать, що знаходження потрібних складів сумішей є непростю задачею, вирішення якої потребує виконання оптимізаційних розрахунків, які можуть бути виконані з використанням створеної нами бази даних і програми.

Розвиток енергетики в умовах переходу до ринкових відносин потребує залучення до паливного балансу нових джерел паливостачання. Серед таких джерел слід відзначити родовища засоленого вугілля (ЗВ), яке в даний час в енергетиці не використовується. Значні запаси такого палива (близько 10 млрд. т) знаходяться

Таблиця 3. Характеристики сумішей

| № п/п | П _N | α | A^d , % | S^d , % | Хімічний склад золи суміші, % | | | | | | | | Показники | | |
|-------|----------------|----------|-----------|-----------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|------------------|-------------------|------------------|-----------|---------|-------|
| | | | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ | $I_{зв}$ | $I_{ш}$ | I_3 |
| 1 | 2 | 0,803 | 32,4 | 1,8 | 52,8 | 25,2 | 11,5 | 2,2 | 1,0 | 4,1 | 2,2 | 0,9 | 0,600 | 0,824 | 1,701 |
| 2 | 3 | 0,648 | 36,2 | 1,1 | 51,5 | 30,8 | 7,3 | 1,7 | 1,0 | 3,6 | 3,0 | 1,1 | 0,600 | 0,759 | 1,310 |
| 3 | 4 | 0,692 | 36,2 | 1,8 | 46,7 | 18,1 | 25,5 | 3,3 | 1,5 | 3,3 | 1,1 | 0,8 | 0,600 | 0,833 | 2,343 |
| 4 | 5 | 0,649 | 33,6 | 1,4 | 50,9 | 27,1 | 10,8 | 3,2 | 1,6 | 3,2 | 2,2 | 0,9 | 0,600 | 0,806 | 1,468 |
| 5 | 6 | 0,461 | 45,1 | 1,4 | 54,9 | 26,7 | 6,8 | 1,6 | 1,1 | 4,7 | 2,9 | 1,2 | 0,600 | 0,771 | 1,579 |

в Україні в межах Новомосковського, Петриківського і Богданівського родовищ. Згідно з [4] ЗВ характеризується невеликою зольністю ($A^d \approx 20\%$), високою вологістю ($W \approx 25\%$), відносно невеликим вмістом сірки ($S^d \approx 2\%$) та значною кількістю в золи оксиду натрію ($Na_2O \approx 10\%$). Теплота згоряння палива сягає значень $Q^p \approx 16$ МДж /кг.

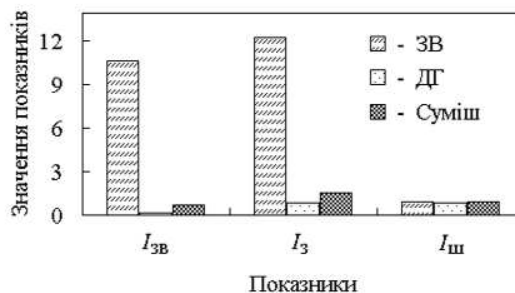
Досвід спалювання ЗВ в енергетичних котлах в Україні відсутній. Оцінки [2, 4] показують, що натрій, який вміщується в солоному вугіллі, буде інтенсивно випаровуватись у топці котла. Конденсація пари на ТП і частинках золи призведе до утворення на них липких плівок, які сприяють зв'язуванню відкладень. У кінцевому підсумку це призведе до посиленого шлакування теплообмінних поверхонь. Для більшості палив Донецького і Львівсько-Волинського басейнів температура початку шлакування $T_{шл} \geq 1273$ К. При спалюванні засоленого вугілля величина $T_{шл}$ на 420–470 К нижча за вказане значення [4]. У зв'язку з цим використання такого палива на існуючих котлах без їх суттєвої модернізації неможливе.

Нами виконано пошук схем шихтування ЗВ з енергетичним паливом інших марок. Таке шихтування, на думку [4], може дозволити залучити це вугілля до паливного балансу. З цією метою до зазначеної вище бази даних внесено характеристики вугілля шахтних полів № 1-3 Новомосковського родовища. Обчислені за цими характеристиками значення показників $I_{зв}$, I_3 , $I_{ш}$ наведено в таблиці 4. Отримані результати свідчать, що засолене вугілля має аномально високі значення $I_{зв}$, I_3 та $I_{ш}$. З такими показниками воно не може спалюватись самостійно у топках котлів традиційними методами, що відповідає результатам досліджень [4].

Розрахунки показників шлакування і забруднення для сумішей ЗВ (П1) з вугіллям Донецького, Львівсько-Волинського та Бородінського родовищ (П2) показали наступне. Прийнятна для спалювання величина $I_{зв}^*$ може бути отримана при шихтуванні ЗВ лише з окремими паливами Донецького чи Львівсько-Волинського вугільних басейнів за низьких значень α ($\alpha \leq 0,2$).

Наприклад, величина $I_{зв} = 0,6$ для суміші ЗВ і ДГ (рядок 9 таблиці 1) досягається за $\alpha = 0,124$ (див. рис.). Дещо більші значення величини α забезпечуються при використанні як П2 вугілля Бородінського розрізу. Таким чином, засолене вугілля в невеликих домішках може спалюватись у топках парових котлів разом з окремими марками як вітчизняного, так і імпортованого палива. Для визначення економічних показників такого спалювання потрібні додаткові дослідження.

Використання на ТЕС непроєктного палива чи сумішей різного вугілля вимагатиме виконання додаткових організаційних і реконструкційних робіт. У роботі [8] наведено рекомендації для врахування впливу деяких теплотехнічних характеристик непроєктного палива на роботу ТЕС у цілому та окремих вузлів і систем обладнання. Насамперед необхідно з'ясувати можливості ТЕС стосовно приймання і збереження нової марки палива.



Результати розрахунків показників забруднення і шлакування.

Системи пилоприготування повинні забезпечити необхідну кількість вугільного пилу потрібної дисперсності та вологості W . За високих вихідних значень W змінюються сипкі властивості вугілля, ускладнюються його завантаження в бункери та млини. Значне зменшення W потребує перевірки і дотримання спеціальних заходів для забезпечення вибухобезпечності систем пилоприготування.

Заміна проектного палива на непроєктне, що має більшу зольність A^d , може призвести до посиленого зношування систем транспорту вугілля і обладнання для його подрібнення та помелу.

Таблиця 4. Характеристики засоленого вугілля

| Марка, клас | S^d , % | A^d , % | Хімічний склад золи, % | | | | | | | | | Індекси шлакування і забруднення | | |
|-------------|-----------|-----------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----|-----|------------------|-------------------|----------|----------------------------------|---------|--|
| | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | $I_{зв}$ | I_3 | $I_{ш}$ | |
| ЗВ | 2,2 | 20 | 28 | 20 | 22 | 0,5 | 15 | 3 | 1,5 | 10 | 10,619 | 12,211 | 0,943 | |

Найбільше зношуються мелючі тіла і захисна броня в млинах, пилопроводи, особливо на їх поворотних ділянках [9]. Зазначимо, що ці та інші особливості також можуть бути враховані в розробленій базі даних і використані при виборі оптимальних складів вугільних сумішей.

1. Яценко В.П. Прогнозування ерозійного зношування теплообмінних поверхонь котельного устаткування // Проблеми загальної енергетики. – 2006. – №13. – С. 81-85.
2. Алехнович А.Н., Артемьева Н.В., Богомолов В.В., Родионов В.А. Результаты исследований шлакующих свойств углей на огневом стенде УралВТИ // Электрические станции. – 2002. – №4. – С. 91-98.
3. Алехнович А.Н., Богомолов В.В., Гладков В.Е., Артемьева Н.В. Шлакование и образование отложений в газовом тракте котла // Теплоэнергетика. – 1997. – №3. – С. 64-68.
4. Дик Э.П. и др. Оценка шлакующих свойств новомосковского угля Западного Донбасса // Теплоэнергетика. – 1989. – №1. – С. 15-18.
5. Attig R.G., Duzy P.C. Coal ash deposition studies and application to boiler design // Proc. Amer. Power Conf., Chicago, Ill, 1969. – Vol. 31. – P. 290-295.
6. Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ). Справочник / В.С. Вдовченко, М.И. Мартынова, Н.В. Новицкий, Г.Д. Юшина. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 184 с.
7. Пронин М.С., Бруер Г.Г., Бычков А.М., Кириллов М.А. Использование березовских углей Канско-Ачинского бассейна для сжигания в мощных парогенераторах ТЭС // Электрические станции. – 2003. – №2. – С. 6-10.
8. Векслер Ф.М., Говсиевич Е.Р., Алешинский Р.Е. Влияние изменений основных показателей непроектных углей на работу узлов и агрегатов пылеугольных тепловых электростанций // Электрические станции. – 2003. – №4. – С. 36-41.
1. Anagnostopoulos J., Bergeles G. Numerical Investigation of the Grinding Process in a Beater Wheel Mill With Classifier // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1997. – Vol. 119. – P. 723-733.