

**Грیشин М.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

**Беглов К.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБАГАЧЕННЯ ПАЛИВА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКУ ВИТРАТ ТЕС

*Використання вугілля на ТЕС для видобутку електроенергії є ключовим джерелом вуглецю за відносно низькою ціною, але використання вугілля викликає низку проблем під час згоряння палива. Основною проблемою є коливання складу вугілля, що йде на горіння. Від різних поставників вугілля відбуваються значні коливання складу палива. Таким чином, від несумлінних поставників, котрі заявляють невеликий показник зольності, на ТЕС може приїхати відверто погане паливо.*

*Дослідження зі спалювання вугілля в котельних установках проводиться дуже давно. У певних дослідженнях є свідчення про шкідливий вплив зольності палива на обладнання топки. Проте ті котли, що експлуатуються, уже розраховані на спалювання зольного палива, причому вважається, що склад палива не змінюється, і запропоновано мало рішень проблеми розходження якості під час закупівлі та якості після поставки.*

*У сучасних енергетичних підприємствах необхідно запровадити надійну схему адаптації до зміни якості палива, бо умовний пріоритет дослідження полягає у тому, що енергоблок неможливо зупини на ремонт раніше необхідного строку.*

*У статті розглянуто вирішення транспортного завдання для групи котлів. Використано математичну модель спалювання неякісного вугільного палива, запропоновано ідею інтеграції технології збагачення палива прямо на території ТЕС і можливість її запустити за необхідністю.*

*Цільова функція висловлюється в сумі дійсних витрат і потенційних витрат з урахуванням дисконтування і спрямована на мінімізацію витрат. Додатково включаються витрати на збагачення палива без урахування витрат на придбання обладнання.*

**Ключові слова:** керування, група котлів, збагачення, нелінійна модель, оптимізація, транспортне завдання, параметрична модель.

**Постановка проблеми.** Сьогодні ведуться дослідження з використання шкідливого впливу вугільного палива на обладнання енергоблоку. Зокрема, розглядаються питання впливу абразивного матеріалу на пошкодження трубок котла. Використання зольного палива викликає низку проблем під час експлуатації. Основною такою проблемою можна вважати значні коливання потужності ТЕС через малу частку вуглецю в паливі та шкідливий вплив на трубки ТЕС під час осадження протягом згоряння палива. Це викликає значні витрати на докупку палива через те, що недостатньо палива для підтримання потужності енергоблоку, також додаткові витрати на ремонт та заміну обладнання ТЕС [1, с. 34–46, 91–120].

За спроб оцінки витрат щодо ремонту та заміни обладнання ТЕС доводиться відмовлятися від неякісного палива, яке є необхідним за умов, коли немає альтернативи і не можна зупинити роботу енергоблоку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Уже певний час існує проблема абразивного пошкодження труб ТЕС під час згоряння вискозольного вугілля в топці електростанції.

У роботах [1, с. 34–46, 91–120] та [4, с. 8–17] дуже добре розглянуто й описано наслідки впливу й як вони виражаються в грошових витратах на ТЕС через необхідність постійного ремонту або заміни обладнання.

У роботах [5, с. 38–75; 7, с. 3–6] розглядаються питання впливу на навколишнє середовище, витрати підприємства з питань екології.

За допомогою досліджень [6, с. 22–35; 8, с. 87–95] стало можливим розрахувати час експлуатації обладнання за подібного складу палива й темпу його згоряння.

У роботі [3, с. 39–45] досліджується можливість збагачення палива для побудови фабрик зі збагачення палива і його подальшого продажу електростанціям

**Постановка завдання.** Однак поки що ніде не розглядалася ідея побудови установки зі збагачення прямо на ТЕС та не розраховувалася схема поставки палива на підприємство за допомогою транспортної задачі, цільова функція котрої буде виражатися у сумі витрат (річні витрати поділені для денного застосування) та спрямована на мінімізацію.

**Виклад основного матеріалу.**

**1. Постановка цільової функції**

Задамо цільову функцію витрат ТЕС:

$$Z = 365 \text{ днів} \cdot B \cdot (x + l \cdot S); \rightarrow \min; \quad (1)$$

де  $B$  – щоденний витрата палива станцією  $[т/день]$ ;

$$B = \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p}; \quad (2)$$

де  $Q_n^p$  – найнижча теплота згоряння на кг речовини  $[\frac{МДж}{кг} \text{ або } \frac{ккал}{кг}]$ ;  $\eta_{ТЕС}$  – загальний ККД ТЕС, що в принципі розраховується за формулою,  $N$  – потужність станції,  $x$  – змінна, що позначає вартість палива за тону (у.о./т),  $l$  – тариф перевезення на тону вантажу і кілометр відстані;  $S$  – відстань до пункту доставки (км).

ККД візьмемо за умови повного згоряння палива [2] ISO 1988-75, оскільки ми розглядаємо як приклад палива вугілля, яке крім основних компонентів містить різні негорючі золоутворюючі добавки, або, як їх ще називають, «породу». Зола забруднює навколишнє середовище і спікається в шлак на колосниках, що ускладнює горіння вугілля. До того ж золоутворюючі добавки зменшують питому теплоту згоряння вугілля, тому чим менше «породи» у вугіллі, тим краще. Залежно від сорту й умов видобутку вугілля кількість мінеральних речовин у ньому дуже сильно розрізняється. Так, наприклад, зольність кам'яного вугілля становить 14–35%, антрациту – 5–20%.

Поки що розглянемо, наскільки сильно змінюється обсяг палива, необхідний для електростанції, у силу збільшення показника зольності. Так, наприклад, якщо маємо (1), уявімо нову формулу знаходження денної потреби ТЕС у вигляді:

$$B^* = \frac{B}{(1 - A^d)}, \quad (3)$$

де  $B^*$  – це добова потреба ТЕС у вугіллі з урахуванням зольності (обсяги необхідної поставки з урахуванням зольності), показник зольності  $A^d$ . Так, із (3) випливає:

$$B^* = \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p \cdot (1 - A^d)}; \quad (4)$$

Візьмемо і наведемо (1) для денної формули

$$Z = \left( \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p \cdot (1 - A^d)} \right) \cdot (x + l \cdot S) \rightarrow \min; \quad (5)$$

де – це встановлена потужність ТЕС  $[МВт = \frac{МДж}{с}]$ ,  $\eta_{ТЕС}$  – ККД ТЕС (%),  $Q_n^p$  – нижча (питома) теплота згоряння  $[\frac{МДж}{кг}]$ ,  $k$  – показник зольності (%),  $S$  – відстань від постачальника до ТЕС (км),  $l$  – залізничний тариф  $[\frac{грн}{т \cdot км} = \frac{грн}{1000кг \cdot км}]$  і  $x$  – змінна описує вартість вугілля  $[\frac{грн}{т} = \frac{грн}{1000кг}]$ .

**2. Додаткові витрати, викликані зносом обладнання ТЕС**

Сутність абразивного зносу полягає у тому, що великі частки золи, що володіють достатньою твердістю і гостротою граней, під час ударів об стінку труби безперервно зрізають із поверхні мікроскопічно малі шари металу, поступово зменшуючи у цьому місці товщину стінки труби. Частки незгорілого палива (частіше у антрациту) також викликають стирання поверхні.

Абразивність вугілля призводить до зносу систем пилоприготування, а абразивність золи – до зносу конвективних поверхонь нагріву котла. Тому річні витрати на ремонт основного і допоміжного котельного обладнання (з урахуванням абразивності вугілля і золи) включають у себе витрати, пов'язані з витратами на ремонт систем пилоприготування і ремонт конвективних поверхонь нагріву котла – **водяного економайзера (ВЕК) і повітропідігрівача (ВЗП).**

Загальні річні витрати ТЕС за умови регулярної заміни обладнання становлять:

$$Z^{ТЕС} = \frac{U_{рем.облад.} + U_{рем.золауз.} + U_{золовизал.} + U_{рем.золовизал.} + U_{зберіг.}}{365} \quad (6)$$

У цілому ці витрати будуть не змінні за винятком витрат на ремонт обладнання паропідігрівача, топкових екранів і фестону (детальніше формулу можна знайти в роботі М.В. Гриценко [1, с. 34–46, 91–120]).

Застосуємо ці витрати до нашої цільової функції:

$$Z = \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p \cdot (1 - A^d)} \cdot (x + l \cdot S) + N_{флотат.} + Z^{ТЕС} \rightarrow \min \quad (7)$$

Уточнимо поняття часу експлуатації у разі абразивного пошкодження обладнання внаслідок спалювання палива. Візьмемо формулу з методичних вказівок І.В. Путілової [4, с. 8–17]:

$$T = \frac{(\delta_{ст} - \delta_{ост})}{(3,6 \cdot \delta_{уд.ж} \cdot G_M)}, \text{ годин} \quad (8)$$

Оригінальна формула враховує кількість поворотів труб навколо своєї осі, проте наявність поворотів збільшує час експлуатації. Розглянемо максимально песимістичний сценарій горизонтального розташування труб без поворо-

тів навколо своєї осі всередині котла згоряння, де  $\delta_{ст}$  – товщина стінки трубопроводу, мм;  $\delta_{ост}$  – нормативна мінімальна товщина стінки трубопроводу, мм;  $\delta_{yд,h}$  – питома лінійний абразивний знос трубопроводу, мм/т абразиву в потоці палива, що спалюється;  $G_M$  – масова витрата матеріалу, кг/с;  $n_{пов}$  – число, що дорівнює кількості поворотів труб навколо своєї осі.

Розрахунок величини питомої лінійного абразивного зносу трубопроводів пневмотранспортних установок систем пилоприготування і золошлаковидалення ТЕС  $\delta_{yд,h}$  виконується для горизонтальних і похилих ділянок за залежністю:

$$\delta_{yд,h} = \frac{5,55 \cdot 10^{-7} \cdot K_{II} \cdot U_m^2 \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн}}, \text{ мм / т}, \quad (9)$$

а для вертикальних ділянок за залежністю:

$$\delta_{yд,h} = \frac{1,39 \cdot 10^{-7} \cdot K_{II} \cdot U_m^2 \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изн}}, \text{ мм / т}, \quad (10)$$

де  $k_{SiO_2}$  – коефіцієнт відносного вмісту  $SiO_2$  в матеріалі, що транспортується;  $K_{II} = \frac{\rho_s \cdot d_0}{6}$  – критерій аеродинамічної легкості частинок під час пневмотранспортування дрібнодисперсних сипучих матеріалів, кг/м<sup>2</sup>/2/ ( $\rho_s$  – густина матеріалу, що транспортується, кг/м<sup>3</sup>;  $d_0$  – середньозважений еквівалентний діаметр частинок матеріалу, м);  $U_m$  – середня по перетину швидкість потоку частинок матеріалу;  $D$  – внутрішній діаметр трубопроводу, м;  $m$  – масова видаткова концентрація потоку суміші матеріалу і повітря, кг матеріалу / кг повітря;  $k_{изн}$  – коефіцієнт відносної зносостійкості матеріалу трубопроводу.  $k_{изн}$  визначається за залежністю  $HV$  (твердість матеріалу стінки трубопроводу по Віккерсу):

$$k_{изн} = 6,42 \cdot 10^{-5} \cdot HV^2 - 0,0157 \cdot HV + 1,97 \quad (11)$$

Тепер визначимо коефіцієнт відносного вмісту  $SiO_2$  в матеріалі, що транспортується:

$$k_{SiO_2} = \frac{n_{SiO_2}}{\% \text{ вміст } SiO_2 \text{ в кварцовому піску}} = \frac{n_{SiO_2}}{94\%}, \quad (12)$$

де  $n_{SiO_2}$  – % вмісту кварцу в матеріалі, що транспортується:

$$n_{SiO_2} = A^d - n_{пр.мин.}, \quad (13)$$

де  $n_{пр.мин.}$  – % вміст інших мінералів золи в матеріалі, що транспортується.

Отже, і витрати ТЕС теж будуть залежною від цього показника функцією.

$$Z_{ТЕС} = Z(T(n_{SiO_2})) \quad (14)$$

$$Z = N_{збагач}(A^d) + L_{лосіст}(V_{закун}) + Z_{ТЕС}(T_{облад}); \quad (15)$$

Ефективність роботи золоуловителів характеризується такими показниками:

$$h = (G_{вх} - G_{вых}) / G_{вх} = (c_{вх} - c_{вых}) / c_{вх},$$

де  $h$  – ступінь уловлювання золи в золоуловлювачів;  $G_{вх}$ ,  $G_{вых}$  – кількість золи на вході і на виході із золоуловителя в одиницю часу;  $c_{вх}$ ,  $c_{вых}$  – концентрація золи на вході і на виході із золоуловителя. Більш детально розписано в Інформаційному збірнику за редакцією В.Я. Путилова [5, с. 38–75].

Для підрахунку об'ємної витрати газу внаслідок реакції уявімо хімічну формулу вугілля і повітря у вигляді повітряно-вугільної суміші у вигляді  $z_1 C + z_2 SiO_2 + z_3 (Fe_2O_3 + CaSiO_3)$  – вугільне паливо, де  $z_2 + 2 \cdot z_3 = A^d$ , а  $z_2 = n_{SiO_2}$ , тоді як у реакції прийматимуть участь вуглець і кисень (для спрощеної формули повітря використовуємо співвідношення 20%/80% кисень/азот).

### 3. Збагачення палива

Розглянемо варіант збагачення вугілля за допомогою збагачувальної фабрики.

Візьмемо для прикладу якусь збагачувальну фабрику (за прототип візьмемо проекти НПП «Гравікон», які надають різні варіанти зі збагачення вугілля). Прорахуємо вартість і втрату корисної вуглецевої маси під час збагачення палива, якщо фабрика використовує механічну флотаційну машину МФУ-25 [3, с. 39–45].

Згідно з технічними характеристиками, маємо такі параметри:

Вихід концентрату, %	87,6
Потужність електродвигуна приводу аератора, кВт, не більше	37
Продуктивність по твердому продукту, т • год <sup>-1</sup>	85,8

У процесі збагачення сировина поділяється на продукти збагачення з максимальним змістом корисної копалини (концентрат) і максимальним змістом зольних домішок (так звані «хвости»). Вихід концентрату, згідно з технічними характеристиками обладнання, становить  $I_{конц} = 87,6\%$  (отже, вихід хвостів – 12,4%).

Витяг цінних компонентів у концентрат під час збагачення корисних копалин становить від 60% до 95% і вище. Візьмемо для прикладу витяг  $\varepsilon_{витяг.вугл.} = 95\%$  і порахуємо масу концентрату, масу хвоста й їхні показники зольності на 100т вугілля за показника зольності 30%.

$$\varepsilon_{витяг.вугл.} = \frac{M_{концентрату} \cdot I_{збагач}}{M_{вугл.}}$$

де  $M_{концентрату} = I_{конц} \cdot M$  – вихід концентрату,  $\varepsilon_{витяг.вугл.}$  – витяг цінних компонентів,  $M_{вугл.} = M \cdot (1 - A^d)$ ; – зміст корисних копалин у первісному обсязі,  $I_{збагач}$  – зміст корисних копалин у концентраті.

$$A_r^d = \begin{cases} A_r^d > A_{допуст}^d : r = r + 1 \\ 1 - \left( \frac{(1 - A_n^d) \cdot \varepsilon_{випяг.вугл}}{I_{конц.}} \right); n = \overline{1, r} \end{cases}; \quad (16)$$

$$A_r^d \rightarrow 0; M_{збагач} = M \cdot (I_{конц})^r$$

$$V_{закуп} = \begin{cases} \frac{B_{ТЕС}}{(I_{конц})^n}; n = \overline{1, r} \text{ при } A_r^d > A_{допуст}^d : r = r + 1 \\ B_{ТЕС}; \text{ при } A_r^d = A_{допуст}^d \end{cases}; \quad (17)$$

**4. Включення витрат на збагачення палива ТЕС до цільової функції**

Ускладнимо нашу цільову функцію і транспортну задачу.

Закупівля вугілля залежить від процедури очищення і може здійснюватися в такий спосіб:

цільова функція буде мати вигляд:

$$Z = \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p \cdot (I_{конц})^r} \cdot (x + l \cdot S) + N_{флотаци.} \cdot \sum_{m=0}^r \left[ \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p \cdot (I_{конц})^m \cdot M_{пропуск.}} \right] \cdot 24 \cdot t_{эл.} \rightarrow \min, \quad (18)$$

де  $r$  – кількість очисток. Отже, витрати із закупівлі і доставки становитимуть:

$M_{пропуск}$  – пропускна здатність флотаційної машини. Вартість отримуємо у такий спосіб.

$N_{флотаци.}$  – потужність машини,  $t_{эл.}$  – тариф за кВт\*г.

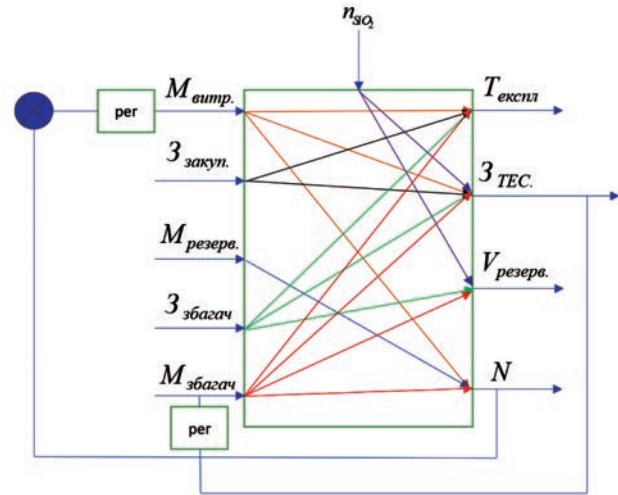
Досліджуємо, як змінюється динаміка закупівлі вугілля за підвищення зольності і подальшого очищення.

$A^d$	$d_{МФУ}$	$A_{МФУ}^d$	$k_{МФУ}$	$M_{МФУ}$	$Q_{МФУ}$	$B_{МФУ}$	$K_{МФУ}$	$P_{МФУ}$
15	87,60	7,80	1	3'558,60	2'160	4'637,36	3	3'749,76
20	87,60	13,24	1	3'558,60	2'160	4'637,36	3	3'749,76
25	76,74	11,79	2	3'117,33	4'320	5'293,79	6	7'499,52
30	67,22	10,72	3	2'730,70	7'920	6'043,34	11	13'749,12
35	58,89	10,09	4	2'392,17	7'200	6'898,57	10	12'499,20
40	51,58	10	5	2'095,54	8'640	7'875,07	12	14'999,04
45	45,19	10,53	6	1'835,69	10'080	8'989,81	14	17'498,88
50	39,58	11,79	7	1'608,07	7'920	10'262,34	11	13'749,12
55	34,68	13,91	8	1'408,67	12'240	11'715	17	21'248,64
60	26,61	10	10	1'080,98	13'680	15'266,31	19	23'748,48
65	20,42	7,38	12	829,52	15'120	19'894,17	21	26'248,32
70	17,89	13,91	13	726,66	15'840	22'710,25	22	27'498,24
75	12,02	8,49	16	488,47	18'000	33'783,88	25	31'248
80	9,23	13,90	18	374,84	19'440	44'025,20	27	33'747,84

Де  $A^d$  – зольність, %;  $d_{МФУ}$  – частка від початкової маси палива після збагачення палива, %;  $A_{МФУ}^d$  – зольність після збагачення, %;  $k_{МФУ}$  – кількість ітерацій збагачення;  $M_{МФУ}$  – фінальна маса палива після збагачення, т;  $Q_{МФУ}$  – кількість енергії, що споживається для збагачення палива,

кВт\*г;  $B_{МФУ}$  – потрібно закупити із розрахунком утрати частки палива під час збагачення, т;  $K_{МФУ}$  – кількість МФУ-25 за умови цілодобової роботи;  $P_{МФУ}$  – вартість використаної електроенергії, грн.

**5. Параметрична схема й опис залежностей у вугільному котлі**



Ми можемо описати залежності, що вказані раніше.

Система з чотирьох рівнянь.

$$\begin{cases} T_{експл.} = -M_{випр} \cdot k_1 - n_{SiO_2} \cdot k_2 - Z_{закуп.} \cdot k_3 + Z_{збагач.} \cdot k_4 + M_{збагач.} \cdot k_5 \\ Z_{ТЕС.} = M_{випр} \cdot t_1 + n_{SiO_2} \cdot t_2 + Z_{закуп.} \cdot t_3 - Z_{збагач.} \cdot t_4 - M_{збагач.} \cdot t_5 \\ V_{резерв.} = Z_{збагач.} \cdot l_1 + M_{збагач.} \cdot l_2 - M_{резерв.} \cdot l_3 \\ N = M_{випр} \cdot j_1 + M_{збагач.} \cdot j_2 \end{cases}$$

де  $k_n, t_n, l_m, j_m$  – коефіцієнти;  $n = \overline{1,5}; m = \overline{1,3}$

$M_{расх.}$  – витрати палива;

$M_{обогащ.}$  – витрати збагаченого палива;

$M_{резерв.}$  – витрати резервного палива

$Z_{закуп.}$  – вартість закупівлі палива;

$Z_{обогащ.}$  – витрати на збагачення палива;

$T_{експл.}$  – час експлуатації до заміни спорядження;

$Z_{ТЕС.}$  – витрати ТЕС на ремонт;

$V_{резерв.}$  – об'єм палива на резервному складі;

$N$  – потужність станції

**6. Приклади**

**6.1. Транспортна задача**

Візьмемо для побудови завдання три приклади ТЕС:  $A_1, A_2$  і  $A_3$ , які наведені по прототипам Запорізької ТЕС, Вуглегірської ТЕС і Бурштинської ТЕС. Усі ці ТЕС працюють на вугіллі (розглянемо для прикладу поки ситуацію, що поставляються і споживані марки вугілля підходять для даних ТЕС). Оскільки питома теплота згоряння кам'яного вугілля приблизно 31 МДж/кг, матимемо такі результати за потреби:

ТЕС	Встановлена електрична потужність, МВт (МДж/с)	Споживання вугілля, кг/с	Споживання млн т/рік
$A_1$	3600	290,32	$9,16 = V_1$
$A_2$	3600	290,32	$9,16 = V_2$
$A_3$	2400	193,55	$6,10 = V_3$

Розглянемо питання постачальників. За прототип постачальників у транспортній задачі розглянемо деякі шахти з існуючих на підконтрольній території (інформацію взято зі статистики за 2008 і 2009 рр. У силу того, що більшість із них знаходиться поблизу одна від одної на території Донецького вугільного басейну, виберемо ті, які максимально підходять до умов потреб ТЕС, і для отримання транспортної задачі представимо результати видобутку максимально наближені до споживання ТЕС) (див. табл. нижче).

Розглянемо варіант дефіциту товару на внутрішньому ринку. У цьому разі будемо імпортувати вугілля з ПАР. Відповідно до [6, с. 22–35], середня ціна за тону вугілля на умовах CIF порт з ПАР \$112,00 (2 724,96 ₴, якщо за курсом 24,33 ₴).

З огляду на середні відстані від портів Одеської області (порт Південний і ТІС) до розглянутих ТЕС (555 км до Запорізької ТЕС, 845 км – до Світлодарська та 764 км – до міста Бурштин).

З огляду на відносну дешевизну вугілля з ПАР і розташування глибоководного Південного порту по відношенню до ТЕС  $A_1$ ,  $A_2$  і  $A_3$ , схема з імпортом вугілля з ПАР через порт Південний виходять дешевше і вигідніше для ТЕС у закупівлі. Однак два вкрай важливі чинники в безперебійному постачанні вугілля поки що не розглянуть: час і якість товару.

Транспортна задача була вирішена з урахуванням річних потреб ТЕС, річного видобутку з шахт і постачання вугілля сумарно на рік. Фактор часу розглянемо пізніше, а на разі для зручності наведемо розрахунки потреб і видобутку і постачання у щоденному форматі.

Припустимо, що для нашої поставки була здійснена закупівля вугілля з ПАР, яке виявилось неякісним із високим показником зольності 50%. Отже, вугілля, що доставляється цим шляхом, потрібно в два рази більше.

З огляду на високе споживання вугілля через високу зольність на ТЕС  $A_3$  бракує 4,06 тис т на день. Залучимо джерело  $B_2$  (шахта міста Сокаль), яке ми замінили імпортом вугіллям через недорогий вартості. Однак у шахті міста Сокаль вугілля теж виявилось зольним із показником 30%. Маємо лише 5,6875 тис т корисної маси з видобутих щодня 8,125 тис т. Оскільки нам не вистачає 4,06233 тис т корисного вантажу без зольної домішки, реального вантажу

млн грн на перевезення на рік із кожної шахти постачальнику

127,1801847	45,53740265	25,05064244	0,525	$B_1$	Волиньвугілля
744,1657721	733,8540063	112,856549	2,9655	$B_2$	Львіввугілля
66,7066685	19,85776548	242,3418564	0,998	$B_3$	Мирноград-вугілля
101,2467087	34,75224867	350,532524	1,4165	$B_4$	Селидів-вугілля
185,097695	65,47338679	610,4285685	2,5483	$B_5$	м. Добропілля
62,04281552	6,4617811	8,502343553	0,2515	$B_6$	м. Соснівка
61,55068896	19,52414327	221,7148473	0,8565	$B_7$	м. Вугледар
71,45735598	80,15046498	156,475962	0,9	$B_8$	м. Олександрія
628,2408455	585,0998432	3084,581662	13,9575	$B_9$	м. Павлоград
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$Z$		

$$\Sigma A_n = \Sigma B_m = 24,42$$

з урахуванням зольності знадобиться 5,80333 тис т. При цьому ні ціна на закупівлю, ні транспортні витрати не зміняться, тому що реальна маса залишається незмінною.

Поставимо три механічні флотаційні машини МФУ-25 і проведемо процедуру тричі, у нашому разі концентрат у кінцевому підсумку становитиме 67,2% від початкової маси і 32,8% – хвости за всі три етапи очищення.

Далі отримаємо для нашого прикладу з умовою початкової зольності 30% для 100 т вугілля після всіх трьох етапів очищення матимемо показник зольності 10,8% для 67,2 т концентрату.

МФУ-25 може щогодини проводитися 67,2 т збагаченого палива і на добу ми отримаємо 1 612,8 т вугільного палива з 2 400 т вугілля, що поставляється на фабрику.

З огляду на потужність установки 30кВт на кожен агрегат маємо, що потужність збагачувальної фабрики 90кВт і за день споживається 2 160кВт \* год.

Установлений в Україні тариф для електроенергії, що виробляється на ТЕС, – 0,67 грн/кВт \* год.

Отже, згідно із середньою собівартістю, на початок 2020 р. – 173,6 коп. за кВт \* год електроенергії, обробка 2 400 т вугілля на добу становить 3 749,76 грн.

Поставимо на фабриці п'ять установок для обробки 500 т вугілля на годину й отримаємо переробку 12 тис т вугілля із зольністю 30% на добу для отримання 8,064 т палива із зольністю

10,8%. Експлуатація даної фабрики буде обходитися в 10,8 МВт\*год на добу, що буде еквівалентно 18,749 грн на добу.

Нескладно помітити, що, на перший погляд, спалювання палива без очищення виходить вигідніше, тому що відсутнє формування хвостів, однак приходить абразивний знос конвективних поверхонь нагріву через незгоріле паливо і частинки золи.

Якщо порівнювати результати транспортних завдань за цільовими функціями (11) і (27), нескладно помітити, що вигідніше поставити збагачувальну фабрику й очищати вугілля за зольності 30%, ніж удаватися до регулярного ремонту і заміни обладнання на ТЕС. Більше того, якщо взяти в приклад експлуатацію турбіни К-300 (10 років), то економія виходить у середньому більше ніж на 25,5 млн грн.

Отже, ми зменшили показник зольності з 30% до 24,1%, проте і загальна маса палива зменшилася зі 100 т до 87,6 т.

Візьмемо за витрати по заміні і ремонту ТЕС розрахунки з дисертації М.В. Гриценко для Єрківського вугілля (показники зольності даного вугілля у цій статті схожі з показниками нашого завдання) [1, с. 34–46, 91–120], а саме: знос конвективних поверхонь нагріву котлоагрегату при роботі на Єрківському вугіллі, середньорічний знос конвективних поверхонь нагріву, термін служби поверхонь нагріву, питомі сумарні витрати по ТЕС. Курс валюти був прийнятий на 02.03.2020 за даними НБУ: 1 руб. = 0,366 грн.

**Транспортна задача:**

			корисний об'єм	реальний обсяг	
348,45	124,77	68,64	1,438356	5,803326811	$B_1$
1652,383592	1631,363195	365,4681826	4,062329		$B_2$
757,6973391	1096,359289	1001,767503	4,062329		$B^*_2$
182,78	54,42	663,97	2,734247		$B_3$
277,42	95,24	960,39	3,880822		$B_4$
507,17	179,43	1 672,46	6,981644		$B_5$
169,99	17,71	23,30	0,689041		$B_6$
168,65	53,51	607,45	2,346575		$B_7$
195,79	219,61	428,72	2,465753		$B_8$
1 721,48	1 603,28	8 451,18	38,23973	$B_9$	
25,08705259	25,08705259	16,72470172	$Z$		

$A_1$

$A_2$

$A_3$

$\Sigma A_n = \Sigma B_m = 66,9$

Аналіз оптимального плану.

- 1) З 1-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 2) З 2-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 3) З (2\*) портового складу необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 4) З 3-ї шахти необхідно вантаж направити до 2-ї ТЕС (1.073928417 тис т), до 3-ї ТЕС (1.660318158 тис т).
- 5) З 4-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 2-ї ТЕС.
- 6) З 5-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 2-ї ТЕС.
- 7) З 6-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 8) Із 7-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 9) Із 8-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 10) З 9-ї шахти необхідно вантаж направити до 1-ї ТЕС (25.08705259 тис т), до 2-ї ТЕС (13.150658419 тис т).
- 11) На 9-й шахті залишився незатребуваним вантаж в кількості 2 т.

Оптимальний план є виродженим, оскільки базисна змінна  $x_{104} = 0$ .

### 6.2. Абразивне пошкодження труб та зменшення часу експлуатації

Наведемо інформацію, щоб розрахувати час експлуатації обладнання:

- 1) кількість споживаного вугілля на день;
- 2) кількість електроенергії, що виробляється на день;
- 3) маса абразивного матеріалу на день виділяється внаслідок згорання вугілля;
- 4) товщина абразивного пошкодження труби на день.

Дано:

А) ТЕС А1, прототипом якої є ТЕС у Запоріжжі (Енергодар);

Б) кам'яне вугілля Донбаського басейну марки Г.

Із погляду хімічного складу головний компонент золи та шлаку – діоксид кремнію SiO<sub>2</sub> (45–60%) і так званої «породи»: йдуть оксид алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15–25%), оксиди заліза Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5–15%), оксид кальцію CaO (1,5–4,5%), оксид калію K<sub>2</sub>O (2,0–4,5%) і деякі інші оксиди, зміст яких зазвичай не перевищує одного відсотка [6, с. 22–35].

Візьмемо нормальний для Донбаського вугілля показник зольності 15–20% [7, с. 3–6].

$A^d=20\%$  та нехай зміст кварцу в ньому буде 60%, тобто матимемо:

$$A^d = n_{SiO_2} + n_{порода} = 12\% + 8\% = 20\%.$$

Використовуючи як приклад станцію А1, будемо розглядати турбіни, які експлуатуються на Запорізькій ТЕС: 2 турбіни К-300-240-2 і 2 турбіни К-325-23,5 з конденсаційною електричною потужністю 317 і 337,3 МВт [8, с. 87–95].

Раніше ми використовували ККД ТЕС 40%.

Спільна потужність чотирьох турбін буде  $W=2*(317+337,3)=1308,6$  МВт.

Ураховуючи (4) витрати «ідеального вугільного палива» для ТЕС А1, маємо  $V=379,91$  т/час.

Електроенергія, що виробляється в день за ККД 40% і під час згорання «ідеального» палива буде:  $q=W*40\%*24=12565,56$  МВт\*ч

### Розв'язок для донецького вугілля марки Г.

1)  $V=25,08$  т/день : 80% = 31,3545 т/день;

2)  $A^d = n_{SiO_2} + n_{порода} = 12\% + 8\% = 20\%$ , значить, матимемо на 20% вуглецевого матеріалу, що спалюється, проте ми компенсуємо зольність палива збільшенням спалюваного обсягу, отже, потужність турбін залишається колишньою,  $q=12565,56$  МВт\*ч/день;

3)  $n_{SiO_2} = 12\% \Rightarrow m_{SiO_2} = V * n_{SiO_2} = 31,3545$  т/день \* 12% = 3,76254 т/день;

4) абразивний знос на т у. п.  $\delta_{уд.г}$  буде дорівнювати = 3,003 нм/т у.п., тобто  $\delta_{уд.г/день}$  на день = 3,003 нм/т у.п. \* 31,3545 т/день = 94,1575635 нм/день.

У задачі зольність 20%, де 12% – абразивність і 8% – порода. Будемо мати за масової витрати: 14 кг/с: вуглецю  $m_C = 11,2$  кг; абразивного матеріалу  $m_{SiO_2} = 1,68$  кг; гематиту і стільки ж силікату кальцію  $m_{Fe_2O_3} = 0,56$  кг,  $m_{CaSiO_3} = 0,56$  кг.

Переведемо для реакції масу вуглецю в кількість речовини:

$$v_C = 932.479 \text{ моль}$$

Для отримання вуглекислого газу нам необхідно використовувати аналогічну кількість кисню і, отже, в чотири рази більше азоту (у силу припущення вище):

$$932.479 C + 932.479 O_2 + 3729.916 NO_2 = 932.479 CO_2 + 3729.916 NO_2$$

$$v_{CO_2} = 932.479 \text{ моль} \Rightarrow m_{CO_2} = 41.037 \text{ кг};$$

$$v_{NO_2} = 3729.916 \text{ моль} \Rightarrow m_{NO_2} = 171.595 \text{ кг}$$

$$\rho_{SiO_2} = 2.65 \text{ г/см}^3 \Rightarrow V_{SiO_2} = 633,96 \text{ см}^3$$

$$\rho_{Fe_2O_3} = 5.24 \text{ г/см}^3 \Rightarrow V_{Fe_2O_3} = 106,87 \text{ см}^3$$

$$\rho_{CaSiO_3} = 2.915 \text{ г/см}^3 \Rightarrow V_{CaSiO_3} = 192,11 \text{ см}^3$$

$$\rho_{CO_2} = 1.9768 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3 \Rightarrow V_{CO_2} = 20.741 \cdot 10^6 \text{ см}^3$$

$$\rho_{NO_2} = 1.45 \text{ г/см}^3 \Rightarrow V_{NO_2} = 118.276 \cdot 10^3 \text{ см}^3$$

$$V_{пакет} = v_{вещ} \cdot \rho$$

$$V_{пакет} \approx 20,860 \cdot 10^6 \text{ см}^3/\text{с} = 20,860 \text{ м}^3/\text{с}$$

Будемо мати ККД золоотвалу 68,77%, тобто параметр золоуловлювання – 31,23%. За згорання вугілля із зольністю 20%, з яких абразивність

12%, труби котла зносяться через 6,2 роки (за нормального строку експлуатації зазвичай 10 років).

**Висновки.** У цій роботі ми розглянули питання зольної домішки у паливо та її абразивного впливу на обладнання ТЕС.

За умови звичного навантаження енергоблоків кожна ТЕС має уявлення щодо найближчого можливого часу зупинки станції для її планового ремонту. Узагалі ТЕС не може встати на ремонт раніше цього строку через те, що навантаження на енергомережі розраховано заздалегідь і будь-який форс-мажор може сприяти падінню потужності електромережі у цілому. Але у цій статті ми ігноруємо цей факт і розглядаємо лише фінансовий

складник будь-яких несправностей, який виявляється у витратах на ремонт та заміну обладнання, а також додатковій закупівлі палива.

Нескладно побачити, що за умови збагачення палива економія у витратах ТЕС виражається в подовженні часу експлуатації обладнання, враховуючи навіть витрати на збагачення.

У перспективі можна зайнятися способами визначення необхідності збагачення палива, бо традиційно на ТЕС немає лабораторії для дослідження кожної партії, але час від часу якість купленого палива може відрізнятися від показника в документах, і нам потрібно розуміти, як вчасно можна це ідентифікувати.

#### Список літератури:

1. Гриценко М.В. Комплексная оценка эффективности работы ТЭС при использовании различных видов углей. С. 34–46, 91–120.
2. ISO 18283:2006 Hard coal and coke – Manual sampling. URL: <https://www.iso.org/standard/6722.html>.
3. Козлов В.А., Пикалов М.Ф., Кияненко А.Е. Развитие флотационных технологий для обогащения угольного шлама. *Уголь Украины*. 2014. Март. С. 39–45.
4. Путилова И.В. Абразивный износ трубопроводов пневмотранспортных установок систем золошлакоудаления и пылеприготовления ТЭС : автореф. дис. ... к.т.н. Москва, 2004. С. 8–17.
5. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике : информационный сборник / В.В. Абрамов и др. ; под общей ред. В.Я. Путилова. Москва : Издательский дом МЭИ, 2007. 388 с. ISBN 978-5-383-00052-6.
6. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов-на-Дону : Сев.-Кавказск. научн. центр высш. школы, 2002. С. 22–35.
7. Зборщик М.П., Ильяшов М.А. О неотложности решения проблем геоэкологии Донбасса. *Уголь Украины*. 2007. № 12(612). С. 3–6.
8. Арсеньев Л.В., Полищук В.Г., Соколов Н.П. Парогазовые установки и их показатели. *Промышленная теплотехника*. 1999. Т. 21. № 2–3. С. 87–95.

#### Grishyn M.V., Beglov K.V. EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF FUEL ENRICHMENT TO REDUCE THE RISK OF POWER PLANT COSTS

*Using coal in thermal power plants for power generation is a key source of carbon at a relatively low cost, but the use of coal causes a number of problems in the combustion of the fuel. The main problem is fluctuations in the composition of the coal going to combustion. Significant fluctuations in the composition of the fuel occur from different suppliers of coal. Thus, from unscrupulous suppliers, who claim low ash content, outright bad fuel can arrive at the power plant.*

*Studies on coal combustion in boiler plants have been done for a very long time. There is evidence in certain studies of the harmful effects of fuel ash content on furnace equipment. However, the boilers that are in operation are already designed to burn ash fuel, with the fuel composition considered to be unchanged and few solutions have been proposed to the problem of quality differences when purchased and quality differences after delivery.*

*From modern power plants, it is necessary to introduce a reliable scheme of adaptation to changes in fuel quality, therefore the conditional priority of the study is that the power unit cannot be stopped for repairs before the required time.*

*The article considers solutions to the transport problem for a group of boilers. The mathematical model of combustion of low-quality coal fuel, the proposed idea of integration of fuel enrichment technology right on the territory of TPP, and the possibility of launching it if necessary are used.*

*The target function is expressed in the sum of actual costs and potential costs, taking into account discounts, and is aimed at minimizing costs. In addition, the costs of fuel enrichment are included without taking into account the costs of purchasing equipment.*

**Key words:** control, boiler group, enrichment, nonlinear model, optimization, transport problem, parametric model.