

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ УКРАИНЫ**

**НАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ  
АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ**

**ТЕПЛОТЕХНИКА,  
ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ  
В МЕТАЛЛУРГИИ**

**КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ**

**В ДВУХ КНИГАХ**

**КНИГА ВТОРАЯ**

**Под общей редакцией  
д.т.н., проф. Ю.С. Пройдака**

**Дніпро  
Нова ідеологія  
2017**

УДК 669.01/.09:658.567.1:628.477.6:574

ББК 31.3

Т 34

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національної металургійної академії України  
протокол № 7 от 20 вересня 2017 р.

Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії : колективна монографія. У двох книгах. – Книга друга / Під загальною редакцією д.т.н., проф. Ю.С. Пройдака. – Дніпро : Нова ідеологія, 2017. – 340 с.

ISBN 978-617-7068-43-2

У другій книзі колективної монографії представлено роботи вітчизняних і зарубіжних науковців, які присвячені інженерії виробництва, ефективному використанню енергії та ресурсів в металургії, розробці енергоефективних технологій, матеріалів та устаткування, питанням організації процесів спалювання палива та конструювання паливо-спалюючих пристроїв. Особливу увагу приділено екологічним проблемам металургії і енергетики, сучасними технологіям захисту навколишнього середовища. Також розглянуто проблеми та перспективи інженерної освіти в Україні, питання екологізації вищої освіти з метою підготовки фахівців для сталого розвитку промисловості.

ISBN 978-617-7068-43-2

© Національна металургійна  
академія України, 2017

***Раздел 4.***  
***Процессы сжигания топлива***  
***и топливосжигающие устройства***

***Редактор раздела*** – профессор, д.т.н.,  
профессор кафедры промышленной теплоэнергетики  
Национальной металлургической академии Украины  
***Пинчук В.А.***

***Рецензент*** – профессор, д.т.н.,  
профессор кафедры теплоэнергетики  
Запорожской государственной инженерной академии  
***Яковлева И.Г.***

# BADANIE STABILNOŚCI PŁOMIENIA DYFUZYJNEGO PRZY RÓŻNEJ ZAWARTOŚCI TLENU W UTLENIACZU

*Matysiak H., Łukasiak K., Radomiak H.*

*Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów,  
Katedra Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska*

## **Abstract**

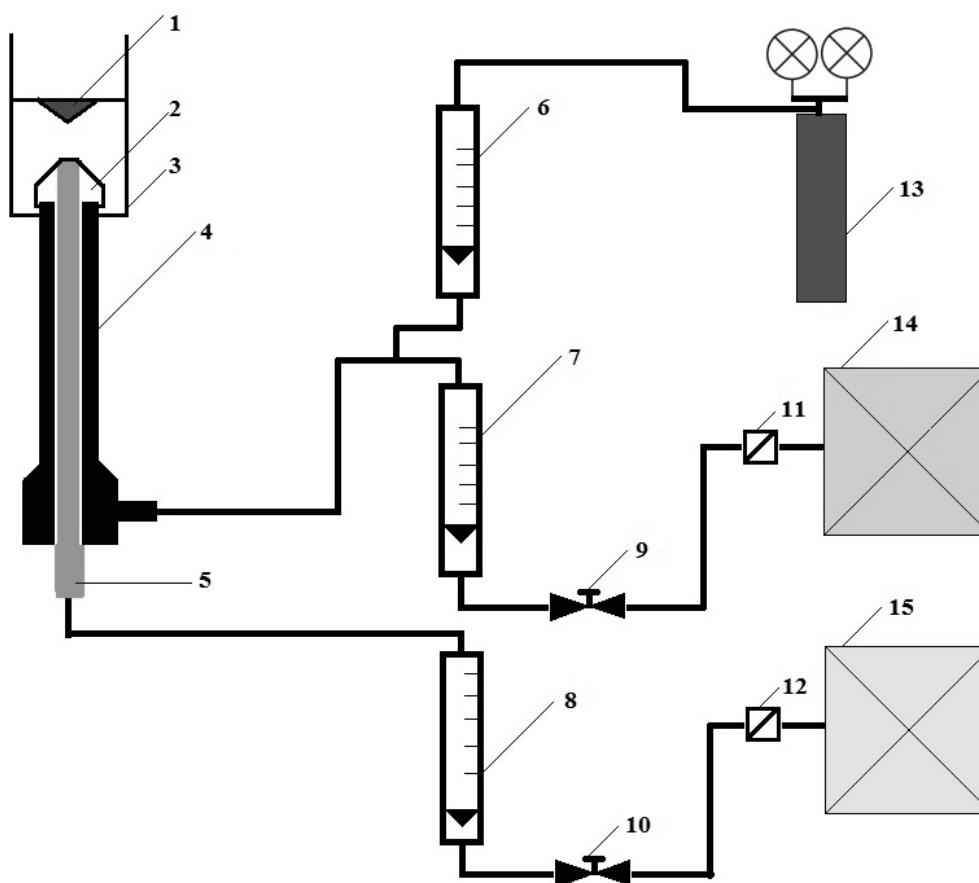
*The following paper presents the results of experimental research, which allows to understand the behavior of diffuse flame depending on certain flow parameters of gas and oxidizer. Consideration was also given to the effect of the use of a stabilizer of defined shapes. Another important factor was the content of oxygen in the oxidizer and how the change in the size of its stream influences on the flame stability. The use of suitable flame stabilizers and oxygen addition can improve safety of the burners, which was confirmed experimentally.*

## **Wstęp**

Znajomość natury płomienia oraz jego zachowania podczas procesów spalania jest jednym z kluczowych aspektów mogących pozwolić uniknąć zagrożeń dla życia i zdrowia ludzi. Zbyt niskie parametry przepływu mieszanki często skutkują cofnięciem się płomienia do dyszy paliwowej, dalej przewodu i zbiornika, co bez zastosowania odpowiednich zaworów zabezpieczających prowadzi do wybuchu i tragedii. Z drugiej strony parametry przepływu o zbyt wysokich wartościach spowodują zerwanie się płomienia, a w konsekwencji niską sprawność palnika oraz niecałkowite spalanie. Dlatego też do bezpiecznej pracy palników wymagane jest oszacowanie parametrów pozwalających na stabilne spalanie, co zostało zaprezentowane w poniższym artykule [2,5].

## **Metodyka badawcza**

Przeprowadzone badania polegały na identyfikacji wartości granicznej strumienia przepływu powietrza, która prowadziła do zerwania i wygaszenia płomienia dyfuzyjnego. Pod uwagę brano także wartości, przy których dochodziło do uniesienia płomienia ponad dyszę palnika. W prowadzonych badaniach wykorzystany został palnik laboratoryjny ze zmiennymi dyszami, który umożliwiał także zamocowanie stabilizatorów płomienia o różnych kształtach i na ustalonej wysokości. Jako paliwo wykorzystano gaz ziemny, który dostarczono z miejskiej instalacji gazociągowej [1].

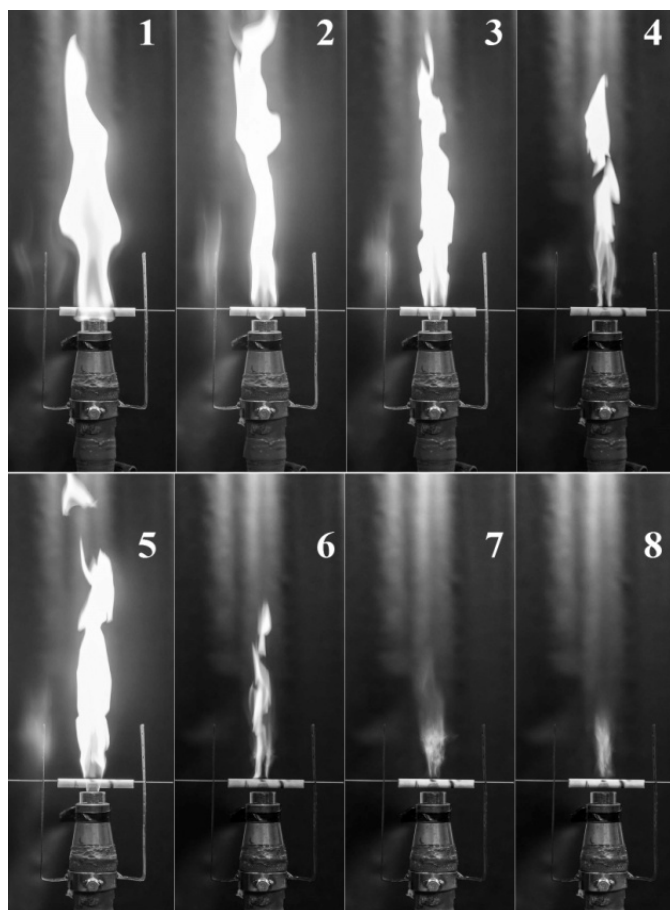


Rys.1. Stanowisko pomiarowe służące do wyznaczania stabilnej pracy płomienia:  
 1 – stabilizator płomienia; 2 – dysza palnika gazowego; 3 – przmiar służący do regulacji wysokości stabilizatora; 4 – palnik gazowy; 5 – wewnętrzna dysza paliwowa palnika; 6 – rotametr tlenu technicznego; 7 – rotametr powietrza; 8 – rotametr gazu; 9 – zawór iglicowy regulacji strumienia powietrza; 10 – zawór iglicowy regulacji strumienia gazu; 11,12 – zawory odcinające; 13 – butla tlenowa z reduktorem; 14 – źródło powietrza; 15 – źródło gazu

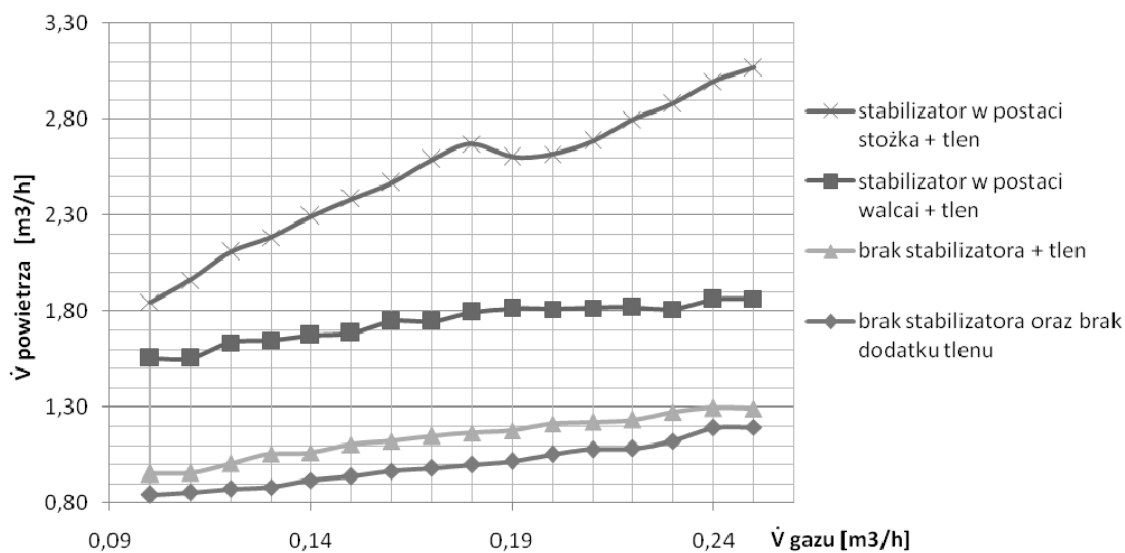
W pierwszej fazie pomiarów ustawiano niewielki przepływ powietrza –  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , a przepływ strumienia gazowego w przedziale  $0,10 \div 0,25 \text{ m}^3/\text{h}$  (dla palnika  $\varnothing 12,4 \text{ mm}$ ) lub  $0,10 \div 0,20 \text{ m}^3/\text{h}$  (dla palnika  $\varnothing 18,4$ ). Po zainicjowaniu zapłonu mieszanki stopniowo zwiększano parametry przepływu powietrza, doprowadzając tym samym do destabilizacji płomienia, jego uniesienia się i ostatecznie zerwania. Na rotametrach odczytywano wartości przepływów, przy których występowały opisane wyżej zjawiska. Kolejne badania prowadzono dodając do strumienia powietrza także ustaloną wartość tlenu –  $0,08 \text{ m}^3/\text{h}$  [1].

### Wyniki badań

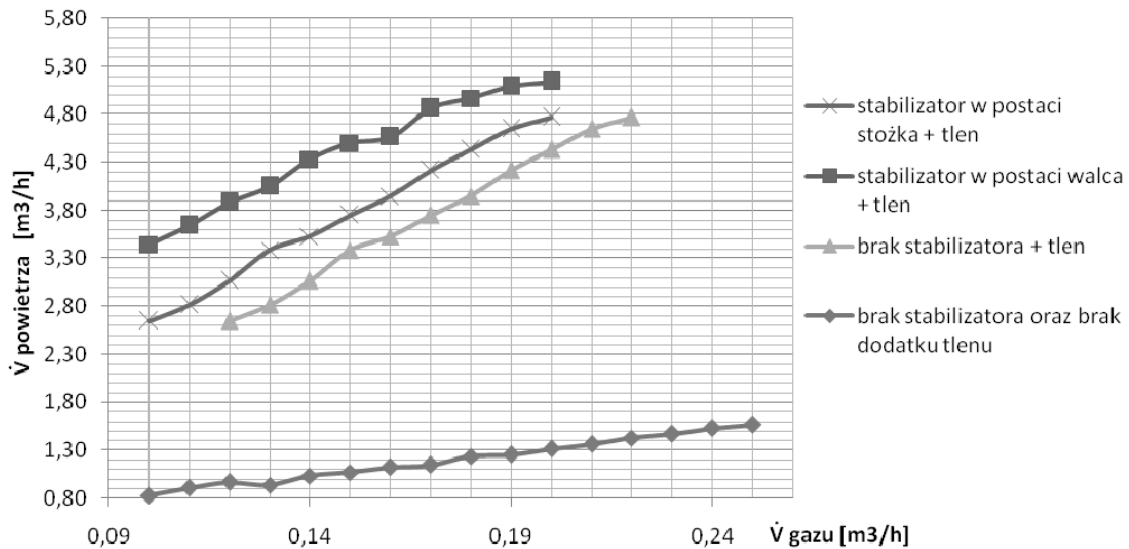
Fragmentaryczne wyniki prowadzonych badań zilustrowano za pomocą poniższych wykresów i rysunków (rys. 2 – 4):



Rys. 2. Wizualizacja wygaszenia płomienia na palniku dyfuzyjnym  $\varnothing 18,6$  mm, przy  $\dot{V} = 0,14$  m<sup>3</sup>/h, z założonym stabilizatorem walcowym  $\varnothing 7,6$  mm, umieszczonym na wysokości 4 mm



Rys.3. Moment zerwania płomienia dla zależności wielkości strumienia powietrza od rosnącego strumienia gazu, dla palnika o średnicy  $\varnothing 12,40$  i z dodatkiem tlenu ( $0,08$  m<sup>3</sup>/h)



Rys.4. Moment zerwania płomienia dla zależności wielkości strumienia powietrza od rosnącego strumienia gazu, dla palnika o średnicy  $\varnothing 18,60$  i z dodatkiem tlenu ( $0,08\text{m}^3/\text{h}$ )

### Podsumowanie badań

Na podstawie analizy otrzymanych wyników stwierdzić można, że wartość strumienia powietrza, która doprowadziła do zerwania płomienia dyfuzyjnego wzrasta wprost proporcjonalnie do wzrostu strumienia gazu. Przy zastosowaniu stabilizatora wartości przy których zrywany był płomień, były większe w porównaniu do tych bez stabilizatora. Kształt stabilizatora również wpływał na moment zerwania - lepsze parametry osiągnięto stosując stabilizator stożkowy. Natomiast stabilizatory walcowe wykorzystane w badaniach wpłynęły pozytywnie na wzrost współczynnika nadmiaru powietrza. Podobnie, jak stabilizator działa dodatek tlenu do utleniacza. Większa jego zawartość pozwala na wykorzystanie większej zawartości powietrza, zanim nastąpi moment zerwania się i wygaszenia płomienia. Podczas badań ze zwiększoną zawartością tlenu w utleniaczu zaobserwowano ponadto wzrost współczynnika nadmiaru powietrza, wzrost temperatury spalania, a także zmianę barwy płomienia. Dodatkowy tlen wymusza zatem konieczność budowania palników z trwalszych materiałów [1, 4].

Na moment zerwania się i wygaszenia płomienia wpływa również średnica zastosowanej dyszy palnikowej. Większa średnica pozwala na wykorzystywanie większych parametrów przepływu gazu oraz utleniacza, powodując przesunięcie granicy wygaszenia płomienia w kierunku wyższych wartości (przy porównaniu z dyszą o mniejszej średnicy) [1, 3].

Badania pozwoliły ponadto zaobserwować, iż większą skuteczność stabilizacji osiągnęto umieszczając stabilizatory płomienia kilka milimetrów nad dyszą palnika. Zwiększenie wysokości zamocowania stabilizatorów

powodowało spadek ich skuteczności, przyczyniając się do szybszego zerwania i wygaszenia płomienia [1].

Obserwowane uniesienie się płomienia nad dyszą palnika związane jest ze zdolnością wytworzenia się wirów recyrkulacyjnych w cieniu aerodynamicznym stabilizatora. Wiry te tworzone są przez rozgrzaną mieszanę palną opływającą stabilizator. Dla stabilizatora o danym kształcie i średnicy płomień odrywa się od dyszy palnika przy jednakowej wielkości przepływu utleniacza. Zwiększenie strumienia gazu wpływa tylko marginalnie na moment oderwania się płomienia [1].

#### **Literatura**

1. Matysiak H.: Badanie stabilności płomienia dyfuzyjnego przy różnej zawartości tlenu w utleniaczu, Częstochowa 2016.

2. Praca pod red. W. Nowak, T. Czakiert.: Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO<sub>2</sub>, Częstochowa 2012  
Kordylewski W.: Spalanie i paliwa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.

3. Tomeczek J.: Spalanie i płomienie gazowe. Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej, Gliwice 1979.

4. Jarosiński J.: Techniki czystego spalania. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.

5. Poskart A.: Wpływ dodatku tlenu na proces spalania gazu ziemnego w przemysłowych komorach grzewczych, Częstochowa 2016.

# WYBRANE ASPEKTY BEZPIECZEŃSTWA PODCZAS EKSPLOATACJI PIECÓW GRZEWCZYCH

*Musiał D., Radomiak H., Zajemska M.*

*Katedra Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii  
Produkcji i Technologii Materiałów, Politechnika Częstochowska, Polska*

## **Streszczenie**

W artykule przedstawiono efekty oraz możliwości modernizacji palników grzewczych w celu bezpiecznego prowadzenia pieca grzewczego. Modernizacja polegała na oszacowaniu optymalnej gazodynamiki urządzenia grzewczego z wykorzystaniem programu obliczeniowego. Następnie przeprowadzono badania palników w warunkach laboratoryjnych pod kątem bezpiecznej i stabilnej pracy. W rezultacie badania te pozwoliły na zmniejszenie zużycia ciepła podczas pracy pieca grzewczego.

Słowa kluczowe: piec grzewczy, bezpieczna praca urządzeń, wydajność pieca grzewczego.

## **Wstęp**

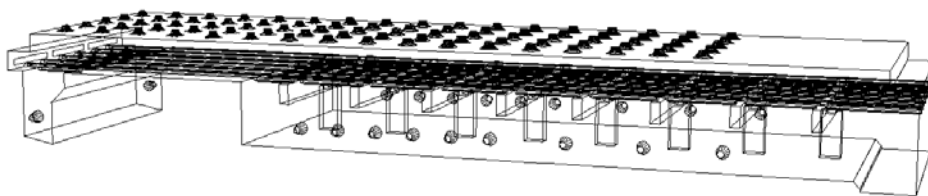
Stosowanie gazowych mediów energetycznych w procesach przemysłowych wymaga znajomości odpowiednich wymagań odnośnie stabilnej pracy palników w urządzeniach grzewczych [1, 2]. Wymagania te, poprzedzone stosownymi badaniami określają m.in. parametry przepływu gazu i utleniacza w zależności od zastosowanego palnika. Brak wystarczającej wiedzy na temat zachowania płomienia podczas procesów spalania może doprowadzić do poważnych zagrożeń pracy urządzeń, jak i dla życia i zdrowia ludzi. Zbyt niskie parametry przepływu mieszanki mogą spowodować cofnięcie się płomienia do dyszy paliwowej, dalej przewodu i zbiornika, co bez stosownych zabezpieczeń może stać się przyczyną wybuchu [3]. Parametry przepływu o zbyt wysokich wartościach spowodują zrywanie się płomienia, a w konsekwencji niską sprawność palnika oraz niecałkowite spalanie paliwa i zagrożenie bezpiecznej pracy urządzenia cieplnego [4]. Dla bezpiecznej pracy palników wymagana jest stabilizacja płomienia, która polega na zabezpieczeniu płomienia przed jego zerwaniem, a także wciągnięciem do dyszy palnika. Teoretycznie płomień jest stabilny wówczas gdy szybkość wypływu mieszanki palnej jest równa jej normalnej szybkości spalania.

## **Bezpieczna eksploatacja pieca grzewczego**

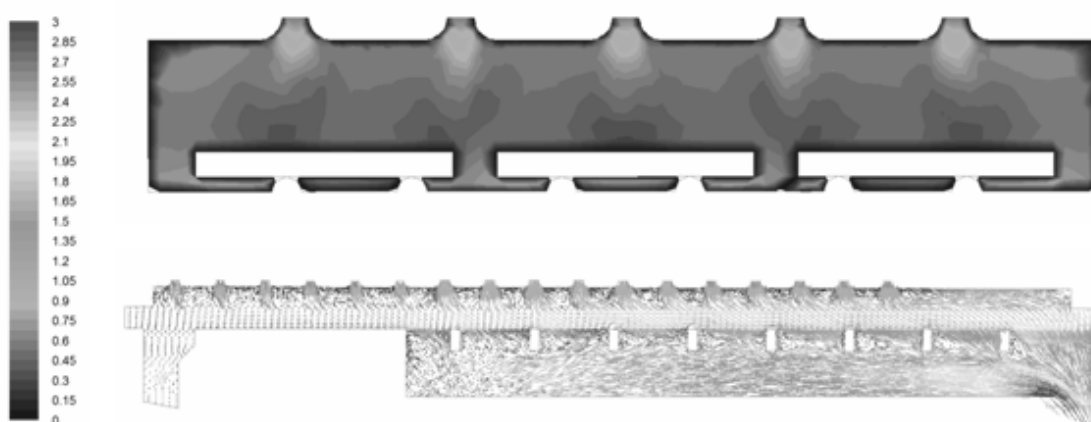
Jednym z programów wykorzystywanych do obliczeń gazodynamicznych pieców grzewczych jest Fluent. Na podstawie zgromadzonych danych wejściowych tj.: dane techniczne pieca, strumienie i skład objętościowe mediów zasilających, wymiary i gatunek

nagrzewanego wsadu, rzeczywistą wydajność pieca, można zasymulować rozkład strug w przestrzeni komory grzewczej.

W wyniku obliczeń otrzymuje się przewidywaną wizualizację gazodynamiki dla poszczególnych stref pieca (rys. 1 – 2).



Rys. 1. Przykładowa geometria pieca grzewczego [5]



Rys. 2. Wizualizacja strug palników bocznych [5]

Dla pozyskania odpowiednich danych wejściowych od obliczeń, zwłaszcza w przypadku np. modernizacji systemu opalania pieca grzewczego, niezbędne jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych palników m.inn. pod kątem bezpiecznej, stabilnej pracy, przy minimalnym strumieniu gazu i powietrza aby nie nastąpiło cofnięcie płomienia. Przykład stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 3, a wyniki w tabeli 1.



Rys. 3. Stanowisko badawcze [5]

Parametry przepływowe palnika [5]

Lp	Vg, m <sup>3</sup> /h	Vp <sub>1</sub> , m <sup>3</sup> /h	Vp <sub>2</sub> , m <sup>3</sup> /h	Tp <sub>2</sub> , °C	Pg+p, Pa	Pp <sub>2</sub> , Pa	T <sub>k</sub> , °C	Położenie grzybków
1.	3,9	2,6	36	305	32 59	22	893	o z
2.	3,25	2,2	30	290	26 47	18	896	o z
3.	2,6	1,7	24	250	17 30	4	894	o z
4.	1,95	1,3	18	235	8 17	2÷3 2÷3	836	o z
5.	1,3	0,9	12	195	2 6	1÷2	802 799	o z
6.	0,65	0,4	6	150 150	1÷2 1÷2	0÷1 0÷1	765 765	o z

gdzie: Vg, Pg – odpowiednio strumień, ciśnienie gazu; Vp, Pp, Tp – odpowiednio strumień, ciśnienie, temperatura powietrza; T<sub>k</sub> – temperatura spalin.

Po długiej eksploatacji stan techniczny palników jest niezadowalający ze względu na ich deformację (rys. 4). Zły stan techniczny palników skutkuje nieodpowiednim kształtem płomienia i rozkładem temperatury. Wizualizację komory spalania przed modernizacją układu opalania przedstawiono na rys. 5, a po modernizacji na rys. 6. W komorze po modernizacji utrzymuje się równomierny rozkład temperatury w całej przestrzeni.



Rys. 4. Kształtki palnikowe i wyloty powietrza palników [6]



Rys. 5. Wizualizacja komory przed modernizacją [6]



Rys. 6. Wizualizacja komory po modernizacji [6]

Dla jednego z wybranych pieców grzewczych wskaźnik zużycia ciepła podczas pracy pieca przed modernizacją wynosił od 2500 do 7022 MJ/Mg. Natomiast po modernizacji wynosi od 1610 do 3011 MJ/Mg.

## Podsumowanie

Podczas eksploatacji pieców grzewczych istotną rolę odgrywa praca poszczególnych palników. Palniki powinny pracować stabilnie w całym przedziale mocy. Płomień nie może być cofany przy minimalnym obciążeniu ani zerwany przy maksymalnej mocy. Pomocne są badania laboratoryjne i obliczenia związane z wizualizacją pracy palników.

- Zmiana systemu opalania pieców czasem zostaje wymuszona sytuacją paliwową.
- Zmodernizowany układ opalania zapewnia odpowiednie pole temperatur w komorze pieca. Rozkład temperatur jest równomierny i dostosowany do technologii grzewczej. Wizualizacja przedstawiona na rys. 6 dotyczy komory pieca hartowniczego, w którym panuje temperatura technologiczna na poziomie 950 stp. C.
- Wskaźnik zużycia ciepła w zmodernizowanych piecach jest znacząco obniżony .
- Wskaźnik zużycia ciepła bardzo silnie zależy od wydajności pieca. Im wyższa wydajność tym niższy wskaźnik zużycia ciepła.

## Literatura

1. Chung Suk Ho. 2007. „Stabilization, propagation and instability of tribrachial triple flames”. *Proc. Combust. Inst* 31 (1) : 877-892.
2. Taamallah Soufien, Shanbhogue Santosh J., Ghoniem Ahmed F. 2016. „Turbulent flame stabilization modes in premixed swirl combustion: Physical mechanism and Karlovitz number-based criterion”. *Combustion and Flame* 166 : 19-33.
3. Zajemska Monika, Musiał Dorota, Poskart Anna. 2014. „Application of Chemkin and Comsol programs in the chemical composition calculations of natural gas combustion products”. *Combustion Science and Technology*. 186 (2) : 153–172.
4. Deng Sili, Zhao Peng, Mueller Michael E., Law Chung K. 2015. „Stabilization of laminar nonpremixed DME/air coflow flames at elevated temperatures and pressures”. *Combustion and Flame*. 162 (12): 4471-4478.
5. Radomiak Henryk. 2009. „Przeprowadzenie rzeczywistej oceny stabilności płomienia dwóch palników wirowych będących na wyposażeniu pieca normalizacyjnego w Hucie Częstochowa zasilanych zimnym gazem mieszkankowym”. Częstochowa. Raport z pracy - praca niepublikowana.
6. Radomiak Henryk i inni. 2008. „Opracowanie założeń do modelu matematycznego gazodynamiki przepływu spalin w komorze pieca”. Częstochowa. Raport z pracy - praca niepublikowana.

# WYKORZYSTANIE TECHNIKI OBLICZENIOWEJ DO PROGNOZOWANIA STEŻENIA TLENKÓW AZOTU W KOMORACH GRZEWCZYCH

*Zajemska M.<sup>1</sup>, Radomiak H.<sup>1</sup>, Kamkina L.V.<sup>2</sup>,  
Yeromin O.O.<sup>3</sup>, Musiał D.<sup>1</sup>, Rajca P.<sup>1</sup>*

*1 – Katedra Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii  
Produkcji i Technologii Materiałów, Politechnika Częstochowska, Polska*

*2 – Dziekan Wydziału Metalurgicznego Narodowa Metalurgiczna  
Akademia Ukrainy, Ukraina*

*3- Kierownik Katedry Ekologii, Techniki Ciepłej i Bezpieczeństwa Pracy,  
Narodowa Metalurgiczna Akademia Ukrainy, Ukraina*

## Streszczenie

Celem artykułu było przybliżenie możliwości wykorzystania oprogramowania CHEMKIN-PRO do przewidywania składu chemicznego spalin, a w szczególności tlenków azotu, w komorze grzewczej będącej modelem przepychowego pieca grzewczego. Przedstawione w pracy wybrane wyniki obliczeń wyjaśniły mechanizmy formowania NO<sub>x</sub> podczas spalania jednego z najbardziej rozpowszechnionych paliw gazowych, a mianowicie gazu ziemnego. Dostarczona podczas obliczeń wiedza umożliwi podejmowanie działań optymalizacyjnych w zakresie minimalizacji ilości szkodliwych produktów spalania, przy zachowaniu reżimów technologicznych prowadzonego procesu.

## Wstęp

Dotychczasowe metody kontroli składu chemicznego spalin nadal pozostawiają miejsce nowoczesnym technikom obliczeniowym, ze względu na ograniczone możliwości pomiarowe. Doskonałym narzędziem do przewidywania zanieczyszczeń z procesów spalania są programy komputerowe, a w szczególności zaproponowany program CHEMKIN-PRO.

W literaturze przedmiotu można znaleźć szereg publikacji na temat różnych mechanizmów chemicznych spalania metanu, głównego składnika gazu ziemnego, włącznie z mechanizmem formowania NO<sub>x</sub> [1 – 3]. Niektóre z nich są bardzo uproszczone, inne zaś rozszerzone i zawierają nawet kilkaset reakcji chemicznych. Do najbardziej rozpowszechnionych i najczęściej stosowanych mechanizmów należą: mechanizm Millera-Bowmana, GRI-Mech, Burcata, Konnova, Glarborga, Currana, Westbrooka, Bendtsena, Marinova, Petersena, Leeds i Frenklacha [4 – 9].

Literatura, w celu pewnego uporządkowania mechanizmów chemicznych, klasyfikuje je na rozszerzone i uproszczone.

W tabeli 1 zebrano wybrane, szczegółowe mechanizmy chemiczne utleniania metanu, uwzględniające kinetykę formowania związków azotowych.

Tabela 1

Wybrane mechanizmy chemiczne spalania metanu  
z uwzględnieniem powstawania NO<sub>x</sub> [10, 11]

Mechanizm	Liczba związków azotowych	Liczba reakcji z azotem
Glarborg 2	24	207
Li i Williams	16	52
GRI-Mech 3.0	19	105

### Numeryczne modelowanie procesu spalania paliwa gazowego

Analizy numerycznej dokonano przy użyciu najnowszej wersji licencjonowanego oprogramowania CHEMKIN-PRO. Do obliczeń użyto reaktora z przepływem tłokowym PFR (Plug Flow Reactor). Zaimplementowanym do obliczeń mechanizmem utleniania metanu był mechanizm GRI-Mech, wersja 3.0. Plik chemiczny obejmował 320 reakcji i 52 związki chemiczne.

Oprócz pliku z danymi kinetycznymi i termodynamicznymi warunkiem niezbędnym do sformułowania warunków początkowych było wprowadzenie parametrów opisujących analizowany proces tj. skład i strumienie reagentów, temperatura, ciśnienie oraz gabaryty komory grzewczej (tabela 2).

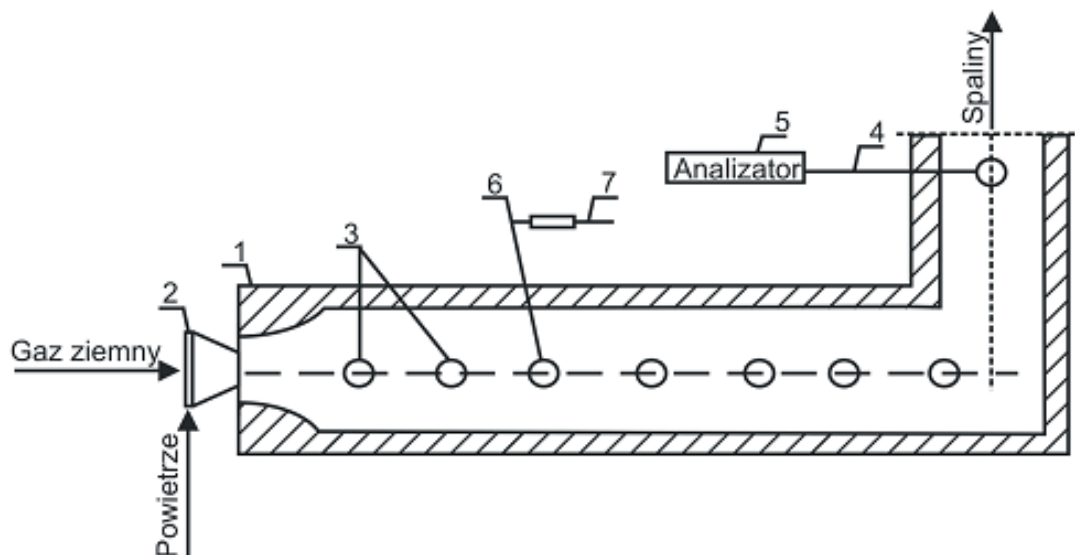
Tabela 2

Dane wejściowe do procedury modelowania dla komory eksperymentalnej

Strumienie masowe substratów, kg/s	$\dot{m}_{pow} = 0,01039$ ; $\dot{m}_{gaz} = 0,000575$
Udziały molowe substratów	powietrza: N <sub>2</sub> = 0,79; O <sub>2</sub> = 0,21 gazu: CH <sub>4</sub> = 0,967; C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> = 0,01785 CO <sub>2</sub> = 0,00315; N <sub>2</sub> = 0,012
Temperatura wprowadzanych mediów, K	293
Temperatura spalania, K	reaktor PFR: 2020 (założona)
Ciśnienie, atm	1,0
Objętość komory, m <sup>3</sup>	0,283

### Eksperyment laboratoryjny

Wstępny eksperyment laboratoryjny przeprowadzono w cylindrycznej komorze doświadczalnej, będącej modelem pieca przepychowego (rys. 1).

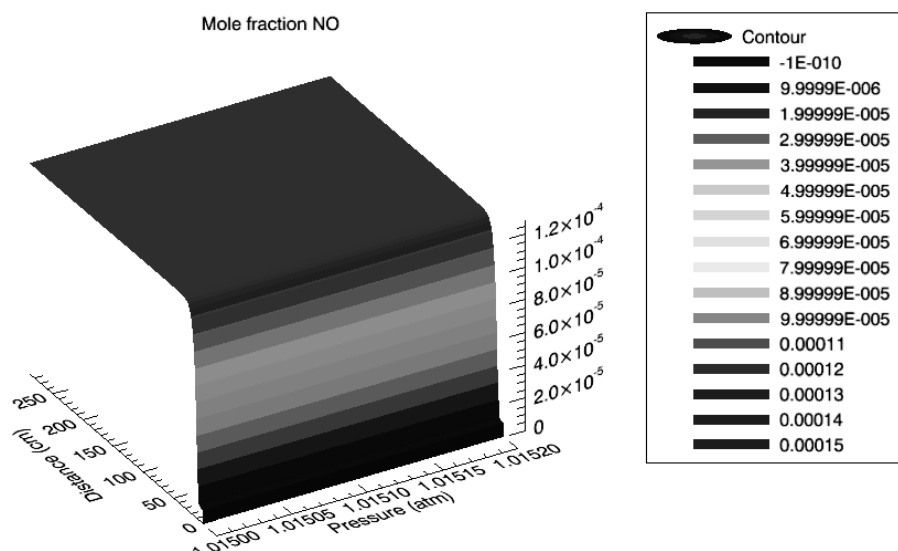


Rys. 1. Schemat stanowiska eksperymentalnego: 1 – wymurówka ogniotrwała, 2 – palnik wirowy, 3 – otwory pomiarowe, 4 – sonda, 5 – analizator spalin TESTO 360, 6 – komputer, 7 – termoelement PtRhPt

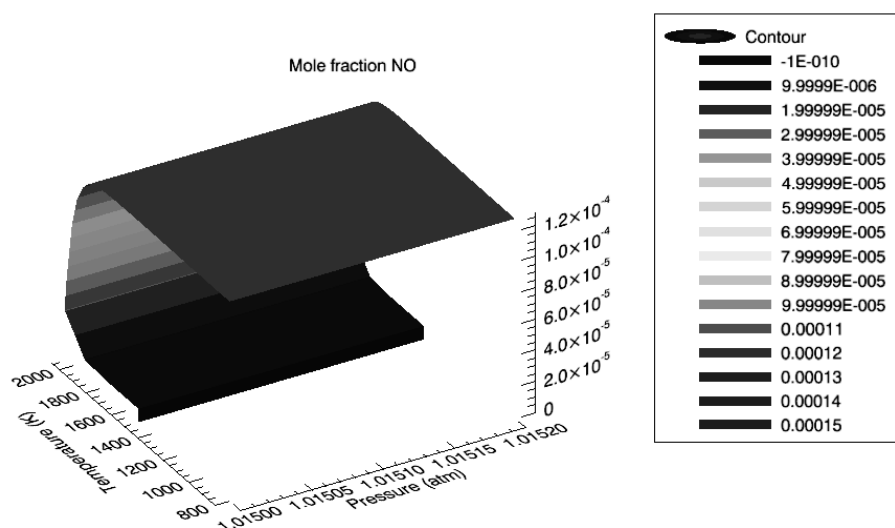
Zasadniczym elementem stanowiska doświadczalnego była cylindryczna komora ceramiczna o średnicy wewnętrznej 0,34 m i sumarycznej długości 3,12 m. W początkowym segmencie komory umiejscowiono przemysłowy palnik wirowy o max. mocy 120 kW, w którym spalano gaz ziemny. Na długości komory wykonano otwory pomiarowe, pozwalające na pomiar temperatury oraz składu chemicznego.

### Wyniki obliczeń

Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rys. 2 – 6. Wygenerowany w strefie najwyższych temperatur NO utrzymuje się na całej długości komory (rys. 2). Maksymalny udział NO obserwuje się w temperaturze bliskiej temperatury płomienia tj. ok. 2000 K, w czasie przebywania równym 0,3 s. Tak długi czas przebywania związany jest z umiejscowieniem strefy najwyższych temperatur panujących w płomieniu. Zaobserwowane podczas eksperymentu laboratoryjnego wydłużenie płomienia sięgało do 22 cm od palnika. Ostatecznie obliczony udział NO na wyjściu z komory wyniósł 128 ppmv.

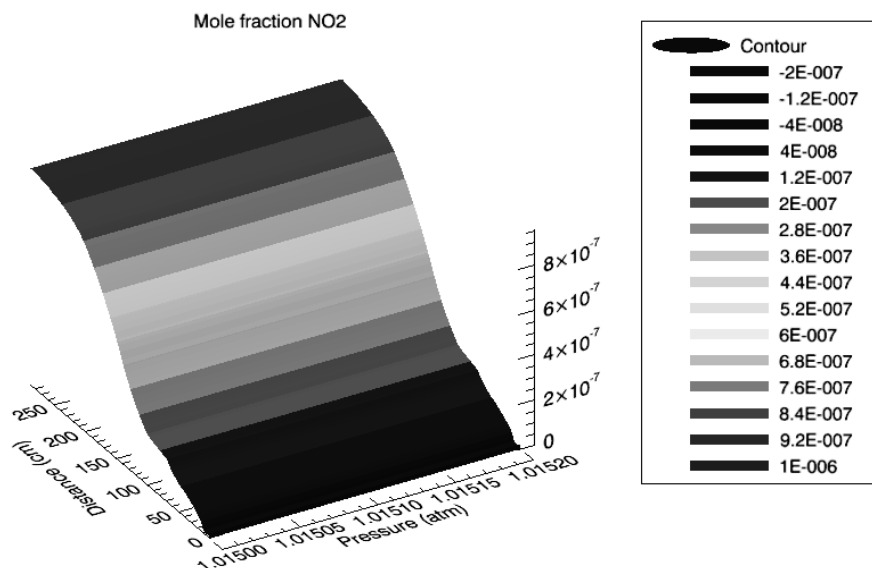


Rys. 2. Rozkład udziału molowego NO w komorze eksperymentalnej w funkcji odległości od palnika



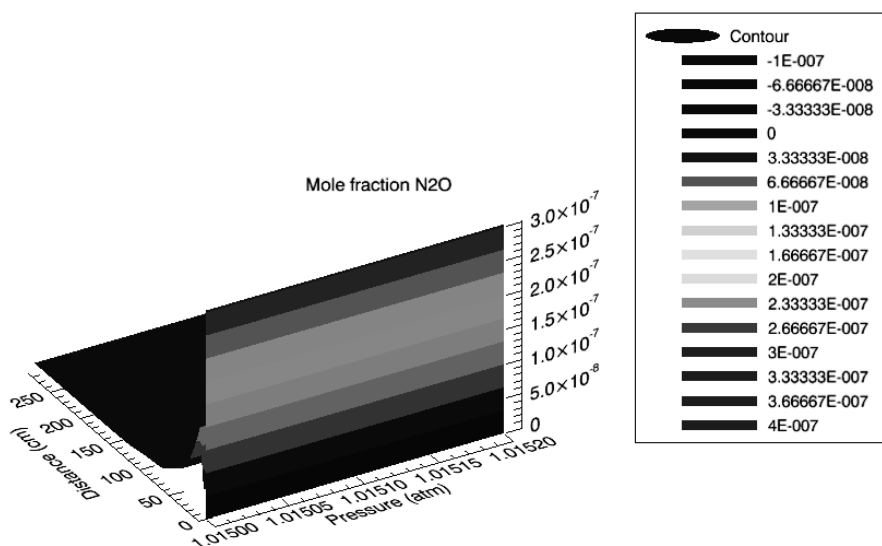
Rys. 3. Rozkład udziału molowego NO w komorze eksperymentalnej w funkcji temperatury

Ciekawą sytuację obserwuje się analizując udział dwutlenku azotu w spalinach (rys. 4). Tak jak w przypadku NO, potwierdza się zaobserwowana wcześniej tendencja, a mianowicie, że udział  $\text{NO}_2$  wzrasta wraz ze wzrostem czasu przebywania. Najwyższe wartości dwutlenku azotu przypadają na najniższe temperatury panujące w komorze, a zatem jego udział w spalinach jest największy na końcu komory badawczej. Wygenerowany w w/w zakresie temperatur dwutlenek azotu nie ulega już zmianie i utrzymuje się na stałym poziomie równym 1 ppmv.



Rys. 4. Rozkład udziału molowego NO<sub>2</sub> w komorze eksperymentalnej w funkcji odległości od palnika

Jeśli chodzi o stężenie N<sub>2</sub>O to, początkowo udział podtlenku azotu wzrasta wraz ze wzrostem odległości od kształtki palnikowej (rys. 5), osiągając maksymalną wartość na poziomie 0,3 ppmv. Następnie jego udział w spalinach gwałtownie spada, osiągając w odległości 20 cm od palnika wartość zbliżoną do obliczonej na końcu komory, a mianowicie 0,010 ppmv.

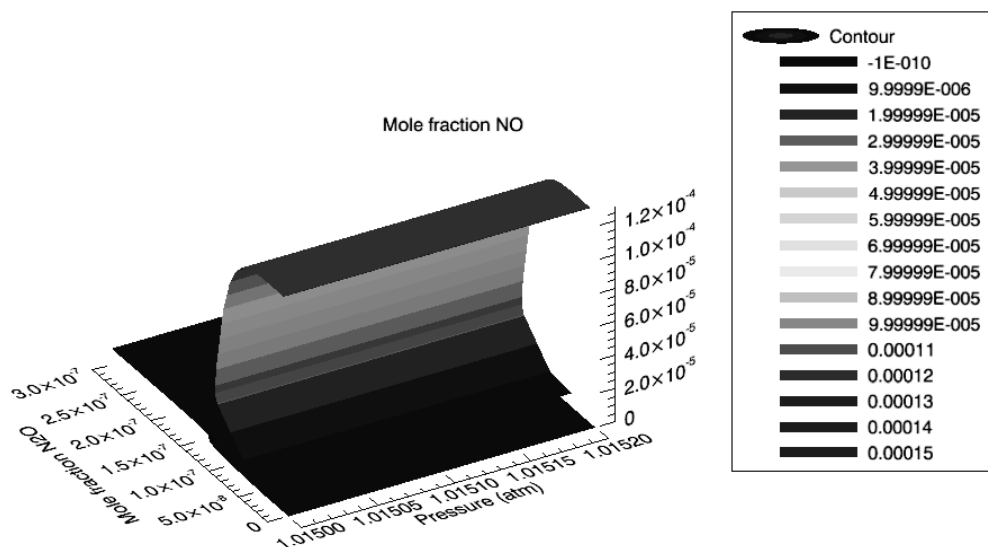


Rys. 5. Rozkład udziału molowego N<sub>2</sub>O w komorze eksperymentalnej w funkcji odległości od palnika

Spadek udziału N<sub>2</sub>O związany jest z mechanizmem formowania NO za pośrednictwem podtlenku azotu. Czas przebywania, obliczony dla

reaktora PFR, w którym obserwuje się tendencję spadkową podtlenku azotu, według obliczeń mieścił się w zakresie od 0,011 s do 0,1 s.

Dodatkowym potwierdzeniem obecności w analizowanym procesie spalania mechanizmu powstawania NO za pośrednictwem  $N_2O$  są udziały molowe przedstawione na rys. 6.



Rys. 6. Rozkład udziału molowego NO w komorze eksperymentalnej w zależności od udziału molowego  $N_2O$

Jak wynika z rys.6 istnieje ścisła korelacja pomiędzy udziałem molowym NO i  $N_2O$ . Zaobserwowana już wcześniej tendencja, a mianowicie, że wraz ze wzrostem udziału NO obserwuje się spadek udziału  $N_2O$  została dodatkowo uwypuklona, tym samym podkreślając rolę podtlenku azotu w formowaniu tlenku azotu.

### Podsumowanie

Przeprowadzone symulacje komputerowe dostarczyły cennych informacji na temat wpływu wybranych parametrów procesu spalania, a mianowicie temperatury i czasu przebywania na stężenie tlenków azotu w spalinach. Wysoka temperatura sprzyja bowiem formowaniu termicznych tlenków azotu w analizowanym zakresie czasu przebywania. Ponadto, w formowaniu NO uwidacznia się mechanizm ich powstawania za pośrednictwem  $N_2O$ . Mechanizm ten nabiera znaczenia za frontem płomienia, w strefie najwyższych temperatur i o wielkości emisji NO decyduje temperatura spalania oraz stężenie tlenu i azotu w strefie reakcji. Zaobserwowana przez Adachi i innych [12] zależność, a mianowicie, że im krótszy czas przebywania, tym niższy udział NO w spalinach, potwierdziła się również w przedstawionych w artykule symulacjach numerycznych. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych mogą stanowić podstawę diagnostyki procesu spalania pod kątem emitowanych

zanieczyszczeń, jak również mogą być przydatne przy podejmowaniu działań zmierzających do optymalizacji całego procesu spalania.

#### Literatura

1. Hughes K.J., Tomlin A.S., Hampartsoumian E., Nimmo W., Zsély I.G., Ujvári M., Turányi T., Clague A.R., Pilling M. J.: An Investigation of important Gas-phase reactions of nitrogenous species from the simulation of experimental measurements in combustion systems. *Combustion and Flame*, 2001, 124, 573÷589.
2. Nishioka M., Ishigami Y., Horii H., Umedab Y., Nakamura Y.: NO<sub>x</sub> reduction mechanism of a methane–air Smithells flame. *Combustion and Flame*, 2006, 147, 93÷107.
3. Pillier L., El Bakali A., Mercier X., Rida A., Pauwels J.-F., Desgroux P.: Influence of C<sub>2</sub> and C<sub>3</sub> compounds of natural gas on NO formation: an experimental study based on LIF/CRDS coupling. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30, 1183÷1191.
4. Westbrook C. K.: Applying chemical kinetics to natural gas combustion problems. Report No. PB-86-168770/XAB, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, Cal., USA, 1985.
5. Hughes K.J., Turányi T., Clague A.R., Pilling M.J.: Development and testing of a comprehensive chemical mechanism for the oxidation of methane. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2001, 33, 9, 515÷538.
6. Miller J.D., Bowman C.T.: Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1989, 15, 287÷338.
7. [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech)
8. Burcat A., Gardiner JrWC: Gas phase combustion chemistry. New York, Springer, 2000, 489÷538; <http://www.technion.ac.il/~aer0201> (5.03.2013).
9. Konnov A.A., Zhu J.N., Bromly J.H., Hang D.-K.: Noncatalytic partial oxidation of methane into syngas over a wide temperature range. *Combustion Science and Technology*, 2004, 176, 1093÷1116.
10. Huang J.: Natural gas combustion under engine - relevant conditions. The University of British, Columbia 2006.
11. Zajemska M.: „Modelowanie numeryczne składu chemicznego spalin w piecach grzewczych” Autor: Monika Zajemska, wydana przez Wyd. Wydziału IPMiFS Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013, ISBN 978-83-63989-12-5.
12. Adachi S., Iwamoto A., Hayashi S., Yamada H., Kaneko S.: Emissions in combustion of lean methane-air and biomass-air mixtures supported by primary hot burned gas in a multi-stage gas turbine combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31, 3131÷3138.

# ОСОБЕННОСТИ СТАДИЙНОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ПЛАМЕННЫХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПА

*Зинченко В.Ю., Иванов В.И., Чепрасов А.И., Каюков Ю.Н.*

*Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина*

## **Аннотация**

Исследованы особенности стадийного сжигания газообразного топлива в пламенных печах камерного типа. Выявлены пути наиболее эффективного дожигания горючих компонентов топлива, а также условия реализации управления стадийным режимом отопления в печах данного типа.

Ключевые слова: пламенная камерная печь, сжигание газообразного топлива, стадийный режим, особенности.

## **Введение**

В условиях непрерывного роста стоимости энергоносителей актуальной задачей в металлургической промышленности Украины является экономия природного газа в пламенных печах камерного типа.

В середине XX века в топках котельных установок начали успешно применять метод стадийного сжигания газообразного топлива [1], который предусматривает искусственное разделение процесса горения в пространстве путем рассредоточенного подвода воздуха и последовательного сжигания частей топлива в конструктивно или газодинамично разделенных зонах.

## **Постановка задачи**

Задачей работы является изучение особенностей стадийного сжигания газообразного топлива в пламенных печах камерного типа, а также выявление условий реализации управления ним в печах указанного типа.

## **Основная часть исследований**

Стадийное сжигание газообразного топлива в пламенных печах камерного типа осуществляется при коэффициенте расхода первичного воздуха  $\alpha_1 < 1,0$  с получением горючей смеси, состоящей из продуктов неполного горения, и последующего ее дожигания непосредственно в газовом потоке.

Рассматривали продукты неполного горения, получаемые на первой стадии сжигания топлива, как горючие компоненты, а процесс дожигания – как процесс смешения данных компонентов со вторичным воздухом непосредственно в рабочей камере печи и последующего сжигания горючей смеси. Тогда, согласно классификации И.Д. Семикина [2], стадийный режим является процессом факельного сжигания с полным внешним перемешиванием.

Скорости нормального распространения пламени для метана и монооксида углерода, которые являются основными горючими компонентами природного и доменного газов, имеют примерно одинаковую величину и зависят как от состава смеси перед дожиганием, так и от коэффициента расхода вторичного воздуха  $\alpha_2$ . Ее максимальное значение для монооксида углерода достигается при  $\alpha_2 < 0,60$ , а для метана – при  $\alpha_2 = 0,97$ . Следовательно, возможно управление скоростью распространения пламени факела, а, следовательно, и распределением температуры вдоль потока продуктов горения топлива изменением коэффициентов расхода первичного  $\alpha_1$  и вторичного  $\alpha_2$  воздуха.

Перемещение зоны дожигания продуктов неполного горения топлива вдоль газового потока достигается смещением места ввода вторичного воздуха и применением принудительного зажигания. Следует учитывать, что локальный ввод холодного вторичного воздуха в зону дожигания приводит к снижению потенциала температуры горючей смеси при  $\alpha_2 \gg 1,0$  и вызывает в процессе управления необходимость контроля и оптимизации коэффициента расхода вторичного воздуха  $\alpha_2$ .

Анализ температурных условий первичного сжигания газообразного топлива, а также вторичного дожигания его горючих компонентов, выполняли на основе составления мгновенных тепловых балансов для каждой стадии. При этом принимали, что горючие компоненты имеют постоянную теплоемкость, сжигание топлива происходит в адиабатных условиях, а холодный воздух, подсасываемый из атмосферы, участвует только в процессе дожигания горючих компонентов.

Уравнение теплового баланса для первой стадии сжигания топлива имеет вид:

$$\left[ Q_{\text{H}}^{\text{p}} \right]_{\alpha_1} = C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_1}^{\text{I}} \cdot T^{\text{I}}, \quad (1)$$

где  $\left[ Q_{\text{H}}^{\text{p}} \right]_{\alpha_1}$  – теплота сгорания топлива на первой стадии при  $\alpha_1$ ;

$C_{\text{n}}$ ,  $V_{\alpha_1}^{\text{I}}$ ,  $\Delta T^{\text{I}}$  – теплоемкость, объемный расход и температура продуктов неполного горения топлива на первой стадии соответственно.

Тогда снижение температуры продуктов горения  $\Delta T^{\text{I}}$  при неполном горении топлива на первой стадии его сжигания определяется как

$$\Delta T^{\text{I}} = T^0 - T^{\text{I}} = \frac{\left[ Q_{\text{H}}^{\text{p}} \right]_{\alpha_1=1}}{C_{\text{n}} \cdot V_0} - \frac{\left[ Q_{\text{H}}^{\text{p}} \right]_{\alpha_1}}{C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_1}}, \quad (2)$$

где индекс «0» – условие полного сжигания топлива.

В пламенных печах камерного типа реализацию второй стадии сжигания топлива можно обеспечить как подачей вторичного воздуха непосредственно в зону дожигания с использованием специальных устройства, так и подсосом холодного воздуха в зону первичного горения через специальные каналы, выполненные в ограждении рабочего объема печи.

При организации подачи вторичного воздуха непосредственно в зону дожигания уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\left[Q_{\text{H}}^{\text{p}}\right]_{\alpha_1}^{\text{ГК}} + C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_1}^{\text{I}} \cdot T^{\text{I}} = V_{\alpha_2}^{\text{II}} \cdot C_{\text{n}} \cdot (T^{\text{I}} + \Delta T^{\text{II}}), \quad (3)$$

где  $\left[Q_{\text{H}}^{\text{p}}\right]_{\alpha_1}^{\text{ГК}}$  – теплота сгорания топлива на второй стадии его сжигания при  $\alpha_1 < 1,0$ ;  $V_{\alpha_2}^{\text{II}}$ ,  $\Delta T^{\text{II}}$  – объемный расход и повышение температуры продуктов горения при дожигании горючих компонентов на второй стадии сжигания топлива соответственно.

Тогда уравнение (3) можно записать как:

$$\Delta T^{\text{II}} = \frac{\left[Q_{\text{H}}^{\text{p}}\right]_{\alpha_1}^{\text{ГК}} + (C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_1} - C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_2}^{\text{II}}) \cdot T^{\text{I}}}{C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_2}^{\text{II}}}. \quad (4)$$

В случае подсосов холодного воздуха в зону первичного горения печи по мере прохождения через рабочую камеру осуществляется подогрев его до температуры, близкой к температуре продуктов горения и уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_1} \cdot T^{\text{I}} + C_{\text{в}} \cdot L_0^{\text{II}} \cdot \alpha_2 \cdot T^{\text{I}} + \left[Q_{\text{H}}^{\text{p}}\right]_{\alpha_1}^{\text{ГК}} = C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_2}^{\text{II}} \cdot (T^{\text{I}} + \Delta T^{\text{II}}), \quad (5)$$

где  $L_0^{\text{II}}$  – объем воздуха, теоретически необходимого для полного дожигания продуктов горения;  $C_{\text{в}}$  – объемная теплоемкость воздуха.

Откуда

$$\Delta T^{\text{II}} = \frac{\left[Q_{\text{H}}^{\text{p}}\right]_{\alpha_1}^{\text{ГК}} + T^{\text{I}} \cdot (C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_1} + C_{\text{в}} \cdot L_0^{\text{II}} \cdot \alpha_2 - C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_2}^{\text{II}})}{C_{\text{n}} \cdot V_{\alpha_2}^{\text{II}}}. \quad (6)$$

Рассматривали отопление печей данного типа смесью природного и доменного газов. Для природного газа использовали опытные результаты по составу продуктов неполного горения в зависимости от коэффициента расхода воздуха  $\alpha_1$  [3], а расчет доменного газа выполняли как для однокомпонентного горючего газа.

По формуле (2) вычисляли снижение температуры продуктов неполного горения на первой стадии сжигания топлива  $\Delta T^{\text{I}}$  (табл. 1).

Таблица 1

Снижение температуры продуктов горения на первой стадии сжигания топлива

Снижение температуры продуктов горения, $\Delta T^I$ :	Коэффициент расхода воздуха, $\alpha_1$				
	0,65	0,70	0,80	0,90	1,0
- в градусах, °С	497,3	482,6	340,3	182,8	-
- в процентах, %	23,3	22,6	15,9	2,5	-

Как следует из анализа расчетных данных на первой стадии сжигания топлива (табл. 1), уменьшение коэффициента расхода воздуха  $\alpha_1$  до 0,65 сопровождается снижением температуры горения на 23,3 %.

С использованием формул (4) и (6) выполняли расчет повышения температуры продуктов горения  $\Delta T^{II}$  на второй стадии сжигания топлива при различных способах подвода вторичного воздуха в зависимости от значений  $\alpha_1$  и  $\Delta T^I$  (табл. 2).

Таблица 2

Температура продуктов горения на второй стадии сжигания топлива<sup>1</sup>

Температура продуктов горения $\Delta T^I$ , °С	Прирост температуры продуктов горения, $\Delta T^{II}$ , °С, при коэффициенте $\alpha_1$ :			
	0,65	0,70	0,80	0,90
400	<u>971,6</u>	<u>839,1</u>	<u>608,7</u>	<u>308,6</u>
	1086,1	759,1	676,6	340,5
1000	<u>803,8</u>	<u>719,0</u>	<u>533,4</u>	<u>284,1</u>
	1090,2	786,3	703,8	363,6

Примечание: в числителе и знаменателе приведены результаты расчетов сжигания топлива при подводе вторичного воздуха в зону дожигания и зону первичного горения соответственно

На второй стадии сжигания топлива наиболее существенное повышение температуры продуктов горения наблюдали при их дожигании с подсосами атмосферного воздуха в зону первичного горения, так как при перемешивании с горючими компонентами воздух к моменту дожигания топлива нагревается до близкой к ним температуре. На значение параметра  $\Delta T^{II}$  определяющее влияние оказывает степень неполноты горения топлива: при  $\alpha_1 = 0,65$  его величина составляет 1090 °С, тогда как при  $\alpha_1 = 0,90$  – не превышает 360 °С.

При подсосе холодного воздуха в зону дожигания, из-за его охлаждающего действия, наблюдается значительно меньшее повышение параметра  $\Delta T^{II}$ , величина которого зависит как от коэффициента  $\alpha_1$ , так и от температуры  $\Delta T^I$ .

## Выводы

Результаты исследований позволили установить, что дожигание продуктов горения с использованием подсосов холодного атмосферного воздуха в зону первичного горения топлива позволяет изменять температуру продуктов горения в более широком диапазоне; управление уровнем температуры на второй стадии сжигания топлива в печах данного типа возможно изменением коэффициента расхода первичного воздуха  $\alpha_1$ ; величину коэффициента расхода вторичного воздуха  $\alpha_2$  необходимо выбирать из условия полного сжигания продуктов горения, а его значения контролировать по результатам газового анализа.

## Список литературы

1. Шульц Л. А. По следам разработки и внедрения печей со стадийным сжиганием топлива и перспективы их развития в металлургии / Л. А. Шульц // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 10. – С. 62–69.
2. Семикин, И. Д. Топлива и топливное хозяйство металлургических заводов : учеб. пособие / И. Д. Семикин, С. И. Аверин, И. И. Радченко. – М. : Металлургия, 1965. – 392 с.
3. Теплотехнические расчеты металлургических печей : учеб. пособие / Б. Ф. Зобнин, М. Д. Казяев, Б. И. Китаев и др. – М. : Металлургия, 1982. – 360 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДИСПЕРСНОМ ВИДЕ

*Орловская С.Г., Калинин В.В., Зуй О.Н., Лисянская М.В.*

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, г. Одесса, Украина*

## **Аннотация**

Проведено физико-математическое моделирование высокотемпературного теплообмена и кинетики химических превращений двухфракционной газозвеси углеродных частиц. Определены характеристики воспламенения и горения частиц газозвеси в воздухе при различных температурах окружающего газа. Доказано, что при уменьшении температуры газа период индукции мелкой фракции может превышать период индукции крупной фракции, а температура горения становится ниже. Найдены критические параметры воспламенения и потухания двухфракционной газозвеси.

Ключевые слова: теплообмен, воспламенение, горение, газозвесь, пылеугольное топливо, углеродные частицы.

## **Введение**

Актуальность исследований обусловлена необходимостью создания эффективных методов сжигания углеродных топлив в газодисперсном виде. В металлургическом производстве пылеугольное топливо вдувается в реакционный объем доменной печи и сгорает в виде газозвеси. Топливо, используемое в энергетических устройствах, содержит частицы разного размера. Разновидностью такого топлива является двухфракционная газозвесь. Целью работы является изучение закономерностей воспламенения, горения и потухания двухфракционной взвеси углеродных частиц в воздухе при различных температурах.

Проведено физико-математическое моделирование высокотемпературного теплообмена и кинетики химических превращений совокупности углеродных частиц в газовой среде, содержащей окислитель. Для расчетов выбиралась двухфракционная газозвесь с диаметрами частиц мелкой фракции 60 мкм, крупной фракции 120 мкм и равными массовыми концентрациями фракций. Исследования проводились для температур газа в реакционной камере от 1100 до 1500 К.

## **Постановка задачи**

Физико-математическая модель высокотемпературного теплообмена газозвеси углеродных частиц включает дифференциальные уравнения теплового и массового баланса для частиц каждой из фракций и соответственные уравнения для газовой смеси, содержащей окислитель [1].

При попадании частиц в нагретый окислитель на их поверхности и в порах начинают протекать химические реакции, в результате чего, частицы воспламеняются и горят. Суммарную плотность химического

тепловыделения для частицы  $i$ -той фракции в результате поверхностного и внутреннего реагирования при двух параллельных реакциях ( $C + O_2 = CO_2$  (I),  $2C + O_2 = 2CO$  (II) [2]), найдем из выражения [3]:

$$q_{chi} = (k_{1i}q_1 + k_{2i}q_2)\rho_g n_{O_2,si} (1 + K_i), \quad K_i = \frac{k_{vi}}{k_{1i} + k_{2i}}, \quad (1)$$

где  $q_{chi}$  – суммарная плотность химического тепловыделения на поверхности и в порах частицы,  $k_{1i}, k_{2i}$  – константы скоростей химических реакций (I) и (II),  $q_1, q_2$  – тепловые эффекты химических реакций (I) и (II),  $\rho_g$  – плотность газа,  $n_{O_2,si}$  – относительная массовая концентрация кислорода на поверхности углеродной частицы,  $K_i$  – отношение констант внутреннего и поверхностного реагирования,  $k_{vi}$  – эффективная константа внутреннего реагирования.

В камере сгорания происходит молекулярно-конвективный ( $q_{\alpha i}$ ) и лучистый теплообмен ( $q_{wi}$ ) частиц с нагретым газом и со стенками реакционного объема. Плотности этих потоков найдем из уравнений:

$$q_{\alpha i} = q_{\lambda i} + q_{sfi}, \quad q_{\lambda i} = \alpha_i(T_i - T_g), \quad \alpha_i = \frac{Nu\lambda_g}{d_i}, \quad (2)$$

$$q_{wi} = \varepsilon \sigma (T_i^4 - T_w^4), \quad (3)$$

где  $q_{\lambda i}$  – составляющая плотности теплового потока, обусловленная молекулярно-конвективным теплообменом,  $q_{sfi}$  – составляющая плотности теплового потока, обусловленная стефановским течением [4],  $\alpha_i$  – коэффициент теплообмена частицы с газом,  $T_i, T_g, T_w$  – соответственно, температуры частицы, газа и стенок реакционной камеры,  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа,  $d_i$  – диаметр частицы.

Запишем уравнения теплового и массового баланса для частицы  $i$ -той фракции:

$$\frac{c\rho_i d_i}{6} \frac{\partial T_i}{\partial t} = q_{chi} - q_{\alpha i} - q_{wi}, \quad T_i(t=0) = T_{ib}, \quad (4)$$

$$-\frac{1}{2}\rho_i \frac{\partial(d_i)}{\partial t} = W_{si}, \quad W_{si} = \frac{M_C}{M_{O_2}}(k_{1i} + 2k_{2i})n_{O_2,si}\rho_g, \quad d_i(t=0) = d_{bi}, \quad (5)$$

$$-\frac{1}{6}d_i \frac{\partial(\rho_i)}{\partial t} = W_{si} K_i, \quad \rho_i(t=0) = \rho_{bi}. \quad (6)$$

Здесь  $c$  – удельная теплоемкость частицы,  $\rho_i$  – плотность частицы,  $t$  – время,  $M_C, M_{O_2}$  – молярные массы углерода и кислорода, соответственно.

При горении пылеугольной взвеси в реакционном объеме изменяются с течением временем температура газа и концентрация кислорода. Уравнения теплового и массового балансов для газа с учетом внешнего тепло – и массообмена имеют вид:

$$c_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \sum_{i=1}^n S_i C_{N_i} q_{\alpha i} + \alpha_g F_g (T_g - T_{g\infty}), \quad T_g(t=0) = T_{g\infty}, \quad (7)$$

$$-\frac{\partial n_{O_2g}}{\partial t} = \sum_{i=1}^n C_{N_i} S_i n_{O_2,s_i} (k_{1i} + k_{2i} + k_{vi}) - F_g \beta_g (n_{O_2,\infty} - n_{O_2g}), \quad (8)$$

$$n_{O_2g}(t=0) = n_{O_2,\infty},$$

где  $c_g$  – удельная теплоемкость газа,  $S_i$  – площадь поверхности частицы,  $F_g$  – удельная поверхность газозвеси,  $n_{O_2,g}$  – относительная массовая концентрация кислорода в газе,  $\alpha_g, \beta_g$  – коэффициенты теплообмена и массообмена газозвеси с окружающей средой,  $C_{N_i}$  – численная концентрация частиц  $i$ -той фракции, которая связана с массовой концентрацией углеродного топлива соотношением:

$$C_{m_i} = \frac{1}{6} \pi \cdot d_i^3 \cdot \rho_i \cdot C_{N_i}, \quad C_m = \sum_{i=1}^n C_{m_i}.$$

### Результаты и их обсуждение

Расчеты представленных уравнений позволяют определить основные характеристики горения газозвеси: время задержки воспламенения (период индукции), время и температуру горения, критические параметры воспламенения и потухания.

На рис. 1 представлены временные зависимости температур частиц каждой из фракций, температуры газа, производных температур частиц по времени при горении двухфракционной ( $i=2$ ) газозвеси для различных температур газа. Начальная массовая концентрация углеродного топлива в газозвеси составила  $C_{mb} = 0,0244$  кг/м<sup>3</sup>, массовые концентрации каждой из фракций равны:  $C_{mb_1} = C_{mb_2} = 0,0122$  кг/м<sup>3</sup>. Газозвесь с указанной массовой концентрацией характеризуется коэффициентом избытка кислорода, равным единице. Экстремумы на зависимостях  $dT/dt(t)$  позволяют определить моменты воспламенения (т.  $I$ ) и потухания (т.  $E$ ) частиц и найти, соответственно, время задержки воспламенения и время горения.

Анализ температурных кривых показывает, что при высокой температуре газа сначала происходит воспламенение и выгорание мелкой фракции (рис. 1, а-б). Частицы крупной фракции воспламеняются незадолго до момента потухания мелких частиц. За время выгорания мелкой фракции концентрация кислорода существенно уменьшается, поэтому возгорание и последующее горение крупной фракции происходит при низких ее значениях.

При более низкой температуре газа (рис. 1 в-г) раньше воспламеняются крупные частицы (кривые 2). Согласно формулам (2) мелкие частицы имеют больший коэффициент теплоотдачи, поэтому увеличение времени воспламенения мелкой фракции по сравнению с круп-

ной, объясняется ростом теплового потока от частиц малых размеров при понижении температуры газа. При этом увеличивается время химической составляющей периода индукции (длительность прогрева от  $t. I^*$  до  $t. I$ , рис. 1 г, кривая 1).

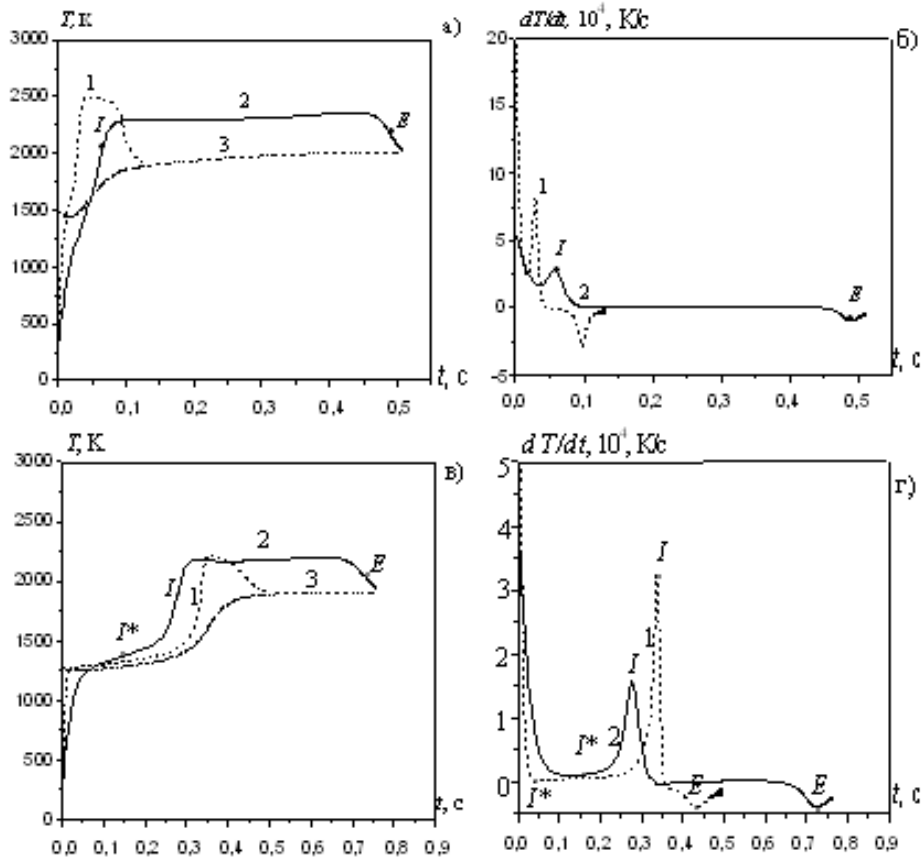


Рис. 1. Зависимости  $T$ ,  $T_g$ ,  $dT/dt$  от времени для двухфракционной газозвеси: а- б) -  $T_{g\infty} = T_w = 1500$  К; в-г) -  $T_{g\infty} = T_w = 1300$  К;  
 1 -  $d_{b1} = 60$  мкм, 2 -  $d_{b2} = 120$  мкм,  
 3 - температура газа  $T_g$ .  $Cmb = 0.0244$   $kg/m^3$

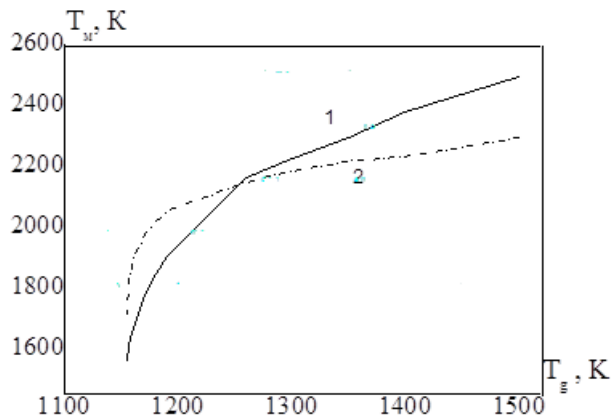


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры горения частиц газозвеси от температуры газа:  
 1 - фракция  $d_{b1} = 60$  мкм; 2 - фракция  $d_{b2} = 120$  мкм

Анализ температуры горения пылеугольной взвеси (рис. 2) показал, что в области высоких температур газа температура горения частиц мелкой фракции значительно выше, чем крупной, а в области низких  $T_g$  она становится меньше по причине больших теплопотерь молекулярно-конвективным путем к газу.

### **Выводы**

Установлено, что в области высоких температур газа ( $T_g > 1400\text{K}$ ) период индукции двухфракционной газозвеси определяется временем воспламенения мелких частиц, ниже этого значения – временем воспламенения частиц крупной фракции. Доказано, что при уменьшении температуры газа температура горения мелкой фракции взвеси существенно понижается, вследствие увеличения теплоотдачи.

### **Список литературы**

1. Орловська С. Г. Дослідження закономірностей горіння газозависів вуглецевих частинок // Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т. 16, № 1. – С. 210–216.
2. Померанцев В. В. Основы практической теории горения. – Л. : Энергия, 1973. – 263 с.
3. Орловская С. Г., Калинин В. В., Зуй О. Н. Влияние внутреннего реагирования на характеристики высокотемпературного теплообмена газозвесей углеродных частиц // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 5. – С. 746–753.
4. Калинин В. В., Орловская С. Г., Калинин А. И, Дубинский А. В. Теплообмен углеродной частицы с воздухом при учете стефановского течения и теплопотерь излучением // Теплофизика высоких температур. – 1996. – Т. 34, № 1. – С. 83–91.

# ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛОК НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ ПЕРЕРАБОТКИ ЛОМА И ОТХОДОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

*Сезоненко А.Б., Васечко А.А.*

*Институт газа НАН Украины, г. Киев, Украина*

## **Аннотация**

Сегодня, стабильно высокий уровень цен на природный газ стимулирует внедрение техники и технологий, способствующих экономии энергоносителей, повышению эффективности их использования. Данный вопрос особенно актуален для отраслей с традиционно высокими удельными показателями энергопотребления – черная, цветная металлургия. В докладе изложены материалы многолетнего опыта внедрения регенеративных горелок для отопления отражательных плавильных печей, предназначенных для металлургического передела лома и отходов цветных металлов и их сплавов.

Ключевые слова: регенератор, регенеративная горелка, отражательная печь, система отопления, эффективность.

## **Введение**

На сегодняшний день ни для кого не секрет, что регенеративные горелки, оборудованные компактным короткоцикловым регенератором, являются высокоэнергоэффективным средством отопления промышленных печей, и имеют массовое применение в мировой металлургической практике.

В Украине также накоплен достаточный опыт опытно-промышленного и промышленного применения таких устройств. В частности, Институт газа имеет 20-и летний опыт. Основная схема конструктивного устройства регенеративной горелки приведена на рис. 1.

Согласно теории, применение регенеративных горелок (далее по тексту – РГ) экономически обосновано при температуре печного пространства более 800 °С.

Средняя рабочая температура отражательных алюмоплавильных печей составляет от 900 °С (при получении обычных сплавов) до 1000 °С (при получении высокотемпературных сплавов), что отвечает условиям эффективного применения РГ. При таких параметрах, температура подогрева воздуха составляет на 150...200 °С от рабочей температуры в плавильной зоне.

## **Постановка задачи**

Приведем ряд особенностей работы плавильных печей с РГ при переплаве лома и отходов алюминиевых сплавов:

– отечественные печи, как правило, работают в «рваном» цикле, с периодическими длительными простоями, частыми разогревами и остановками агрегатов;

- чистота и качество исходной шихты – лома алюминиевых сплавов – ухудшается. Рыночная конъюнктура заставляет предприятия работать с весьма загрязненными ломом;
- кампания работы печей до проведения капитального ремонта, как правило, увеличивается от нормальных 5- и лет до 8...10 и более лет (в моей практике есть печи, проработавшие 18 лет без капитального ремонта!);
- агрессивная и высокозапыленная печная среда, особенно в периоды расшихтовки, выгорания покрытий, выпаривания органических и неорганических веществ с загруженного лома;
- необходимость применения высокоактивных хлористых и фтористых соединений для вывода оксидов на поверхность, повышения выхода годного сплава;
- неоднородный состав исходного сырья;
- достаточно широкая номенклатура заданных к получению сплавов;
- относительно продолжительное время печь находится с открытой загрузочной дверью, площадь которой на печи с объемом ванны-накопителя 20 тонн по алюминию составляет до 5 м<sup>2</sup>;
- контролируемое содержание кислорода в печной среде (для минимизации перехода алюминия в оксид – безвозвратные потери).

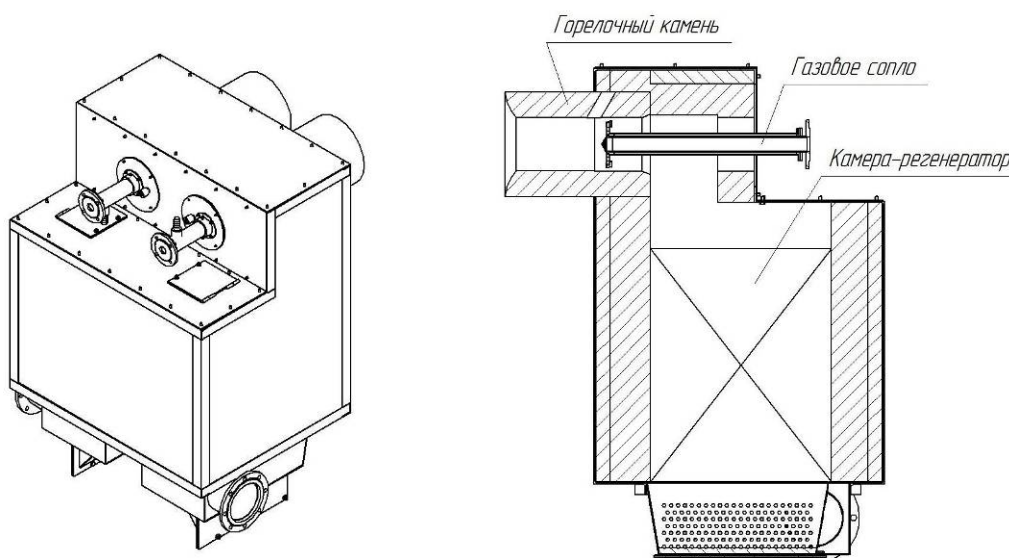


Рис. 1. Схема устройства регенеративной горелки

### Основные результаты исследований

Ниже представлен обзор практически используемых на сегодняшний день в промышленности устройств, разработанных группой Отдела проблем промышленной теплотехники Института газа НАН Украины.

Рабочая группа отдела проблем промышленной теплотехники нашего института с 1998 года занимается разработкой ПКД плавильных печей с системой отопления, оборудованной кок рекуператорами, так и регенеративными горелками.

Ниже приведены схемы двух наиболее характерных вариантов компоновки печей. На рис. 2 показана схема стационарной отражательной алюмоплавильной печи с сухим наклонным подом. Печь имеет независимые системы отопления зоны плавления и копильника, оборудованные РГ с компактным короткоцикловым регенератором. В качестве насадки используются корундовые шары 25 мм в диаметре. Горелки оборудованы автоматическими постоянно действующими запальниками – пилотами. Система отопления печи автоматически выключается при открывании загрузочной двери.

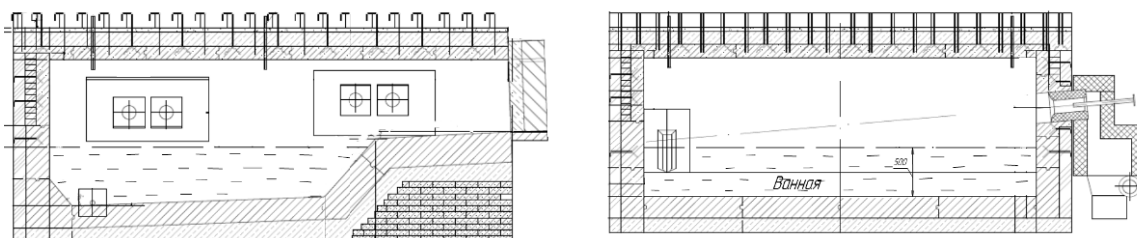


Рис. 2. Схема плавильной печи с регенеративными горелками

На рисунке 3 – фото печного агрегата с объемом ванны 20 тонн. Размеры печи в плане 5×5 м. Номинальная мощность каждой из двух горелок – 850 кВт.

Удельный расход природного газа не превышает 110 м<sup>3</sup> на тонну готовой продукции.

На рисунке 4 приведена схема роторной наплавочной камеры, установленной на наклонную в двух направлениях платформу. Габаритная длина по корпусу наплавочной камеры – 5 м, диаметр – 3 м.

Объем расплава в печи – до 3-х тонн.

Печь оборудована одной РГ, номинальной мощностью 1,0 МВт.

Удельный расход газа на получение 1 т расплава не превышает 85 м<sup>3</sup>.

На рисунке 5 – фото действующей установки на одном из киевских предприятий.

Продукты сгорания, в данных конструкциях печных агрегатов, удаляются через насыпную шаровую насадку компактных регенераторов, оставляя в насадке, помимо возвратного энергетического потенциала, большую часть пылеуноса (оксидов металлов). Конструктив камер регенераторов позволяет производить извлечение насадки для ее очистки без останова печи.



Рис. 3. Фото плавильной печи объемом 20 тонн.  
Фронтальный вид на систему отопления

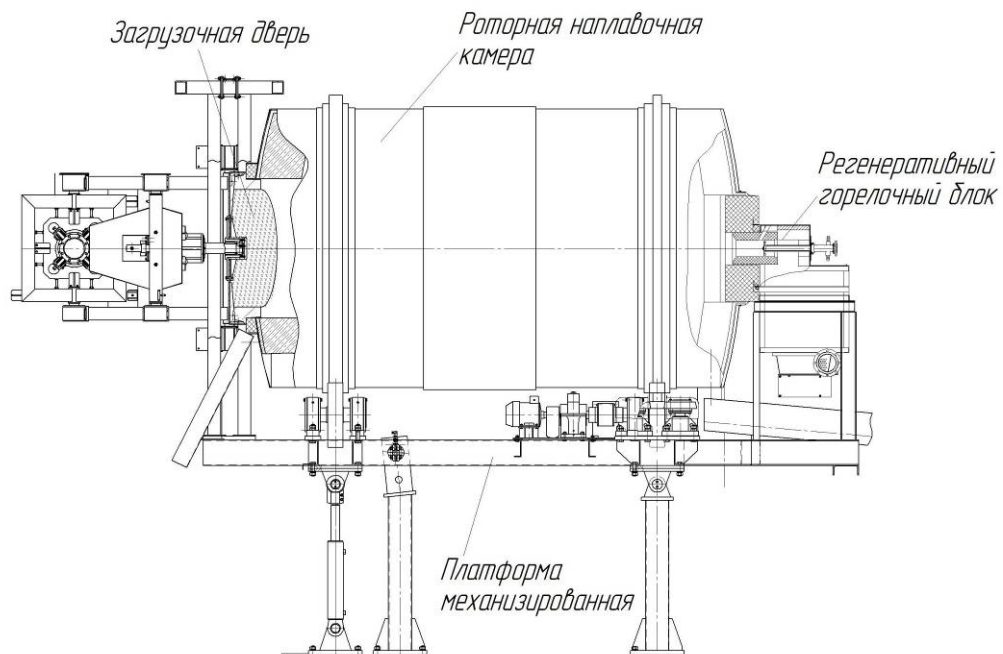


Рис. 4. Роторная наплавочная камера с регенеративной горелкой



Рис. 5. Фото роторной алюмоплавильной печи

Один комплект шаровой насадки служит до 5 лет.

В зависимости от степени загрязнения переплавляемого лома, насадка очищается от одного до четырех раз в месяц. Период замены насадки – 10...15 минут.

Для сравнения, удельный расход газа в отражательной печи, оборудованной модульно-струйными рекуператорами типа РМС, с нулевым сопротивлением по дымовой стороне, составляет 140 м<sup>3</sup> на тонну готового расплава.

В настоящий момент, в разработке находится регенеративная плоскопламенная горелка, а также горелка на коксо-доменной газовой смеси.

### **Выводы**

В целом, практическое применение РГ на специализированных предприятиях переработки лома и отходов цветных металлов, за счет существенного снижения топливной составляющей техпроцесса, позволяет добиться главного показателя – достижения конкурентноспособной цены на получаемую продукцию.

Практическим путем доказана высокая эффективность использования РГ. При относительно небольших капитальных затратах, удельные показатели расхода природного газа на тонну годного марочного сплава могут быть снижены более чем в два раза по сравнению с традиционной системой отопления, оборудованной поверхностными рекуператорами.

# ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОГО ГОРЮЧЕГО НА ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

*Сорока Б.С.<sup>1</sup>, Воробьев Н.В.<sup>1,2</sup>, Sandor P.<sup>3</sup>,  
Воробьев А.В.<sup>1</sup>, Карабчиевская Р.С.<sup>1</sup>*

*1 – Институт газа НАН Украины, Киев, Украина*

*2 – Национальный технический университет Украины «Киевский  
политехнический институт им. Игоря Сикорского», г. Киев, Украина*

*3 – Optimum Energo-Ecology Ltd, г. Дунайварош, Венгрия*

## **Аннотация**

С использованием методов равновесной термодинамики проведены исследования энергетических и экологических характеристик влияния увлажнения реагирующего потока на процессы сжигания смесей технологических газов (коксового и доменного) с воздушным окислителем.

Установлена возможность значительного улучшения экологических характеристик процесса горения при увлажнении газо-воздушной смеси, что вызвано уменьшением образования оксидов азота  $\text{NO}_x$ . Однако, наличие влаги неизбежно приводит к снижению КПД использования топлива в энергетическом агрегате.

Удельные выбросы на единицу полезной энергии рассчитываются с учетом КПД по термодинамическим данным.

Ключевые слова: водяной пар, двуокись углерода, КПД использования топлива, технологические газы, оксиды азота.

## **Введение**

В последнее время получают распространение системы и устройства, обеспечивающие сжигание различных видов топлива при подаче воды или водяного пара (процессы «wet combustion») в камеры сгорания (КС) двигателей, турбин, котлоагрегатов, а также в когенерационные установки. Развитие научных основ «wet combustion» при соответствующей разработке систем сжигания и утилизации теплоты обусловлено эксплуатационными, экологическими и в отдельных случаях – энергетическими преимуществами использования увлажненного воздуха горения. С другой стороны имеется немало случаев получения увлажненных топлив, например, после очистки от пыли технологических газов или в результате газификации влажной биомассы.

## **Постановка задачи**

До 2013 – 14 гг. Украина занимала лидирующее положение в Европе по использованию технологических газов в экономике. Так, обработка данных Государственного комитета энергосбережения Украины позволяет сделать вывод, что доля биогаза в 2014 г. была в 443 раза меньше, чем технологических газов (доменного BFG, коксового COG, топлива газовых заводов и других утилизируемых газов), из которых

коксовый и доменный газ составляют свыше 98 % их общего расхода. В то же время доля производства технологических газов (derived gases, recovered gases) по отношению к природному газу составляет 13,3 %.

Особенностью коксового и доменного технологических газов является их использование как топлива после «мокрой» очистки, с внесением в процесс дополнительной влаги топлива.

Важным достоинством сжигания увлажненной горючей смеси являются экологические преимущества, обусловленные существенным снижением выхода оксидов азота NO (NO<sub>x</sub>) и возможностью определенного сокращения образования оксида углерода CO. В данной работе будем рассматривать только влияние увлажнения окислителя на образование NO<sub>x</sub>.

Задачей настоящей работы является определение общих тенденций влияния увлажнения окислителя на энергетические и экологические аспекты сжигания увлажненных технологических газов.

### **Определение энергетической эффективности процесса сжигания топлива**

Методика определения КПД использования топлива в идеальной печи в термических полных энтальпиях предложена проф. Б.С. Сорокой и базируется на теореме Карно. Выражение для определения КПД имеет вид:

$$\eta_f = \frac{I_{in} - I_{fl,ex}}{\Delta I_{g,T^*}^*} = \frac{i_{CH_4} m_{CH_4} + i_a m_a + i_{H_2O} m_{H_2O} - i_{fl,ex} m_g}{\Delta i_{g,T^*}^* \cdot m_{in}}, \quad (1)$$

здесь  $I_{in}$ ,  $I_{fl,ex}$  – полная энтальпия потока исходных компонентов горения на входе в топочную камеру и потока продуктов сгорания на выходе из нее – соответственно (с учетом latent heat – скрытых теплот физических и химических превращений) кВт;  $i$  – удельная (на 1 кг потока компонента или продуктов сгорания) полная энтальпия; кДж/кг;  $\Delta i_{g,T^*}^*$  – удельная избыточная энтальпия единицы массы стехиометрических продуктов сгорания при теоретической температуре горения  $T^*$  по сравнению с таковой при стандартной температуре  $T_0 = 298$  К:

$$\Delta I_{g,T^*}^* = I_{g,T^*}^* - I_{g,T_0}^* = Q_{T_0}, \quad (2)$$

где  $Q_{T_0}$  – тепловой эффект реакции горения потока исходных компонентов при стандартной температуре  $T_0 = 298$  К.

В качестве начальных данных к расчету были использованы газы комбината «Запорожсталь», где при реконструкции цеха холодной прокатки была предусмотрена возможность работы термических печей на природном газе или технологических смешанных газах (коксовом и доменном). В летний период предусматривается работа терми-

ческих печей на коксо-доменной смеси, в зимний период на природно-доменной смеси. В соответствии с данными «Запорожстали» среднегодовая температура коксового газа 35 °С (минимум 20 °С, максимум 45 °С), относительная влажность 100 % при рабочей температуре, среднегодовая температура доменного газа 35 °С (минимум 20 °С, максимум 65 °С), относительная влажность 100 % при рабочей температуре, расчетная температура природного газа 10 °С, газ сухой, среднегодовая температура смешанного газа 45 °С (минимум 30 °С, максимум 75 °С), относительная влажность 100 % при рабочей температуре.

На рис. 1 представлена зависимость КПД использования топлива в печи (в топочной камере)  $\eta_f$  в зависимости от температуры влажного (насыщенного) горючего газа – для смеси влажного 50 % / 50 % коксо-доменного, а также 50 % доменного и 50 % природного газа.

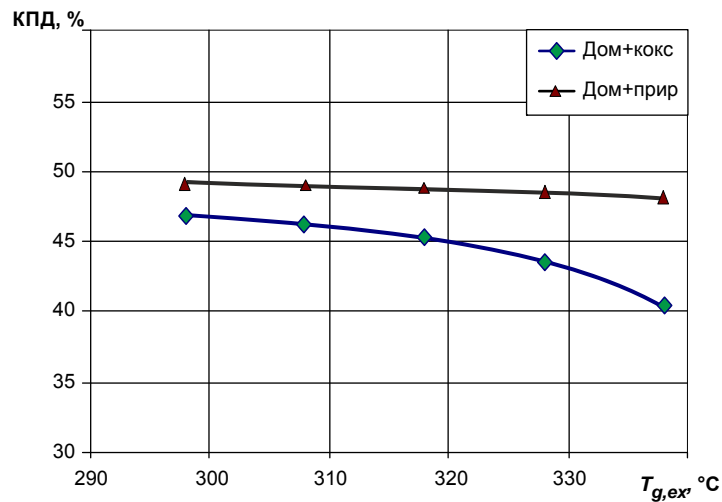


Рис. 1. Зависимость КПД использования топлива  $\eta_f$  от температуры  $t_f$  горючего газа при относительной влажности коксового и доменного газа  $\varphi_f = 100$  %.  
 Воздух – сухой  $\varphi_a = 0$  %, природный газ сухой  $\varphi_{NG} = 0$  %. Температура на выходе из топочной камеры (рабочая температура):  $t_{fl} = 1000$  °С

Из рис. 1 видно, что при рассматриваемом уровне температур  $t_f$  использование природно-доменной смеси приводит к незначительному (~1 %) понижению КПД с ростом  $t_f$ , обусловленному влагой в одной составляющей топлива. В свою очередь для коксодоменной смеси падение КПД использования топлива при таком росте  $t_f$  составляет ~6,4 %. Во втором случае пар, насыщающий газ, содержится в обоих составляющих топлива. Более высокие значения  $\eta_f$  при использовании доменно-природной смеси, чем коксодоменной, несмотря на более низкую теоретическую температуру горения  $T_T$  связано с меньшим влагосодержанием первого из топлив. Из рис. 1 следует, что КПД  $\eta_f$

падает по мере роста температуры влажного газа  $t_f$  вследствие повышения абсолютного влагосодержания газа с ростом  $t_f$  при  $\varphi_f = const$ . Более крутое снижение  $\eta_f(t_f)$  для коксодоменной смеси также определяется более высоким абсолютным влагосодержанием этого газа в условиях насыщения ( $\varphi_f = 100\%$ ), нарастающим с ростом температуры  $t_f$ .

### Определение экологических характеристик сжигания для увлажненных топливных смесей

Для анализа влияния состава топливоокислительной смеси на образование вредных веществ: оксидов азота  $\text{NO}_x$  как основных токсичных газов и  $\text{CO}_2$  как основного парникового газа был использован *метод энергоэкологического анализа*, развитый проф. Б. С. Сорокой [1]. Суть его состоит в определении удельного выхода  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$  по данным расчетов термодинамически равновесного состава и свойств продуктов сгорания, а также при учете КПД использования топлива  $\eta_f$ .

Для оценочного определения и сравнения выбросов оксидов азота  $C''_{\text{NO}_x}$  и углекислоты  $C''_{\text{CO}_2}$ , отнесенных к единице полезно воспринятой теплоты, использовались следующие расчетные зависимости, исходя из значений определяющей температуры:

$$C''_{\text{CO}_2}(T_{g,ex}) = \frac{10^{-2} D_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2}}{(\Delta I_{g,T} - \Delta I_{g,ex}) M_{g,ex}}; \quad (3)$$

$$C''_{\text{NO}_x}(T_T) = \frac{10^{-2} (D_{\text{NO}} M_{\text{NO}} + D_{\text{NO}_2} M_{\text{NO}_2})}{(\Delta I_{g,T} - \Delta I_{g,ex}) M_{g,T}}, \quad (4)$$

$C''_Y$  – удельный выход компонента  $Y \equiv \text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ),  $\text{CO}_2$ , отнесенный к единице полезной теплоты, кг/кДж;  $D_Y$  – объемная доля компонента  $Y$  (концентрация объемная, молярная), % об.;  $\Delta I_{g,T}$ ,  $\Delta I_{g,ex}$  – полная избыточная энтальпия 1 кг продуктов сгорания – при  $T_T$  и температуре уходящих продуктов сгорания  $T_{g,ex}$ , принимаемой равной технологической температуре – соответственно. Представительные температуры и молярные массы смеси: для  $\text{CO}_2$  – при  $T_{g,ex}$  К, для  $\text{NO}_x$  –  $T_T$ ;  $M_Y$  – молярная масса (для компонента  $Y$  и условная для продуктов сгорания (индекс «g»)).

На рис. 2 представлено изменение  $C''_{\text{CO}_2}$  и  $C''_{\text{NO}_x}$  в зависимости от температуры  $t_f$  газа увлажненного до насыщения в условиях очистки коксового и доменного газа. Видно, что увеличение абсолютного влагосодержания технологических газов с температурой увеличивает выбросы двуокси углерода  $C''_{\text{CO}_2}$  и снижает  $C''_{\text{NO}_x}$  на единицу полезной тепловой энергии.

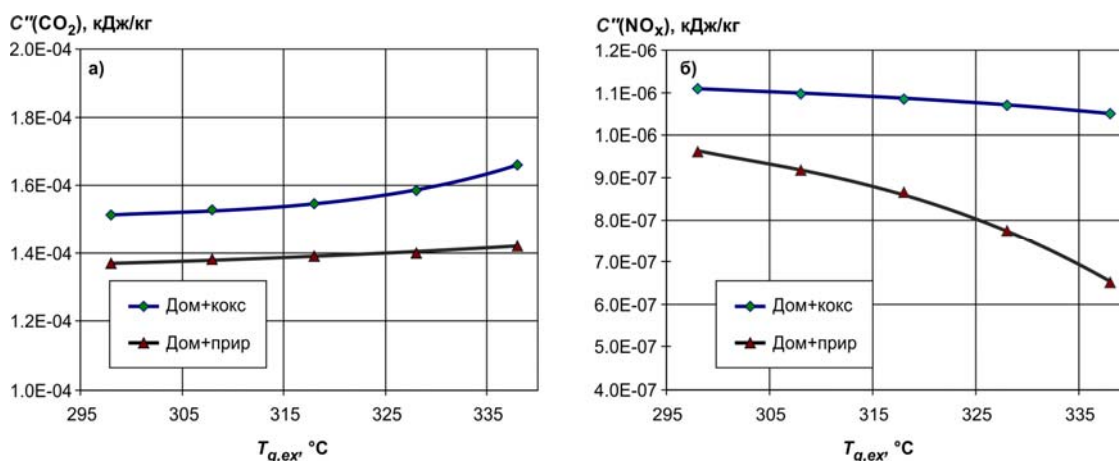


Рис. 2. Зависимость отнесенных к единице полезной теплоты выбросов углекислоты  $C''_{CO_2}$  (а) и выбросов оксидов азота  $C''_{NO_x}$  (б) от температуры  $t_f$  смешанного газа при относительной влажности  $\varphi_f = 100\%$ . Температура на выходе из топочной камеры (рабочая температура):  $t_{fl} = 1000\text{ °C}$

### Выводы

В результате проведенных расчетных исследований установлено, что при использовании смесей влажных технологических газов КПД использования топлива  $\eta_f$  падает по мере роста температуры влажного газа  $t_f$  вследствие повышения абсолютного влагосодержания газа с ростом  $t_f$  при  $\varphi_f = const$ . В тоже время, отмечается увеличение выбросов двуоксида углерода  $C''_{CO_2}$  и снижение  $C''_{NO_x}$  на единицу полезной тепловой энергии при увеличении абсолютного влагосодержания технологических газов с температурой.

### Список литературы

1. Сорока Б. С., Корниенко А. В. Сравнительный энергоэкологический анализ использования альтернативных газовых топлив различного происхождения // ISJAEE Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2012. – № 07 (111). – С. 105–112.

# РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОРЕЛОК ЧАСТИЧНОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

*Чепрасов А.И., Каюков Ю.Н., Баилий С.В.*

*Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина*

## **Аннотация**

В статье приведены результаты разработок, промышленного опробования и использования горелок для нагревательных и термических печей. Для расширения пределов регулирования горелок по тепловой мощности и коэффициенту расхода воздуха был использован принцип частичного предварительного смешения топлива и воздуха. Исследования разработанных горелок были проведены на огневом стенде и промышленных печах. В настоящее время разработанные горелки успешно эксплуатируются на термических и нагревательных печах завода «Днепрспецсталь».

Ключевые слова: горелочное устройство, частичное предварительное смешение топлива и воздуха, расширение пределов регулирования, промышленное опробование, надежность работы.

## **Введение**

Проблема повышения эффективности работы печей различного назначения является комплексной, с множеством взаимосвязанных параметров. Работа современной системы автоматического управления нагревом металла в промышленных печах невозможна без надежной работы горелочных устройств и других элементов, обеспечивающих их работу.

В Запорожской государственной инженерной академии под руководством профессора М.П. Ревуна, начиная с 70-х годов, проводились работы по созданию, исследованию и внедрению горелочных устройств, способов отопления нагревательных и термических печей, способов нагрева металла. Группа профессора М.П. Ревуна постоянно поддерживала творческие связи с металлургическими заводами и другими вузами.

## **Постановка задачи**

В металлургии основу горелочного парка составляют горелки, имеющие ограниченный диапазон изменения рабочих характеристик. Для удовлетворения современных требований к печному оборудованию конструкции горелок все более специализируются. Следует обратить внимание на разработку и освоение силами промышленных предприятий горелочных устройств, которые были бы просты в изготовлении и надежны в работе.

Для отработки конструкции горелок и исследования их работы совместно с теплотехнической лабораторией завода «Днепрспец-

сталь» был изготовлен огневой стенд, позволяющий использовать различные виды газообразного топлива, сжатый воздух и кислород. Промышленные опробования и испытания разработанных горелок проводились на действующих печах.

### **Решение поставленной задачи**

Наиболее распространенными горелочными устройствами являются прямоточные горелки типа ГНП и «труба в трубе». Далее приведены результаты разработок, исследований, промышленного опробования и использования горелочных устройств подобного типа.

Для расширения пределов регулирования горелок ГНП по тепловой мощности и коэффициенту расхода воздуха был использован принцип частичного предварительного смешения топлива и воздуха, необходимого для горения. В новом наконечнике газового сопла, который имеет форму цилиндрического стакана, отверстие для подачи топлива расположено на его входной, донной части [1, 2]. Подсос части воздуха внутрь сопла через боковые отверстия происходит из-за разрежения, создаваемого газовыми струями. Количество первичного воздуха зависит от конструктивных параметров наконечника газового сопла и соотношения расходов топлива и воздуха, подаваемого на горелку. Такой принцип двухэтапного подвода воздуха и предварительного смешения топлива с частью воздуха повышает надежность работы горелки и расширяет пределы ее регулирования.

Установлено, что горелочное устройство работает устойчиво на доменном, коксовом и природном газе, а также их смесях. Диапазон регулирования тепловой мощности достигает 1:25, а коэффициент расхода воздуха 1:5 [3]. Два типоразмера горелок прошли приемочные испытания в Государственном центре по испытанию и внедрению топливоиспользующего оборудования и разрешены к использованию.

Представляет интерес конструкция горелки, в которой наряду с широкими пределами регулирования была бы возможность управлять длиной и светимостью факела. Это достигается изменением доли первичного воздуха и степени его перемешивания с топливом. С целью регулирования параметров факела и повышения эксплуатационной надежности горелки нами разработана конструкция, в которой поперечная перегородка с отверстиями для прохода газа установлена в газовом сопле с возможностью продольного перемещения [4, 5]. При изменении требований к характеристикам факела поперечная перегородка при помощи штока перемещается вдоль оси газового сопла относительно радиальных отверстий, при этом изменяется количество первичного воздуха, поступающего в сопло, что обеспечивает изменение параметров факела. Было исследовано четыре варианта подвижной перегородки. Установлено, что для всех видов пере-

городок возможна стабильная работа горелок при увеличении коэффициента расхода воздуха от 1 до 11, а на малых расходах топлива – до 14 – 17.

В настоящее время горелки, разработанные на базе горелок ГНП, успешно эксплуатируются на термических и нагревательных печах трех цехов завода «Днепрспецсталь».

Принцип частичного предварительного смешения топлива и воздуха был использован при разработке горелок установки сушки и разогрева футеровки сталеразливочных ковшей. Отличительным элементом горелки является наличие участка внезапного расширения, в зоне которого создается разрежение и располагаются отверстия для подсоса первичного воздуха. Таким образом, удалось использовать кинетическую энергию газовой струи для обеспечения предварительного смешения топлива и воздуха. Было проведено большое количество опытов с различными вариантами конструкций горелки [6]. Анализ результатов исследований показал необходимость создания дополнительных сопротивлений в газовом тракте горелки. Усовершенствование исходной конструкции заключалось во введении в газовую трубу перфорированной перегородки с радиально-шахматным расположением отверстий и установке рассекателей (завихрителей) на выходе газоздушнoй смеси из камеры предварительного смешения. Это позволяет значительно расширить диапазон регулирования, повысить экономичность и эксплуатационную надежность горелки.

Наряду с горелками ГНП широкое применение нашли горелки типа «труба в трубе». Они характеризуются простотой конструкции, однако узкий диапазон регулирования горелок усложняет их обслуживание, исключает ступенчатое изменение расходов газа и воздуха, что затрудняет автоматизацию печей и делает невозможным применение импульсного отопления без замены горелок. Этих недостатков лишены горелки частичного предварительного смешения, имеющие наконечник газового сопла в форме цилиндрического стакана с перфорированной донной и боковой поверхностью. Одна из модификаций горелки была разработана на базе горелок типа «труба в трубе» для коксодоменной смеси [3]. Горелки устойчиво работают на топливе с различной теплотой сгорания и обеспечивают большой диапазон регулирования тепловой мощности и коэффициента расхода воздуха. Это позволило использовать их для реализации автоматического управления зональным режимом отопления в печах термического цеха завода «Днепрспецсталь». Однако, при длительной эксплуатации в горелках, использующих коксодоменную смесь, постепенно зарастают отверстия за счет отложения парафинов, что усложняет ее эксплуатацию.

Исключить этот недостаток удалось с помощью новой горелки частичного предварительного смешения, разработанной группой профессора М.П. Ревуна на базе горелок типа «труба в трубе» [7]. Отличительной особенностью конструкции является то, что центральная газовая труба на выходном конце снабжена цилиндрическим наконечником в форме стакана, который имеет плавный обтекатель с воздушной стороны и участок внезапного расширения со стороны газового канала, при этом входные каналы первичного воздуха расположены на участке внезапного расширения. Расположение воздушных каналов в зоне устойчивого разрежения обеспечивает подсос необходимого количества первичного воздуха для качественного смешения с топливом. Это обеспечивает существенное расширение пределов регулирования горелок.

Испытания горелок в условиях термического цеха завода «Днепроспецсталь» зафиксировали стабильную работу горелок при соотношении «газ-воздух» 1:25, что важно для низкотемпературного отжига. Исследования стехиометрического сжигания топлива показали, что предел регулирования по тепловой мощности составил 1:40 (от 7,45 до 300 кВт) [8]. В дальнейшем на базе той же горелки была разработана горелка с повышенной тепловой мощностью 800 кВт. Приемочные испытания, проведенные Государственным центром по испытанию и внедрению топливоиспользующего оборудования, подтвердили результаты исследований. Разрешено использование горелок мощностью 300 кВт и 800 кВт для сжигания низкокалорийных газов в термических и нагревательных печах.

Анализ экономического эффекта от внедрения усовершенствованной системы отопления камерных термических печей, основу которой составляют разработанные горелки, за период с 2006 г. по 2009 г. приведен в работе [9]. Суммарный экономический эффект за этот период составил 2,4 млн. грн.

### **Выводы**

Разработанные, исследованные и опробованные в промышленных условиях горелочные устройства различного назначения, использующие принцип частичного предварительного смешения топлива и воздуха, после внедрения в производство и многолетней эксплуатации подтвердили экономическую эффективность и надежность работы в системах отопления нагревательных и термических печей.

### **Список литературы**

1. А.с.№870856 СССР. Газовая горелка / М. П. Ревун, А. Н. Байбуз, А. Н. Андриенко и др. // Оpubл. 07.10.81; Бюл. № 37.
2. Патент України № 16287. Газовий пальник / М. П. Ревун, А. М. Байбуз, О. М. Андриенко та ін. // Оpubл. 29.08.97; Бюл. № 4.

3. Ревун М. П. Опыт внедрения горелок частичного предварительного смешения / М. П. Ревун, А. Н. Байбуз, А. Н. Андриенко и др. // Сталь. – 1985. – № 12. – С. 71–73 // Steel in the USSR. – 1985. – t.15. – № 12. – P. 608–610.
4. А.с. №1229517 СССР. Газовая горелка / М. П. Ревун, А. И. Чепрасов, Ю. Н. Каюков и др. // Оpubл. 07.05.86; Бюл. №17.
5. Чепрасов А. И., Ревун М. П., Каюков Ю. Н. Применение горелок частичного предварительного смешения на рециркуляционных термических печах // Теплотехнология металлургического производства. Сб. научн. труд. – Киев, 1988. – С. 4-7.
6. Ревун М. П., Башлий С. В., Чепрасов А. И. Горелочное устройство для установки сушки ковшей / Металлургическая теплотехника (Сб. научн. тр. НМетАУ). - Днепропетровск: НМетАУ, 2002. – Т. 8. – С. 191–195.
7. Патент України № 19739. Газовий пальник / Ревун М. П., Чепрасов О. І., Башлій С. В. та ін. // Оpubл. 25.12.97; Бюл. № 6.
8. Ревун М. П. Горелка частичного предварительного смешения / М. П. Ревун, А. И. Чепрасов, С. В. Башлий // Сталь. – 1993. - №9. – С. 87–89.
9. Башлій С. В. Дослід промислового впровадження пальників часткового попереднього змішування на камерних термічних рециркуляційних печах / С. В. Башлій, О. П. Лютий, О. І. Чепрасов, Ю. М. Каюков // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2016. – Вип. 2 (36). – С. 98–101.

# АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИАМЕТРА И РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ЧАСТИЦ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА КИНЕТИКУ И ВРЕМЯ УСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ

*Черненко А.С.<sup>1</sup>, Калинин В.В.<sup>1</sup>, Войцех Новак<sup>2</sup>, Куземко Р.Д.<sup>3</sup>*

*1 – Одесский национальный университет, г. Одесса, Украина*

*2 – «AGH» Научно-технический университет, Краков, Польша*

*3 – ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»,  
г. Мариуполь, Украина*

## Аннотация

При диаметрах частиц, больше критического диаметра воспламенения в воздухе, с учетом зольности исследовано влияние начального размера и плотности пористых углеродных частиц на закономерности временных стадий: самоускорения, квазистационарного горения и самопроизвольного погасания. Показано, что на стадии горения, которая заканчивается диаметром и плотностью погасания, скорость уменьшения произведения плотности на квадрат диаметра зольной частицы определяется реакционной способностью частиц угольной пыли и не зависит от начальных условий. Получено выражение для времени горения пористой коксовой частицы. Введена новая константа горения, которая определяется свойствами и структурой угля (энергия активации, пористость).

Ключевые слова: горение, константа горения, произвольное погасание, пористость, угольная частица, реакционная способность.

## Введение

Поскольку разные марки угля отличаются по свойствам [1, 2], то для определения времени полного его сгорания необходимо учитывать его особенности структуры и свойства. В результате горения угольных частиц и уменьшения их диаметра и плотности до критических значений происходит самопроизвольное погасание. Поэтому при расчете времени сгорания угольных частиц необходимо знать: критические диаметры воспламенения, которые могут быть меньше начального размера; критические диаметры и плотности, при которых происходит самопроизвольное погасание; области горения частиц.

**Цель работы** – анализ временных зависимостей температуры, диаметра и плотности пористой углеродной частицы для установления закономерностей при ее горении в диффузионном режиме, определение константы горения угольной частицы, определение времени горения от параметров газовой среды и частицы, анализ коэффициента реакционной способности.

## Постановка задачи

Экспериментально доказано и теоретически обосновано [3] неизотермическое и необратимое протекание параллельных экзотермических реакций в середине углеродной частицы и на ее внешней по-

верхности:  $C + O_2 \xrightarrow{k_1} CO_2$  (I),  $\Delta H_1 = -395$  кДж/моль и  $2C + O_2 \xrightarrow{k_2} 2CO$  (II),  $\Delta H_2 = -209$  кДж/моль. Скорости появления продуктов реакций соизмеримы [4]. Скорости химических реакций и суммарная скорость химического тепловыделения увеличиваются с ростом температуры по закону Аррениуса и определяются первым порядком по концентрации кислорода. Суммарная скорость химических реакций по углероду:

$$\frac{1}{\pi d^2} \frac{\partial(m_c)}{\partial t} = -\frac{M_c}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) \frac{\rho_{g,s}}{\rho_c} Y_{O_2,s}.$$

Исследования [1] указывают связь энергий активации  $E$  и предэкспоненциальных множителей  $k_0$  реакций ( $k_* = 100$  м/с,  $T_* = 2600$  К):

$$k_1 = k_{0i} \exp\left[-\frac{E_i}{RT}\right], \quad k_{0i} = k_* \exp\left[\frac{E_i}{RT_*}\right], \quad E_2/E_1 = 1.1,$$

где  $T$  – температура частицы, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К). Наличие золы в угле уменьшает массовую долю углерода, вступающего в реакцию.

Скорость химического тепловыделения:

$$q_{ch1,2} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \left(\frac{100 - A_p}{100}\right) \left(1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2}\right) \rho_{gs} Y_{O_2,s},$$

$$Y_{O_2,s} = Y_{O_2,\infty} \frac{1}{1 + Se}, \quad Se = \frac{d}{DNu} (k_1 + k_2 + k_v + U_{s0}),$$

где  $Q_1, Q_2$  – тепловые эффекты химических реакций (I) и (II), рассчитанные на единицу массы кислорода, Дж/кг $O_2$ ;  $k_1, k_2$  – константы скоростей химических реакции (I) – (II);  $Y_{O_2,s}$  – относительная массовая доля кислорода в газе у поверхности частицы;  $\rho_{gs}$  – плотность окружающего газа у поверхности частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $Se$  – общий критерий Семенова, который показывает роль кинетики реакций на поверхности и внутри углеродной частицы, стефановского течения относительно массопереноса окислителя в газе.

Уменьшение массы углерода  $m_c$  определяется скоростями уменьшения диаметра и плотности частицы:

$$\frac{\partial(m_c)}{\partial t} = \left(\frac{100 - A_p}{100}\right) d^3 \frac{\pi}{6} \frac{\partial(\rho_c)}{\partial t} + \left(\frac{100 - A_p}{100}\right) \frac{\pi}{2} \rho_c d^2 \frac{\partial(d)}{\partial t},$$

где  $\rho_c$  – плотность угольной частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр частицы, м;  $A_p$  – массовая доля золы (в %).

Уменьшение диаметра и плотности частицы со временем обусловлено химическими реакциями (I) и (II) на ее внешней поверхности и ее середине [4]:

$$-\frac{\partial d}{\partial t} = 2 \left( \frac{100 - A_p}{100} \right)^{-1} \frac{M_c}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \frac{\rho_{gs}}{\rho_c} Y_{O_2,s}, \quad d(t=0) = d_b, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial \rho_c}{\partial t} = \frac{6}{d} \left( \frac{100 - A_p}{100} \right)^{-1} \frac{M_c}{M_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \frac{k_v}{(k_1 + k_2)} \rho_{g,s} Y_{O_2,s}, \quad \rho_c(t=0) = \rho_{c,b}, \quad (2)$$

где  $M_c$ ,  $M_{O_2}$  – молярные массы углерода и кислорода, кг/моль.

Реагирование внутри пор частицы включено в эффективную константу внутреннего реагирования  $k_v$ , которая определяется порозностью частицы  $\chi$  и удельной поверхностью пор  $F_v$  [1, С. 198].

Кинетика тепломассообмена и химических реакций углеродной частицы с газами рассматриваются с учетом стефановского течения, массопереноса и реагирования внутри частицы на поверхностях пор. В работе [4] показано, что зависимость от времени средней по всему объему температуры пористой углеродной находится из решения дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{6}{c_c \rho_c d} q_{eff}, \quad q_{eff} = q_{ch12} - q_{h\pi} \quad T(t=0) = T_b, \quad (3)$$

$$q_{h\pi} = \frac{\lambda_g Nu}{d} (T - T_g) + U_{s0} \rho_{gs} c_g T^* \frac{1}{1 + Se} + \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4),$$

где  $c_c$  – удельная теплоемкость частицы, Дж/(кг·К);  $T$ ,  $T_g$ ,  $T_w$  – температуры поверхности частицы, окружающего газа и окружающих тел, К;  $\varepsilon$  – коэффициент черноты частицы;  $U_{s0}$  – массовая скорость стефановского течения, м/с [4].

### Анализ результатов

Рассмотрим динамику изменения температуры, диаметра, плотности пористой углеродной частицы и диффузионно-кинетического отношения (рис. 1) для двух начальных диаметров частиц, которые больше диаметра воспламенения  $d_i$  при заданных значениях температуры воздуха и температуре стенок реакционной установки ( $d_2, d_3 > d_i$ ,  $d_1 < d_i$ ). Уменьшение диаметра и плотности частицы в процессе горения приводит к медленному росту квазистационарной температуры горения. За счет теплового излучения с уменьшением диаметра частицы общие теплотери увеличиваются не так быстро, как тепловыделение за счет увеличения массопереноса кислорода к единице поверхности частицы. При определенном размере частицы и достижении максимальной температуры горения ( $t. m$ ) эти скорости сравниваются. Дальнейшее понижение температуры горения связано с преобладающим увеличением общих теплотерей над тепловыделением с уменьшением диаметра частицы. При достижении критических значений  $d_c$  уменьшается температура частицы, что приводит к резкому уменьшению скорости реагирования пористой углеродной частицы. Плотность

погаснувшей частицы уменьшается с ростом ее начального диаметра, а ее диаметр практически не изменяется (табл. 1).

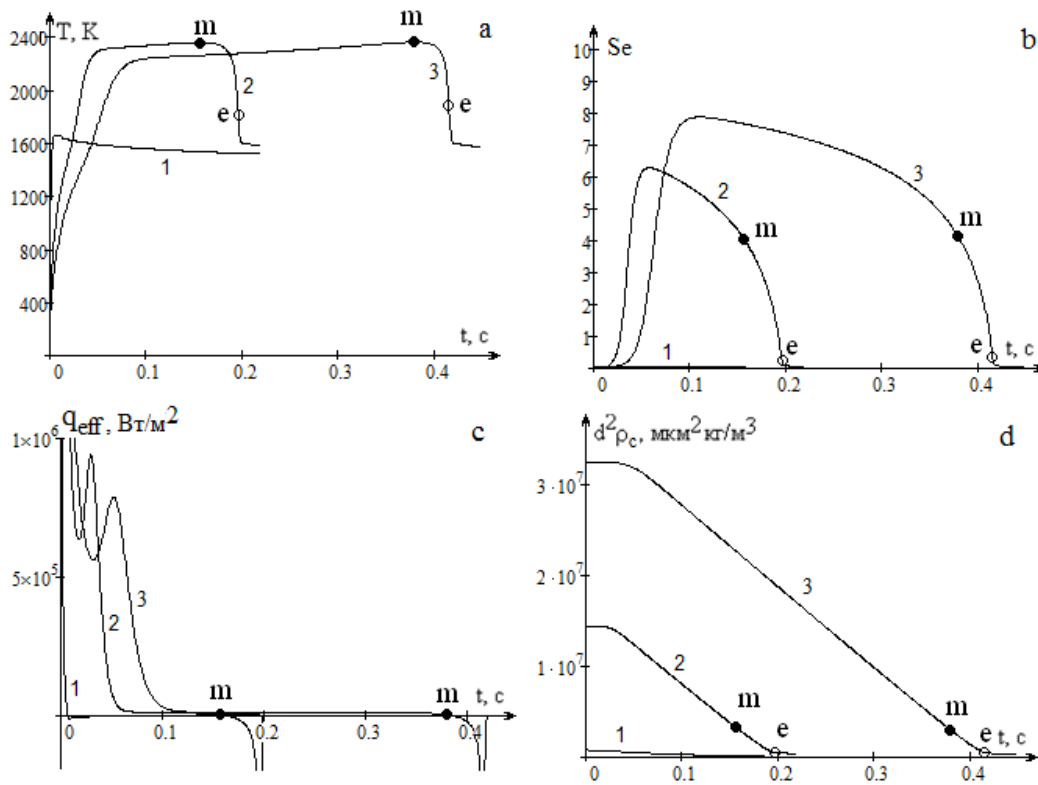


Рис. 1. Временные зависимости температуры частицы, числа Семенова, эффективной скорости тепловыделения и произведения плотности на квадрат диаметра пористой углеродной частицы (кривая 1 – начальный диаметр 25 мкм (меньше диаметра самовоспламенения  $d_i = 30$  мкм)); 2 – 100 мкм, 3 – 150 мкм.

Расчет по (1) – (3). Параметры:  $E_1 = 140$  кДж/моль;  $T_g = 1400$  К,  $T_w = 1400$  К,  $F_{v0} = 2 \cdot 10^4$  м<sup>-1</sup>;  $\chi = 0,1$ ;  $Y_{O_2\infty} = 0,23$ ,  $T_b = 300$  К,  $A_p = 4,6\%$ .

Из рис. 1 видно, что для пористых частиц, когда изменение плотности в процессе горения существенно, линейно изменяется со временем не квадрат диаметра, как обычно следует из диффузионного режима горения, а произведение квадрата диаметра частицы на ее плотность. В этом случае наклон кривых (рис. 1d) не зависит от начальных значений диаметра и плотности. Поэтому имеет смысл ввести новую константу горения частицы.

Можно считать, что реакции в процессе горения частицы протекают в диффузной области (рис. 1b), т.е.  $Se \gg 1$ . Суммируя оба уравнения (1) и (2), умножив, соответственно, их на  $2d\rho_c$  и  $d^2$ , в результате получим общий закон изменения величины  $\rho_c d^2$  со временем:

$$\frac{\partial(\rho_c d^2)}{\partial t} = - \left( \frac{100 - A_p}{100} \right)^{-1} 4Sh \frac{M_c}{M_{O_2}} D_g \rho_g Y_{O_2\infty} \frac{(k_1 + 2k_2)}{(k_1 + k_2 + k_v + U_{s0})} \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right). \quad (4)$$

Предположив, что правая часть не зависит от времени, интегрирование (4) приводит к временному закону изменения комплекса  $\rho d^2$  при горении частицы кокса угля:

$$\rho_c d^2 = \rho_{c,b} d_b^2 - K_D t, \quad \rho d^2 (t=0) = \rho_{c,b} d_b^2. \quad (5)$$

В начале горения размер и плотность частицы близки к начальным значениям, а в конце горения – к диаметру и плотности погасания, для которых, как видно из рис. 1d, справедливо  $\rho_{c,b} d_b^2 \gg \rho_{c,e} d_e^2$ . Поэтому теоретическая формула с модифицированной константой горения  $K_D$  для времени горения имеет вид:

$$t_{bur} = \frac{\rho_{c,b} d_b^2}{K_D}. \quad (6)$$

$$K_D = \left( \frac{100 - A_p}{100} \right)^{-1} 4Sh \frac{M_c}{M_{O_2}} D_g \rho_g Y_{O_2, \infty} \frac{(k_1 + 2k_2)}{(k_1 + k_2 + k_v + U_{s0})} \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right).$$

Как видно из (6), константа горения определяется теплофизическими свойствами газа (воздуха) и кинетическими свойствами угля и зависит от температуры газа согласно степенной зависимости произведения  $D_g \rho_g = D_{g0} \rho_{g0} \left( \frac{T_g + T}{2T_0} \right)^{n-1}$ .

Известна экспериментальная формула [2] для расчета времени выгорания коксовых частиц угольной пыли, полученная при обработке экспериментальных данных в интервале относительных массовых концентраций от 23 до 98 % и размеров частиц от 100 мкм до 10 мм:

$$t_{bur,0} = 2,31 \cdot 10^6 k_{bk} \frac{100 - A_p}{100} \frac{\rho_{c,b} d_b^2}{f(T_g) Y_{O_2, \infty}}, \quad (7)$$

где функция  $f(T_g) = T_g^{0.9}$  учитывает влияние температуры газового потока на время горения. Численный коэффициент в формуле (7) получили с определенной ошибкой в пределах от 1,4 до  $3,1 \cdot 10^6$ . Экспериментальный коэффициент  $k_{bk}$  для различных углей определяли относительно условно выбранного эталонного угля (для антрацита  $k_{bk} = 1$ ). Поэтому экспериментальное определение  $k_{bk}$  для конкретно используемых углей продолжается и в настоящее время, например в [5], где реакционную способность угля определили как величину обратную коэффициенту  $k_{bk}$ . Естественно, что величина реакционной способности угля должна определяться кинетическими свойствами угля, а также учитывать параллельное образование оксидов углерода, пористость угля, наличие стефановского потока. Расчеты по формулам (6) и (7) дают согласующие значения. Например, время горения частицы антрацита диаметром 200 мкм при температуре 2200 К в нагретом до 1400 К воздухе равны  $t_{bur} = 576$  мс и  $t_{bur0} = 813$  мс.

Таблица 1

Влияние начального размера частицы ( $\rho_{c,b} = 1440 \text{ кг/м}^3$ ,  $F_{v0} = 2 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ ,  $\chi = 0,1$ )  
на параметры погасания в воздухе ( $T_g = 1400\text{К}$ ,  $T_w = 1400 \text{ К}$ ;  $Y_{O_2,\infty} = 0,23$ )

$d_b$ , мкм	50	100	150	200
$\rho_{c,e}$ , кг/м <sup>3</sup>	1280	1140	1040	960
$d_e$ , мкм	21,6	21,6	21,7	21,8
$\rho_{c,e} d_e^2$ , мкм <sup>2</sup> ·кг/м <sup>3</sup>	$6,00 \cdot 10^5$	$5,32 \cdot 10^5$	$4,91 \cdot 10^5$	$4,55 \cdot 10^5$
$T_e$ , К	1807	1812	1844	1846

### Выводы

Формула (7) выполняется при высоких температурах газовой смеси, когда происходит самовоспламенение частицы. Однако, при более низких температурах, когда возможно зажигание частиц [5] и температуры газа и горячей частицы значительно отличаются, необходимо использовать выражение (6).

### Список литературы

1. Основы практической теории горения / под. ред. В. В. Померанцева. – Л. : Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1986. – 312 с.
2. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М. – 1986. – 208 с.
3. Яворский И. А. Квантово-химические представления о механизме реагирования углеродных материалов с газами // Кинетика горения ископаемых топлив. – 1978. – № 2. – С. 5 – 26.
4. Калинин В. В., Черненко А. С., Корчагина М. Н. Влияние параметров газовой смеси на максимальную температуру и скорость горения углеродной частицы углеродной частицы // Физика аэродисперсных систем. – 2016. – № 53. – С. 105–116.
5. Хаджинов Е. А. Экспериментальное исследование кинетики горения одиночных частиц пылеугольного топлива // Метал и литье Украины. – 2013 – № 11. – С. 9–13.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПРОДУВАЕМОГО СЛОЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОМАССОБМЕНА

*Швачич С.В., Булычёв В.В.*

*ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»,  
г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

В работе рассмотрен процесс горения продуваемого слоя при различных условиях тепломассообмена. Выбраны оптимальные условия на примере слоевого сжигания твёрдых бытовых отходов (ТБО) на основе вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: слоевое сжигание, тепломассообмен, твёрдые бытовые отходы.

## **Введение**

Процессы тепломассообмена в слое имеют место в аппаратах металлургической, энергетической, химической промышленности (например, регенеративных теплообменниках, рекуператорах, при нагреве и тепловой обработке сыпучих материалах в теплообменниках различного назначения, при нагреве шихты в шахтных печах) [1].

Слоевой метод сжигания твёрдого топлива до настоящего времени занимает видное место наряду с факельным (камерным) способом сжигания. Основные преимущества: высокая стабильность процесса горения в широком диапазоне форсировок, возможность организации сжигания топлив с различной начальной влажностью без предварительной подсушки, отсутствие сложной и энергоёмкой системы пылеприготовления, простота в управлении. Более того интенсивность горения слоевого процесса обладает значительными резервами по сравнению с факельным. Особенность слоевого сжигания заключается в том, что при горении топливо лежит слоем большей или меньшей толщины, на колосниковой решётке (или в специальной шахте) и через слой топлива продувается воздух, необходимый для горения и газификации.

## **Постановка задачи**

Проанализировать различные условия тепломассообмена в процессе горения продуваемого слоя, выбрать наиболее эффективную схему. На примере слоевого сжигания ТБО определить, какими параметрами регулируется процесс.

## **Решение задачи**

Существуют прямоточная и противоточная схемы организации слоевого сжигания твёрдого топлива [2].

При прямоточной схеме организации слоевого процесса подача на решётку и подвод дутья производится либо с одной стороны, либо перекрёстно, а шлак и дымовые газы уходят вниз. При этой схеме топливо прижимается к колосниковой решётке не только под действием веса, но и вследствие аэродинамического сопротивления набегающему потоку дутьевого воздуха. Решётка в этом случае препятствует нарушению аэродинамической устойчивости слоя при увеличении дутья. Нарушение аэродинамической устойчивости слоя является основной причиной, препятствующей интенсификации слоевого горения. При этом процесс горения замедляется, время высокотемпературного сжигания увеличивается.

Схема организации слоевого процесса, при которой топливо подаётся сверху на колосниковое полотно и пронизывается дутьевым воздухом, подаваемым снизу, называется противоточной. Противоточная схема широко используется в технике. Так как она проста и обладает устойчивым воспламенением за счёт поступления свежих порций топлива на его раскалённый горящий слой. Эти новые порции топлива подогреваются, сушатся и воспламеняются за счёт теплоты, передаваемой мощным потоком раскалённых газов. Подобная организация воспламенения позволяет успешно сжигать в слоевых топках топлива с влажностью до 45–50 %, здесь можно управлять процессом с помощью расхода дутьевого воздуха, решётка в данном случае не будет препятствовать нарушению аэродинамической устойчивости слоя при увеличении дутья.

Для определения оптимальных условий сжигания ТБО была выбрана противоточная схема.

На эффективность процесса при слоевом сжигании влияют такие факторы как:

- температура сжигания, зависящая от вида сжигаемых веществ;
- продолжительность (время) высокотемпературного сжигания, зависящего от вида сжигаемых отходов;
- закономерность изменения порозности слоя по высоте при горении.

Разработка и последующая реализация математической модели сжигания ТБО на ЭВМ позволила получить изменение температуры слоя и концентрации горючих газов при сгорании ТБО от времени сгорания. В основу математической модели положена система нестационарных дифференциальных уравнений энергии и диффузии:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \omega \frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = Q \cdot k_0 \cdot e^V \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \omega \frac{\partial C}{\partial x} - \alpha \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = -k_0 \cdot e^V \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (2)$$

В правой части уравнений содержится комплекс, характеризующий мощность тепловыделения и интенсивность выделения горючих элементов при разложении ТБО. Уравнения (1) и (2) решались при соответствующих начальных и граничных условиях.

Время полного выгорания кокса бытового мусора рассчитывается так:

$$\tau = p_r \cdot A \cdot \delta_0, \text{ с} \quad [3]$$

где  $p_r$  – удельный вес кокса:  $p_r=(1200 - 1400) \text{ кг/м}^3$ ,  $\delta_0$  – начальный размер среднего куска, ( $\delta_0 = 0,1$ ) м,

$$A = \frac{R \cdot T}{2 \cdot M_c \cdot p_{1\Delta} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2)} \quad (3)$$

где  $M_c$  – молекулярный вес кокса, г;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/кмоль·К;  $p_{1\Delta}$  – парциальное давление кислорода в газовом потоке, кПа;  $k_1, k_2$  – константы скорости соответственно первой и второй реакций определяются по закону Аррениуса);  $T$  – температура, К.

В результате расчётов получены концентрации вредных веществ на выходе из дымовой трубы, по которым можно судить насколько они отвечают нормам ПДК: [3].

$$C_{SO_2} = \frac{M'_{SO_2} \cdot 10^3 \cdot (100 - n_{SO_2})}{V_{\Gamma}^{TP} \cdot 100}, \quad \text{мг/м}^3;$$

$$C_{HF} = \frac{M'_{HF} \cdot 10^3 \cdot (100 - n_{HF})}{V_{\Gamma}^{TP} \cdot 100}, \quad \text{мг/м}^3;$$

$$C_{HCL} = \frac{M'_{HCL} \cdot 10^3 \cdot (100 - n_{HCL})}{V_{\Gamma}^{TP} \cdot 100}, \quad \text{мг/м}^3;$$

$$C_{NO_x} = \frac{M'_{NO_x} \cdot 10^3 \cdot (100 - n_{NO_x})}{V_{\Gamma}^{TP} \cdot 100}, \quad \text{мг/м}^3.$$

где  $V_{\Gamma}^{TP}$  – суммарное количество дымовых газов на выходе из дымовой трубы, м<sup>3</sup>/с;  $M'_{SO_2}$ ,  $M'_{HF}$ ,  $M'_{HCL}$ ,  $M'_{NO_x}$  – суммарное количество об-

разующихся вредных веществ в мусоросжигательном котле,  $g/c$ ;  $n_{SO_2}$ ,  $n_{HF}$ ,  $n_{HCL}$ ,  $n_{NO_x}$  – степень очистки в газоочистных устройствах, %.

### **Выводы**

1. На основе вычислительных экспериментов определены оптимальное время выгорания частицы, её размеры.
2. Методами математического моделирования проанализировано влияние изменения порозности слоя по высоте на характер горения.
3. Получены зависимости полей температур и концентрации горючих газов от времени.
4. Определено время полного выгорания остатков термической переработки ТБО.
5. Рассмотрена возможность оптимизированного сжигания выделенной из ТБО горючей (топливной) фракции и переход от сжигания как процесса ликвидации ТБО к сжиганию как процессу, обеспечивающему дополнительное получение тепловой и электрической энергии.

### **Список литературы**

1. Телегин А. С., Швыдкий В. С., Ярошенко Ю. Г. Термодинамика и тепломассоперенос. – Москва : Металлургия, 1980. – 261 с.
2. Основы практической теории горения / Под. ред. В. В. Померанцева. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – Л. : Энергия, 1973. – 258 с.
3. Пурим В. Р. Бытовые отходы. Теория горения. Обезвреживание. Топливо для энергетики [Текст] / В. Р. Пурим. – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 112с.

**Раздел 5.**  
***Эффективное использование энергии  
и ресурсов в металлургии***

***Редактор раздела*** – профессор, д.т.н.,  
профессор кафедры теплоэнергетики  
Запорожской государственной инженерной академии  
***Яковлева И.Г.***

***Рецензент*** – чл.-корр. Национальной академии  
наук Украины, главный научный сотрудник  
Физико-технологического института металлов и сплавов  
Национальной академии наук Украины  
***Мазур В.Л.***

# PROSPECTIVE VIEW ON REDUCING OF COKE CONSUMPTION IN THE PROCESS OF ZINC AND LEAD SIMULTANEOUS PRODUCTION IN IMPERIAL SMELTING FURNACE

*M. Bernasowski, A. Klimczyk, R. Stachura*

*AGH University of Science and Technology,  
Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science,  
Department of Ferrous Metallurgy,  
Krakow, Poland*

## **Abstract**

The shaft furnace for simultaneous production of zinc and lead (ISF) which currently works in Miasteczko Slaskie in Poland, is the only one furnace operating in Europe according to Imperial Smelting Process. Paper presents possibilities of coke consumption reducing in the process at the aspect of supporting technology system development.

Key words: Imperial Smelting Process, ISF, lead, zinc, coke.

## **Introduction**

In recent years, zinc and lead manufacturer HCM in Poland has been struggling with the mounting problems caused by the declining supply of traditional raw materials. Therefore, waste materials have increased their share in production. Having a closer look at the current, rapidly changing situation of HCM and at the history of the development of shaft furnace technology and its effects, considerable improvement of the efficiency of the shaft furnace producing zinc and lead should be given absolute priority. This would allow a significant reduction of the cost of zinc and lead production and will have a positive impact on the environment.

Experience taken from the production of iron in blast furnaces shows that the best effect can be achieved by constructing and implementing a technology support system [1] and its adapting for the zinc and lead blast furnace and needs of the HCM. The project development is a purpose of new project performed by the paper's authors and supported by European Funds Smart Growth.

It should be emphasized that today none of the shaft furnaces for zinc and lead production operated worldwide employs such a system, which makes the project innovative.

Presented paper describes main objectives of new project and ways of achievement desired economical effects.

## **Process description**

The Imperial Smelting (IS) technology was developed mid last century in the UK to create a pyrometallurgical continuous zinc winning process [2]. Beside traditional raw materials as lead and zinc sulphides, at the ISP can be used secondary materials as dust and sludges from steelmak-

ing processes. In this reason, the simultaneous production of lead metal is an advantage of the process, because the assay of most of the recycling materials shows beside zinc also lead. The ISP does not produce a lead containing residues like other zinc-making processes do [3].

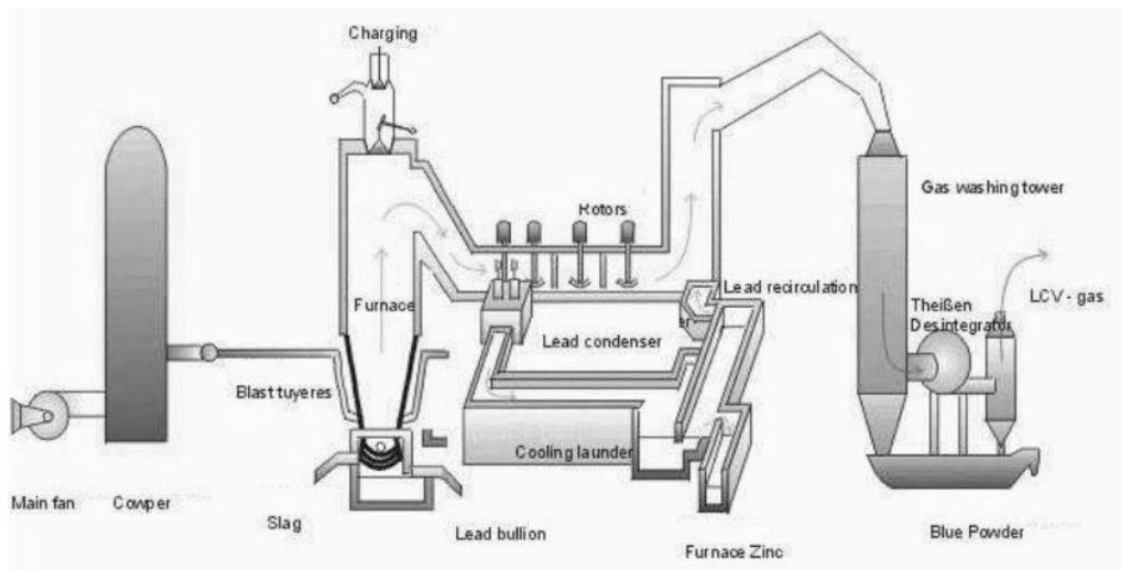


Figure 1. Flowsheet of Imperial Smelting Process [2]

The charge to the blast furnace is sinter (Tab. 1.) and coke, the coke burning in the lower part of the shaft and the heat from this and the carbon monoxide gas produced providing the means to reduce the zinc and lead oxides. Lead oxide is easy reduced in upper part of ISF to metallic state. The lead is tapped from the bottom of the blast furnace, carrying copper, silver and gold with it. With lead also is tapped slag (Tab. 2.) [4].

Table 1  
Chemical composition of sinter made from secondary chain materials (oxides)

Mass %							
Zn	Pb	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S
46.47	17.27	7.95	2.36	3.44	0.36	1.18	0.73
Cu	Cd	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	As	Sn	Cl	F
0.73	0.39	0.33	0.35	0.14	0.05	0.049	0.02

Table 2  
Chemical composition of ISF slag

Mass %							
Zn	Pb	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S
8.34	2.13	32.77	9.89	15.33	1.53	9.45	7.6
Cu	Cd	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	As	Sn	Cl	F
2.3	0.003	0.33	0.93	0.1	0.02	0.001	0.044

However zinc oxide can be reduced in the temperature above 1000 °C and obtained zinc evaporates at once. The gaseous phase flows in the furnace successively through the equilibrium zone and the reheating zone of the charge, where the partial reoxidation of the zinc vapor with carbon dioxide occurs. For the protection of zinc vapors against reoxidation on the route charge surface – condenser, cold air is blown through the nozzles located just above the surface of the charge in the amount of about 10 % of the primary blast. Gases leaving the charge at 950 ÷ 1000 ° C and containing 5 ÷ 7 % Zn, 5 ÷ 10 % CO<sub>2</sub>, 20 ÷ 30 % CO and about 60 ÷ 65 % N<sub>2</sub> are directed to the condenser in which it is rapidly quenched and dissolved into a spray of molten lead so that the zinc vapor has insufficient time to oxidize back to zinc oxide. Due to the special relationship between lead and zinc, by cooling the lead, crude zinc is released and is separated, and the lead returns to the “condensing” process for another cycle of dissolving and then releasing more zinc. Zinc from the shaft furnace is subjected to refining by three lead columns, two cadmium columns, one redistillation column and one baby column. Refining products are zinc SHG (99,995 %), GOB (98,5 %) and refined cadmium [5].

### **Project objectives**

The project objective is to develop an IT support system for the zinc and lead production process adapted to the capacity and needs of HCM. The project will therefore involve a process innovation consisting in the development of a new optimization technology for the production of zinc and lead. The new technology will respond to the mill’s need to curtail the production costs, stabilize processes and reduce harmful emissions into the environment.

As part of the project, a system will be designed made up of:

- systems for automatic collection and processing of data and calculation results that will create a database,
- sets of mathematical models of the process adapted to the preset objective functions and measurement capabilities,
- algorithms analyzing inbound information about the process and generating opinions about the necessity of changes to the adjustments and system operation controls.

The results of the new project will be, in particular:

1. **Reduced consumption of coke.** Implementation of the planned mathematical models of the process based on the material and heat balances will allow the precise matching of the supply and demand of heat in the reactor. At the same time, they will help in the thermal stabilization of the unit on the level achievable in the given technical and technological conditions. This will result in a reduction of the unit consumption of fuel, which, in turn, will mark down production costs and reduce CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere.

2. **Increased production capacity.** Stabilization of the work of furnace and the lowering of the unit fuel consumption, that is, the reduction in the volume of the working space occupied by coke – this will increase the production output. It is also planned to carry out test optimization of the average grain size of the metal-bearing charge in relation to a grain-sizing of coke. This should result in an increase in permeability of the charge stack, which, in the countercurrent process, has a decisive impact on the volume of production.

The zinc and lead production process puts some constraints for technological activities. Behind the main ones, in the context of the system design technology support should be considered:

- providing in the process a sufficient amount of heat necessary to carry out the endothermic reactions and the temperature in the lower regions of the furnace and for easy slag tapping and its properties such as the dynamic viscosity;
- maintain the temperature of the top gases containing zinc at range counteracting the reoxidation of the metal;
- maximum limiting of the iron reduction in order to avoid the formation of liquid phase of Fe in the bosh;
- maintaining proper temperature range of the sinter softening as a parameter responsible for the aerodynamics of gas flow through the furnace, next to the correct grain size.

### **Summary**

The paper presented general outline of new project which will result in reduced production costs due to lower demand for coke and increasing production output. The project will also help reduce harmful emissions into the environment. The designed system will enable the production of the same quantity of products while reducing the consumption of fossil fuels, thereby limiting CO<sub>2</sub> emissions into the environment.

After the completion of the project, it is expected the total readiness to implement the project results in a prototype installation on an industrial scale.

### **Acknowledgments**

This work has been financed by European Funds, Operational Programme Smart Growth 2014-2020, Sectoral Programme INNOSTAL, project no. POIR.01.02.00-00-0174/16.

### **References**

1. Łędzki A., Stachura R., Klimczyk A., Bernasowski M., Development and implementation of a computer-aided support system for blast-furnace technology, Polish metallurgy 2006–2010 in time of the worldwide economic crisis, Committee of Metallurgy of the Polish Academy of Sciences, Krakow, 2010, 13 – 33.

2. Schwab B., Böttcher B., Schmitz B. Imperial Smelting Technology Ready for 100% Secondaries, Smelting Engineers International Düsseldorf, Germany, <http://www.ifservice.de/Downloads/Dresden.pdf>

3. Łędzki A., Stachura R., Bernasowski M., Klimczyk A., Analysis of the potential improving the efficiency of zinc and lead production in the smelting work Miasteczko Śląskie, Technologia Imperial Smelting Process w Hucie Cynku „Miasteczko Śląskie” S.A. : nowe wyzwania: produkcja cynku i ołowiu z materiałów tlenkowych, Miasteczko Śląskie, 2012, 1–22.

4. Klimczyk A., Stachura R., Bernasowski M., Łędzki A., Preliminary analysis of sinter characteristics in terms of zinc and lead reduction, Hutnik Wiadomości Hutnicze, 2012, vol. 79, nr 12, s. 840–842. ISSN 1230-3534.

5. Śmieszek Z., Mrowiec J., Sobierajski S.: „Zinc and Lead Industry in Poland”, Lead & Zinc '05, International Symposium on Lead & Zinc Processing, Kyoto, Japan, October 17-19, 2005, 359-371.

# WERYFIKACJA KRZYWYCH NAGRZEWANIA DO BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH WPLYWU TECHNOLOGII NAGRZEWANIA NA PRZYCZEPNOŚĆ ZGORZELINY

*Boryca J.<sup>1</sup>, Wyleciał T.<sup>1</sup>, Urbaniak D.<sup>2</sup>,*

*1 – Katedra Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii  
Produkcji i Technologii Materiałów, Politechnika Częstochowska, Polska*

*2 – Instytut Maszyn Ciepłych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki,  
Politechnika Częstochowska, Polska*

## **Streszczenie**

Celem pracy było wyznaczenie oraz weryfikacja krzywych nagrzewania dla różnych technologii, w tym energooszczędnych, zapewniających zbliżoną wydajność pieca. Na podstawie badań przemysłowych opracowano krzywe nagrzewania dla wybranych technologii. Ustalono nastawy temperaturowe dla pieca laboratoryjnego. Przeprowadzono weryfikację eksperymentalną opracowanych krzywych w celu możliwości ich dalszego zastosowania do badań przyczepności zgorzeliny dla różnych technologii.

Słowa kluczowe: przyczepność zgorzeliny, krzywe nagrzewania, technologia nagrzewania.

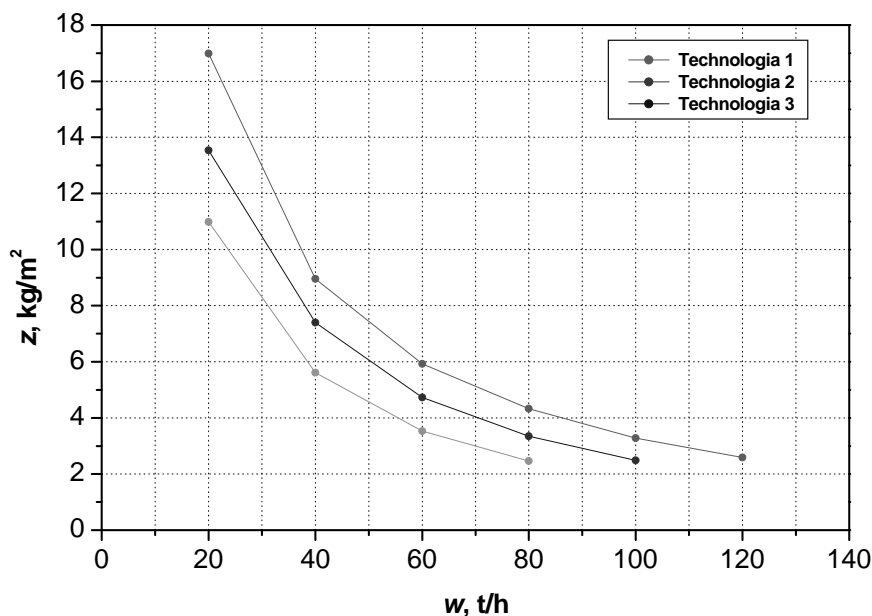
## **Wstęp**

Istotnym zagadnieniem w procesie nagrzewania wsadu stalowego w piecach grzewczych jest przyczepność zgorzeliny do powierzchni stali. Zbyt mała przyczepność zgorzeliny może spowodować uszkodzenia wyłożenia ogniotrwałego trzonu pieca, co jednocześnie związane jest z koniecznością zatrzymania pracy pieca. Z kolei zbyt duża przyczepność może doprowadzić do tego, że nieusunięte pozostałości zgorzeliny w trakcie procesu przeróbki plastycznej zostaną zawalcowane w powierzchnię wyrobów, co może wpłynąć negatywnie na jakość końcową wyrobów [1].

Dotychczasowe opracowania teoretyczne oraz badania laboratoryjne [2-4] poruszały problem wpływu czasu i temperatury nagrzewania oraz atmosfery pieca na przyczepność zgorzeliny. Warto zwrócić uwagę, że jednym z ważniejszych czynników wykazującym wpływ na proces nagrzewania oraz na wyniki pracy pieców grzewczych jest technologia nagrzewania reprezentowana przez krzywe nagrzewania.

Na podstawie wyników badań [5] można przyjąć, że o pracy pieca decyduje technologia nagrzewania, a dla danej technologii wydajność pieca. Na podstawie wyników przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że wzrost intensywności procesu podgrzewania, wyznaczonej szybkością wzrostu temperatury powierzchni, powoduje znaczący wzrost wydajności pieców [6]. Również proces utleniania (strata stali na zgorzelinę) jest uzależniony od wydajności pieca, co potwierdzają wyniki badań przeprowadzone w pracach [6, 7].

Dla różnych technologii nagrzewania strata stali maleje ze wzrostem wydajności (rys. 1).



Rys. 1. Wpływ technologii i wydajności pieca na stratę stali [1]

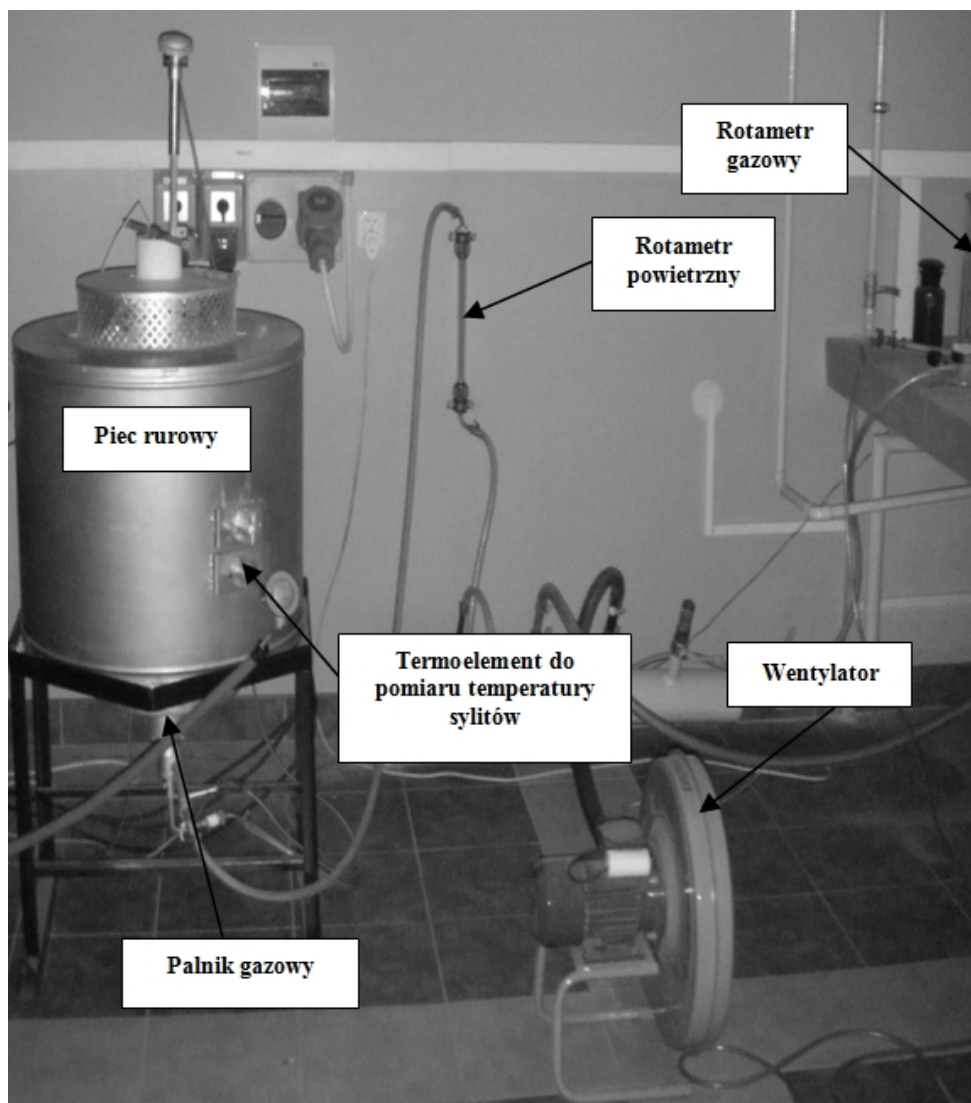
Zależność straty stali od wydajności szerzej opisano w pracach [6, 7].

### Zakres oraz metodyka badań

Celem badań było wyznaczenie oraz weryfikacja krzywych nagrzewania dla różnych technologii, w tym energooszczędnych, zapewniających zbliżoną wydajność pieca. Efektem tych prac będzie możliwość przeprowadzenia badań wpływu technologii nagrzewania na przyczepność zgorzeli dla różnych wydajności. Analizie poddano technologie tradycyjne T(a) dla 3 wydajności pieca  $w = 40, 60$  i  $80$  t/h oraz energooszczędne T(b) również dla 3 wydajności pieca  $w = 40, 60$  i  $70$  t/h.

Nagrzewanie prowadzono w elektrycznym piecu rurowym (z komorą spalania) wyposażonym w regulator programowalny SHIMADEN-FP93 (rys. 2). Uruchomienie stanowiska pomiarowego wymaga wcześniejszego zaprogramowania charakterystyki nagrzewania przy pomocy regulatora programowalnego. Wyznaczenie krzywych nagrzewania polegało na określeniu ilości kroków czasowych oraz ustaleniu maksymalnej temperatury dla danego kroku. Po uruchomieniu programu piec automatycznie realizował proces nagrzewania w ściśle zdefiniowanych krokach czasowych.

Palnik gazowy służy do wytworzenia w komorze grzewczej pieca ustalonego środowiska spalin. Spalanie odbywa się przy ustalonych strumieniach objętości substratów. Natężenia przepływu powietrza i gazu są kontrolowane za pomocą rotametrów.



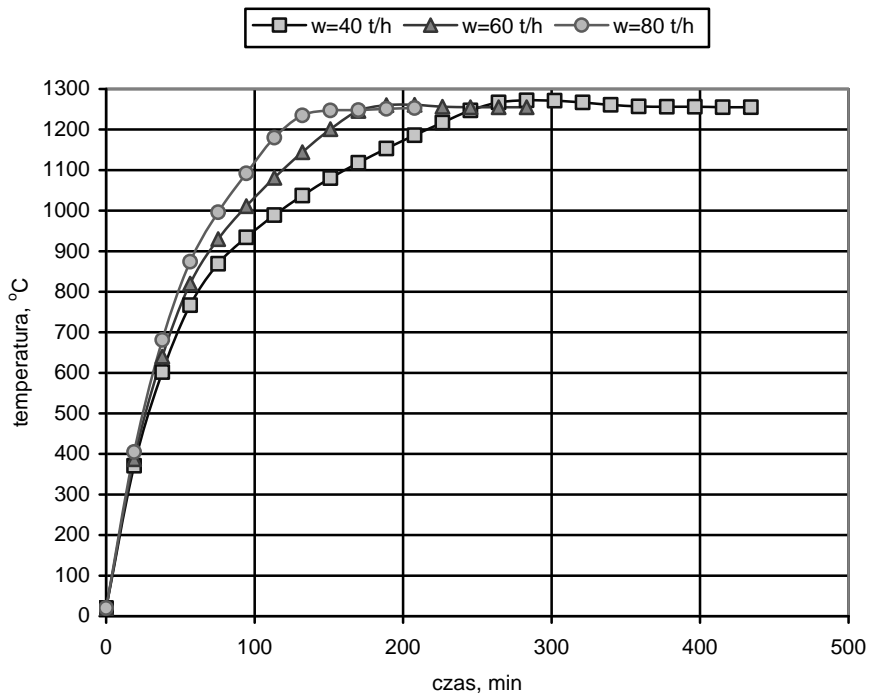
Rys. 2. Stanowisko pomiarowe - piec rurowy

### **Wyznaczenie i weryfikacja krzywych nagrzewania**

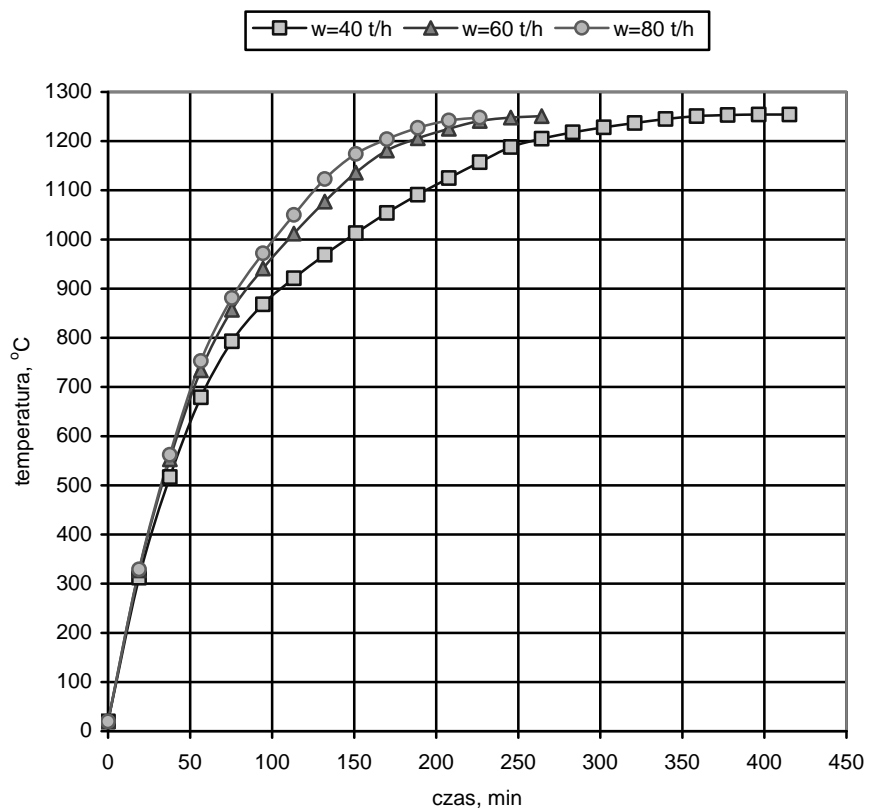
Podstawą do przeprowadzenia badań laboratoryjnych były krzywe nagrzewania opracowane na podstawie pomiarów temperatur w strefach rzeczywistego pieca przepychowego. Wartości temperatur i czasów nagrzewania wprowadzono do pamięci wewnętrznej regulatora programowalnego FP93.

Krzywe nagrzewania dla technologii T(a) przedstawiono na rys. 3, natomiast dla technologii T(b) na rys. 4.

Dla wyznaczonych krzywych nagrzewania wykonano pomiary temperatury powierzchni próbki oraz temperatury komory grzewczej. W tabelach 1÷6 umieszczono wyniki pomiarów temperatury powierzchni, nastawy temperatury oraz wyniki obliczeń odchyłeń od krzywych nagrzewania.



Rys. 3. Krzywe nagrzewania dla technologii T(a)



Rys. 4. Krzywe nagrzewania dla technologii T(b)

Tabela 1

Wyniki pomiarów temperatury i obliczeń odchyień od krzywej nagrzewania przy  $w = 40$  t/h dla technologii T(a)

Czas, $\tau$ min	Nastawa, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura komory, $^{\circ}\text{C}$	Odchylenie, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura próbki, $^{\circ}\text{C}$
0	20	20	0	20
18,9	371	487	-116	352
37,8	602	664	-62	563
56,6	767	812	-45	691
75,5	869	898	-29	843
94,4	934	952	-18	917
113,3	989	991	-2	954
132,2	1037	1029	8	1012
151,0	1080	1073	7	1046
169,9	1118	1107	11	1087
188,8	1153	1138	15	1112
207,7	1186	1177	9	1148
226,5	1217	1220	-3	1187
245,4	1247	1238	9	1207
264,3	1267	1259	8	1219
283,2	1272	1263	9	1235
302,1	1271	1270	1	1239
320,9	1267	1265	2	1242
339,8	1261	1258	3	1244
358,7	1257	1253	4	1247
377,6	1256	1254	2	1244
396,5	1256	1253	3	1248
415,3	1255	1252	3	1247
434,2	1255	1254	1	1251

Tabela 2

Wyniki pomiarów temperatury i obliczeń odchyień od krzywej nagrzewania przy  $w = 60$  t/h dla technologii T(a)

Czas, $\tau$ min	Nastawa, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura komory, $^{\circ}\text{C}$	Odchylenie, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura próbki, $^{\circ}\text{C}$
0	20	20	0	20
19,3	387	495	-108	349
38,6	640	678	-38	581
57,9	820	854	-34	788
77,3	930	951	-21	893
96,5	1011	999	12	957
115,8	1081	1069	12	1015
135,1	1144	1136	8	1097
154,4	1201	1205	-4	1146
173,7	1246	1247	-1	1197
193,0	1260	1254	6	1204
212,3	1261	1259	2	1211
231,6	1256	1256	0	1218
250,9	1255	1258	-3	1226
270,2	1255	1255	0	1239
289,0	1255	1253	2	1248

Tabela 3

Wyniki pomiarów temperatury i obliczeń odchyień od krzywej nagrzewania przy  $w = 80$  t/h dla technologii T(a)

Czas, $\tau$ min	Nastawa, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura komory, $^{\circ}\text{C}$	Odchylenie, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura próbki, $^{\circ}\text{C}$
0	20	19	1	18
19,7	405	527	-122	329
39,5	681	775	-94	631
59,2	874	893	-19	818
78,9	996	1008	-12	943
98,7	1092	1087	5	1014
118,4	1180	1195	-15	1127
138,2	1235	1239	-4	1192
157,9	1247	1253	-6	1206
177,6	1248	1261	-13	1229
197,4	1251	1255	-4	1237
217,1	1253	1252	1	1245

Tabela 4

Wyniki pomiarów temperatury i obliczeń odchyień od krzywej nagrzewania przy  $w = 40$  t/h dla technologii T(b)

Czas, $\tau$ min	Nastawa, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura komory, $^{\circ}\text{C}$	Odchylenie, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura próbki, $^{\circ}\text{C}$
0	20	20	0	20
18,9	312	426	-114	270
37,7	517	581	-64	473
56,6	679	736	-57	598
75,5	793	828	-35	764
94,4	868	889	-21	835
113,3	921	930	-9	901
132,1	969	971	-2	943
151,0	1013	1012	1	988
169,9	1054	1048	6	1018
188,8	1091	1078	13	1052
207,7	1125	1108	17	1083
226,5	1157	1149	8	1112
245,4	1188	1181	7	1136
264,3	1205	1197	8	1158
283,2	1218	1214	4	1166
302,1	1228	1223	5	1179
320,9	1237	1235	2	1201
339,8	1245	1246	-1	1220
358,7	1251	1250	1	1236
377,6	1253	1251	2	1245
396,5	1254	1253	1	1250
415,3	1254	1252	2	1251

Tabela 5

Wyniki pomiarów temperatury i obliczeń odchyleń od krzywej nagrzewania przy  $w = 60$  t/h dla technologii T(b)

Czas, $\tau$ min	Nastawa, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura komory, $^{\circ}\text{C}$	Odchylenie, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura próbki, $^{\circ}\text{C}$
0	20	20	0	20
19,3	327	445	-118	291
38,6	553	598	-45	497
57,9	734	773	-39	695
77,3	857	880	-23	792
96,5	941	948	-7	887
115,8	1012	1002	10	960
135,1	1077	1069	8	1012
154,4	1136	1132	4	1064
173,7	1181	1183	-2	1120
193,0	1206	1201	5	1169
212,3	1225	1223	2	1207
231,6	1241	1241	0	1228
250,9	1248	1249	-1	1236
270,2	1251	1253	-2	1249

Tabela 6

Wyniki pomiarów temperatury i obliczeń odchyleń od krzywej nagrzewania przy  $w=70$  t/h dla technologii T(b)

Czas, $\tau$ min	Nastawa, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura komory, $^{\circ}\text{C}$	Odchylenie, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura próbki, $^{\circ}\text{C}$
0	20	20	0	20
19,1	329	434	-105	256
38,2	562	649	-87	512
57,3	753	785	-32	697
76,3	881	877	-17	809
95,4	972	970	2	912
114,5	1050	1054	-4	999
133,6	1123	1120	3	1104
152,7	1174	1167	7	1163
171,8	1204	1209	-5	1192
190,9	1227	1229	-2	1208
209,9	1242	1241	1	1240
229,0	1248	1247	1	1246

### Podsumowanie

Analizując powyższe rysunki i tabele można stwierdzić, iż do temperatury około  $800^{\circ}\text{C}$  występują znaczne różnice temperatury pomiędzy nastawą a temperaturą komory grzewczej. Różnice te są tym większe im wyższa wydajność.

Średnia wartość odchylenia od nastawy dla całego okresu nagrzewania wynosi odpowiednio:

- dla technologii T(a):  $\pm 7,5^{\circ}\text{C}$  dla  $w = 40$  t/h,  $\pm 10,4^{\circ}\text{C}$  dla  $w = 60$  t/h,  $\pm 23,5^{\circ}\text{C}$  dla  $w = 80$  t/h,

- dla technologii T(b):  $\pm 9,8$  °C dla  $w = 40$  t/h,  $\pm 13,9$  °C dla  $w = 60$  t/h,  $\pm 17,5$  °C dla  $w = 70$  t/h.

Taka sytuacja jest spowodowana wpływem energii cieplnej dostarczanej z palnika gazowego, którego moc nie podlega regulacji przy ustalonych przepływach gazu i powietrza spalania. Po uzyskaniu temperatury ponad 800 °C, temperatura ta podlega stabilizacji. Średnia wartość odchylenia od nastawy dla tego okresu nagrzewania wynosi:

- dla technologii T(a):  $\pm 2$  °C dla  $w = 40$  i  $60$  t/h, oraz  $\pm 7,5$  °C dla  $w = 80$  t/h,
- dla technologii T(b):  $\pm 0,5$  °C dla  $w = 40$  i  $60$  t/h,  $\pm 1,5$  °C dla  $w = 70$  t/h.

Odchylenia temperatury powierzchni od nastawy i temperatury komory do temperatury 800 °C nie mają istotnego wpływu na przyczepność zgorzeliny do podłoża stalowego, gdyż w tym zakresie temperatury w zasadzie zgorzelina powstaje w znikomej ilości. Przyczepność zgorzeliny w temperaturze poniżej 1000 °C można ocenić na poziomie nie przekraczającym 5 %, co potwierdzają badania przedstawione w pracach [1, 8].

Przyjęte nastawy temperatury pieca można uznać za prawidłowe. Taka weryfikacja krzywych nagrzewania pozwala na przeprowadzenie dalszych badań mających na celu określenie przyczepności dla technologii energooszczędnych i porównanie ich z przyczepnością osiąganą w przypadku technologii standardowych.

### Literatura

1. Kieloch M.: Racjonalizacja nagrzewania wsadu, Wyd. WIPMiFS Pol. Częstochowskiej, Seria Monografie nr 8, Częstochowa 2010.
2. Kieloch M., Boryca J.: Analiza wpływu temperatury nagrzewania na przyczepność zgorzeliny do podłoża stalowego, Hutnik- Wiadomości hutnicze 2003, n 12, s. 485-488.
3. Kieloch M., Boryca J.: Analiza wpływu atmosfery pieca na przyczepność zgorzeliny do podłoża stalowego, Hutnik- Wiadomości hutnicze 2004, nr 6, s. 255-258.
4. Boryca J., Kieloch M., Piechowicz Ł.: Badania przyczepności zgorzeliny powstającej w procesie nagrzewania wsadu stalowego przed przeróbką plastyczną, Archives of Metallurgy and Materials 2006, nr 3, s. 451-457.
5. Kieloch M., Maroszek A.: Wpływ wydajności pieców grzewczych na zużycie ciepła. W.: Mat. IX Ogólnopolskiej Konf. n.t. „Gospodarka cieplna i eksploatacja pieców przemysłowych”. Częstochowa-Poraj 2001, s. 79-88.
6. Kieloch M.: Energooszczędne i małoszorstkowe nagrzewanie wsadu stalowego, Prace naukowe Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Seria Metalurgia nr 29, Częstochowa 2002.
7. Piechowicz Ł.: Zużycie ciepła a straty stali w procesie nagrzewania wsadu, Praca doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2009.
8. Boryca J.: Przyczepność warstwy zgorzeliny powstałej w procesie nagrzewania wsadu stalowego, Rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2005.

# ОЦЕНКА ТЕПЛОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ

*Борыца Я.<sup>1</sup>, Вылеццал Т.<sup>1</sup>, Гупало Е.В.<sup>2</sup>, Ерёмина О.Л.<sup>2</sup>*

*1 – Кафедра промышленных печей и охраны среды,  
Ченстоховский политехнический университет, Польша*

*2 – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

Выполнен анализ тепловой работы электрической камерной печи с выдвижным подом, предназначенной для термической обработки металлических изделий. Рассмотрены различные виды термической обработки: нормализующий нагрев; межоперационный отжиг; стрессовый отжиг после сварки изделий. Показано, что энергоэффективность печи зависит от вида и температурного режима термообработки, длительности процесса и массы садки. Предложены энергосберегающие мероприятия, которые могут быть обеспечены путем применения информационной системы IFS, используемой для планирования работы печей термоотделения.

Ключевые слова: камерная печь, термообработка садки металла, энергоэффективность, удельный расход теплоты.

## **Введение**

Одним из ключевых факторов, определяющих себестоимость и, таким образом, конкурентоспособность готовой продукции, является энергоёмкость производства. Поэтому одна из главных задач совершенствования энергоёмких производств заключается в снижении затрат энергии на производство продукции.

В металлургии и машиностроении эта задача может быть решена путем модернизации существующих нагревательных устройств, которые являются неотъемлемой частью отделений термической обработки. Основной целью модернизации является повышение энергоэффективности печей с одновременным увеличением производительности. Однако решению о целесообразности проведения работ по модернизации тепловых агрегатов должен предшествовать анализ их тепловой работы.

## **Индикатор тепловой работы печи**

Оценка технического состояния нагревательных устройств, необходимость совершенствования их конструкций и тепловой работы основывается главным образом на результатах испытаний, которые принято представлять в виде энергетических балансов рассматриваемых агрегатов.

Составление энергетического баланса [1, 2]:

– облегчает проверку контрольных измерений и вычислений;

- устраняет необходимость глубокого исследования процессов, протекающих внутри теплового агрегата, для которого составляется баланс;
- делает однозначным определение энергоэффективности агрегата на основе определения его энергетических потерь.

Основой для составления энергетического баланса является принцип сохранения энергии. Согласно этому принципу общее уравнение баланса энергии можно представить в виде [3]:

$$E_d = \Delta E + E_w \quad (1)$$

где  $E_d$  – энергия, подаваемая в систему;  $\Delta E$  – изменение энергии системы;  $E_w$  – энергия, теряемая системой.

Наиболее часто энергетический баланс составляется относительно единицы времени или единицы массы материала, подвергающегося тепловой обработке. В области промышленной энергетики важной предпосылкой для оценки качества использования энергии в технологическом процессе является показатель удельного потребления энергии по отношению к конечному результату этого процесса [4]. Индикатором тепловой работы электрической печи является удельный расход теплоты (WJZE), определяемый как:

$$WJZE = \frac{Q_{elek} \cdot 3600}{m}, \text{ кДж/кг} \quad (2)$$

где  $Q_{elek}$  – расход электроэнергии, кВт·ч,  $m$  – масса материала, подвергающегося тепловой обработке, кг.

WJZE характеризует энергоемкость процесса тепловой обработки, а, следовательно, и качество работы печи, поскольку он определяет стоимость процесса и связан с текущей ценой на электроэнергию.

### **Характеристика объекта и цель работы**

В качестве объекта исследования выбрана печь отделения термической обработки РЕКtw 1000/4, которая представляет собой электрическую камерную печь с выдвижным подом и предназначена, главным образом, для осуществления процесса отжига изделий в диапазоне температур до 1000 °С. Схема печи показана на рис. 1.

Цель работы – определение показателей работы печи в процессе термообработки и анализ энергоэффективности технологических операций.

### **Анализ процесса нагрева**

Термическая обработка включает три основные операции, каждая из которых осуществляется в соответствии с заданным технологией графиком термообработки изделий.

Операция 1 – нормализационный нагрев. Садка состоит из роликов диаметром 60 мм и имеет общую массу 1600 кг. В процессе нагрева температура садки увеличивается линейно до 860 °С в течение

4 часов. Затем в течение 2 часов осуществляется выдержка металла при температуре 860 °С. Далее производится охлаждение роликов до температуры 700 °С за 1,2 часа.

Операция 2 – межоперационный отжиг. Садка металла состоит из 2 валов диаметром 400 мм и длиной 4 м. Масса одного вала – 3944 кг. В ходе нагрева температура садки увеличивается линейно до 550 °С в течение 3 часов. Далее производится 3-х часовая выдержка металла при этой температуре, а затем – его охлаждение до температуры 350 °С за 4 часа.

Операция 3 – «стрессовый» отжиг после сварки изделия. Масса садки – 3600 кг. Согласно технологии температура металла увеличивается до 620 °С в течение 6,5 часов. В дальнейшем осуществляется выдержка садки при этой температуре (3 часа), затем медленное охлаждение до температуры 200 °С за 18,5 часов.

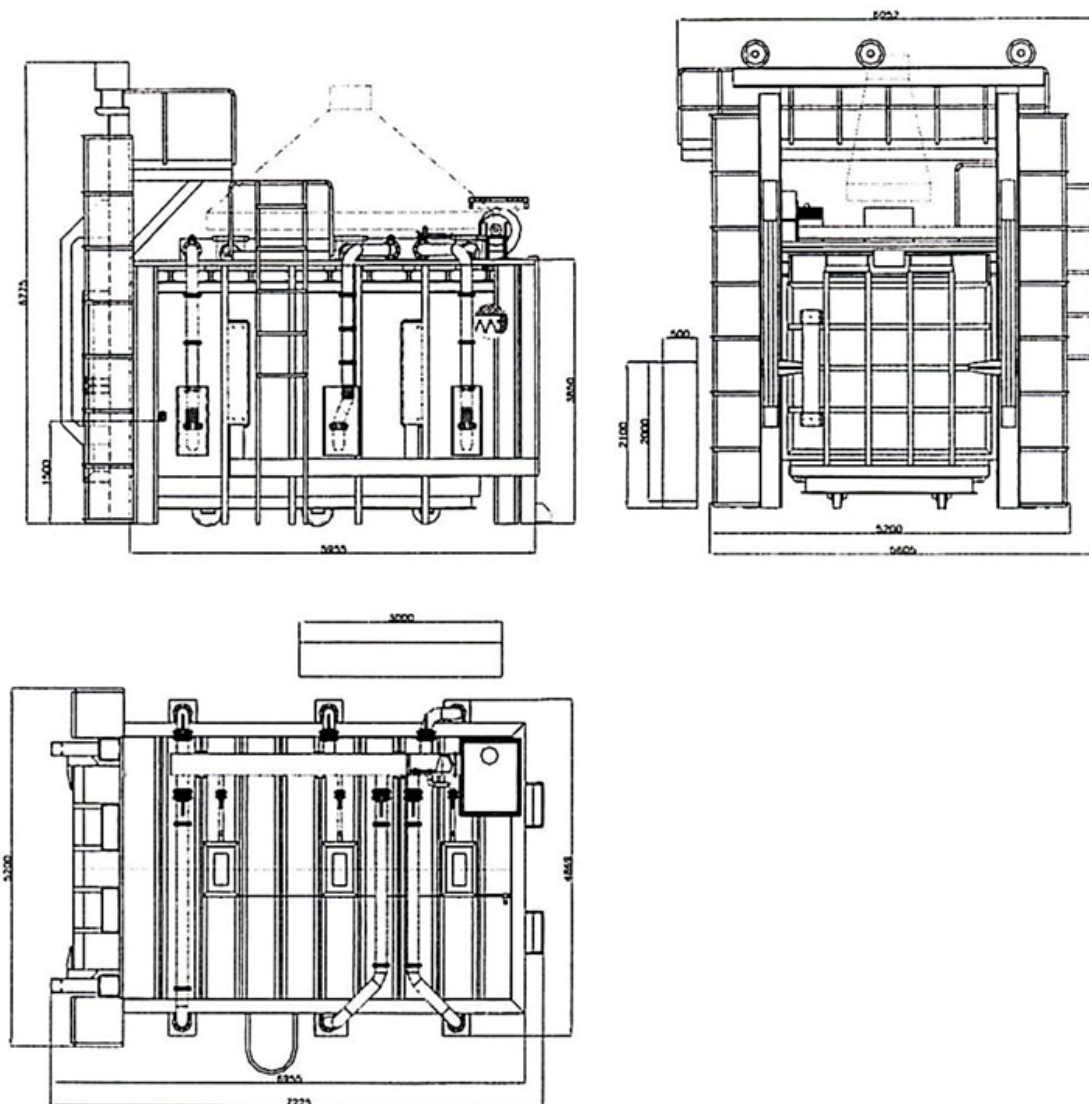


Рис. 1. Схема электрической камерной печи с выдвижным подом [5]

## Анализ работы печи

Для анализируемых операций термической обработки определены производительность печи и потребление энергии. Результаты показаны на рис. 2 и 3.

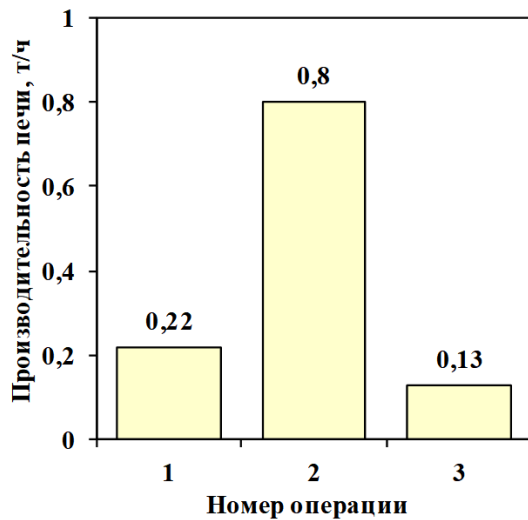


Рис. 2. Производительность печи

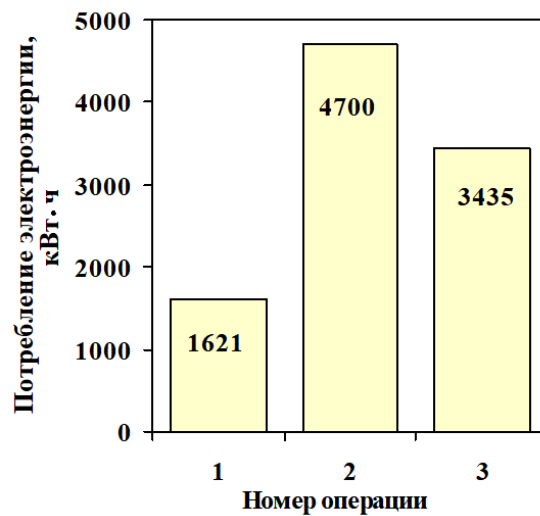


Рис. 3. Потребление энергии

Анализ рисунков показывает, что операции термической обработки характеризуются низкой производительностью печи и высоким расходом энергии. Это связано со спецификой термической обработки.

Наибольшее потребление энергии отмечено при межоперационном отжиге (операция 2). Сравнивая операции 1 и 2, можно отметить, что операция нормализации (1) происходит при гораздо более высоких температурах нагрева и несколько большем времени процесса, но, в то же время, эта операция характеризуется гораздо более низким расходом энергии. Это связано с геометрией нагреваемой садки. Нормализация проводилась для роликов небольших геометрических размеров, в то время как межоперационному отжигу подвергалась садка, состоящая из валов с практически в 7 раз большим диаметром.

На рис. 4 показан удельный расход энергии (WJZE), затраченной на выполнение каждой операции тепловой обработки.

Анализ рис. 4 показывает, что, несмотря на вдвое большее потребление электроэнергии при осуществлении операции 3 по сравнению с операцией 1, удельный расход теплоты (WJZE) на эти операции практически одинаков. Это связано

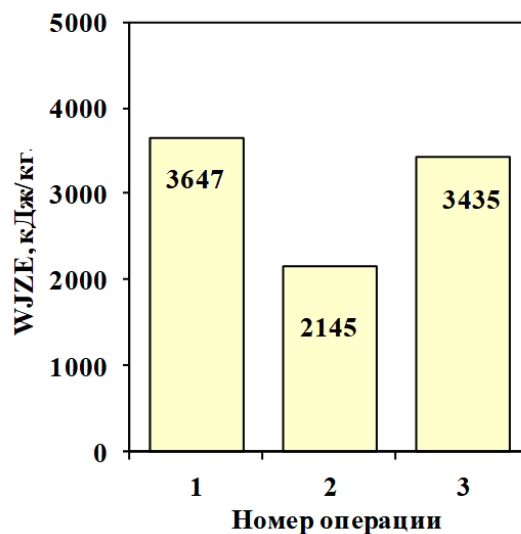


Рис. 4. Удельный расход энергии

с тем, что нормализация проводилась для садки, масса которой была в два раза меньше, чем масса садки при стрессовом отжиге, кроме того, продолжительность операции 1 была в четыре раза меньше.

### **Выводы**

Как показали исследования, энергоэффективность камерных печей для термической обработки изделий зависит от вида и температурного режима тепловой обработки металлических изделий, а также от длительности процесса и массы садки.

Результаты расчета удельного расхода теплоты (WJZE) на тепловую обработку металла являются основой для оценки энергоэффективности теплового агрегата и разработки энергосберегающих мероприятий, не требующих значительных материальных затрат. Для повышения энергоэффективности рассматриваемой печи предлагается:

- на основе анализа производственной программы термического отделения организовывать «блоки» однотипных операций термической обработки, характеризующихся аналогичными температурными режимами работы печи;
- проводить нагрев металла с максимальным использованием теплоты за счет её рационального распределения в рабочем пространстве печи;
- повысить эффективность использования рабочего пространства печи, обеспечивая максимальную производительность теплового агрегата.

Принимая во внимание характер работы отделения термообработки, вышеперечисленные мероприятия могут быть обеспечены путем применения информационной системы IFS, использование которой позволяет значительно облегчить планирование работы печей.

### **Список литературы**

1. Szargut J.: Energetyka cieplna w hutnictwie, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1983.
2. Senkara T.: Piece grzewcze w hutnictwie żelaza, „Śląsk”, Katowice 1981.
3. Michałowski M., Ciuba Z., Machniewicz J., Zięba A.: Badania i pomiary cieplne pieców w hutnictwie żelaza, „Śląsk”, Katowice 1973.
4. Góraska M., Budzik R., Michalik J., Piec R.: Racjonalizacja użytkowania paliw w piecach pokrocznych Walcowni Średniej, Hutnik – Wiadomości Hutnicze nr 5/2009, s. 318-324.
5. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa oporowego pieca komorowego PEKtw 1000/4.

# ТЕПЛОВАЯ РАБОТА НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМ ПОДОМ НА СМЕСИ ПРИРОДНОГО И ДОМЕННОГО ГАЗА

*Бровкин В.Л.<sup>1</sup>, Лазич Л.<sup>2</sup>, Варга А.<sup>3</sup>, Кизек Я.<sup>3</sup>, Ковтун А.О.<sup>1</sup>*

*1 – Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина*

*2 – Загребский Университет, Сисак, Хорватия*

*3 – Технический Университет, Кошице, Словакия*

## Аннотация

В работе проведен теоретический анализ возможности использования низкокалорийного топлива в нагревательной печи с шагающим подом при нагреве заготовок перед прокаткой. Показано, что целесообразность использования низкокалорийного топлива определяется только соотношением цен на доменный и природный газ. Определен теоретический предел экономии природного газа.

Ключевые слова: нагревательная печь, природный газ, природно-доменная смесь, замена топлива, экономия топлива, соотношение цен.

## Введение

Объектом исследований в данной работе является печь с шагающим подом, размещенная на стане 550-2 "Евраз-ДМЗ" (Днепр).

Целью работы является повышение экономичности нагрева заготовок в печи с шагающим подом при использовании смеси природного и доменного газа.

Вопросы частичной или полной замены природного газа на доменный или коксовый при нагреве металла в нагревательных печах является актуальным в первую очередь из-за высокой стоимости природного газа.

В [1] на основе анализа укрупненных тепловых балансов печей показано, что замена одного газообразного топлива другим должна производиться по соотношению:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{Q_{p,1}^H}{Q_{p,2}^H} \cdot \frac{\eta_{\text{КИТ},1}}{\eta_{\text{КИТ},2}},$$

где индексы 1 и 2 – замещаемое и замещающее топливо;  $V_1$  и  $V_2$  – расход топлива, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{p,1}^H$  и  $Q_{p,2}^H$  – удельная теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>;  $\eta_{\text{КИТ},1}$  и  $\eta_{\text{КИТ},2}$  – коэффициент использования химической энергии топлива:  $\eta_{\text{КИТ}} = \frac{Q_p^H + Q_v - Q_{yx}}{Q_p^H}$ ;  $Q_v$ ,  $Q_{yx}$  – физическая

теплота подогретого воздуха и физическая теплота уходящего из печи дыма, отнесенные к 1 м<sup>3</sup> топлива.

Другими словами, замена топлива должна производиться с учетом условий сжигания топлива, которые, в свою очередь, зависят от условий теплообмена в камере сжигания топлива. Это теплотехнический подход к замене топлива.

На практике также интересен экономический анализ, учитывающий изменение стоимости топлива. С этим вопросом тесно связан вопрос формирования цены на доменный и коксовый газ в зависимости от стоимости природного газа.

### **Постановка задачи**

Для оценки экономической целесообразности выбора того или иного топлива был выполнен теплотехнический расчет печи с шагающим подом по методике, предложенной проф. Ольшанским В.М. [2]. Методика учитывает наличие сводовых плоскопламенных горелок. Топливо представляет собой смесь природного и доменного газа.

Исходные данные в расчетах приняты следующие:

- Производительность печи: 51 т/час;
- Заготовки прямоугольного пересечения 145 x 145 мм;
- Конечная температура поверхности металла: 1200 °С;
- Конечный перепад температур по пересечению: 50 °С;
- Температура подогрева воздуха: 150 °С;
- Длина заготовок: 3,16 м;
- Число рядов заготовок в печи: 2;
- Высота рабочего пространства печи 1,52 м;
- Ширина печи: 7,22 м;
- Длина томильной зоны: 7 м;
- Общая длина сварочных зон 13,6 м;
- Длина методической зоны 9,3 м;
- Теплота сгорания природного газа: 35 МДж/м<sup>3</sup>;
- Теплота сгорания доменного газа: 4 МДж/м<sup>3</sup>;
- Коэффициент теплоотдачи от факела к своду: 70 Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- Цена доменного газа: 0,84 грн/м<sup>3</sup> (на 1.07.2017г.);
- Цена природного газа: 10,20 грн/м<sup>3</sup> (на 1.07.2017г.).

### **Результаты исследований**

На рисунках 1 – 2 показаны отдельные результаты расчетов.

Из рис. 1 видно, что при увеличении доли природного газа в смеси будет снижаться удельный расход теплоты.

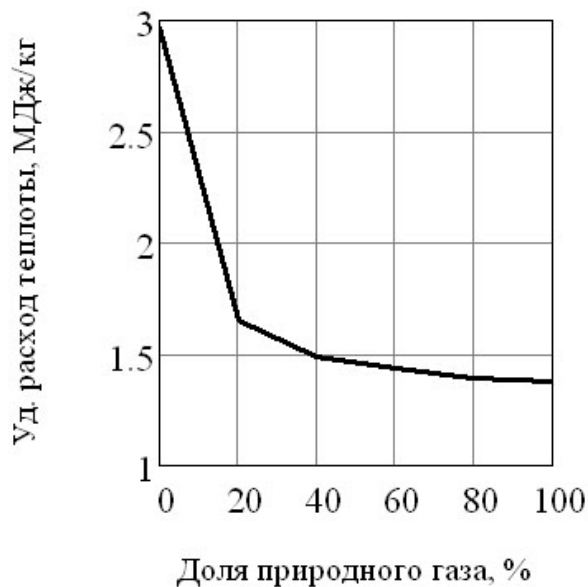


Рис. 1. Зависимость удельного расхода теплоты от доли природного газа в природно-доменной смеси

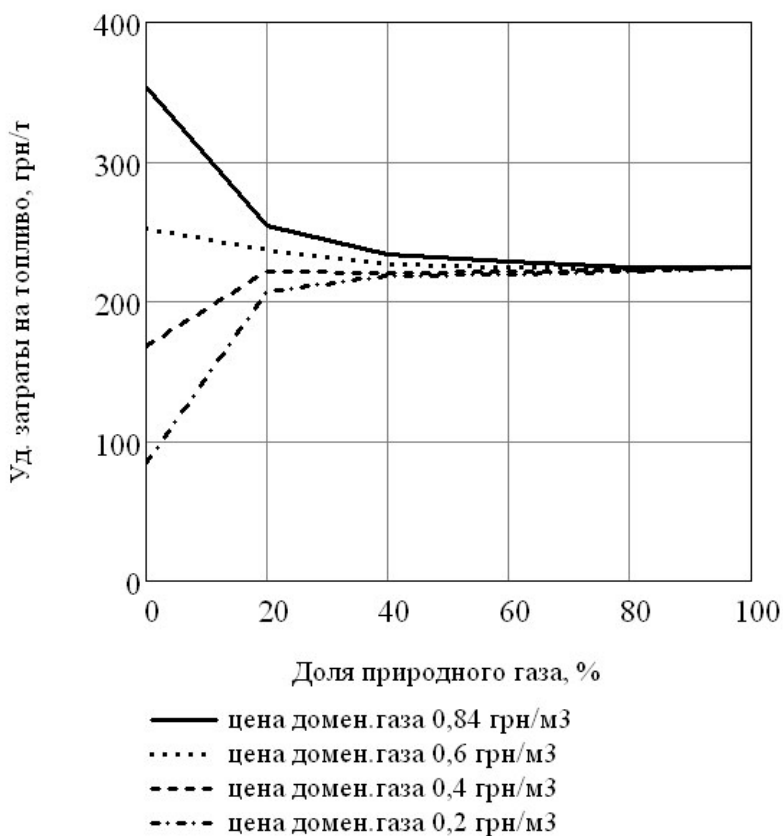


Рис. 2. Зависимость удельных затрат на топливо от доли природного газа в природно-доменной смеси при различной цене доменного газа

Из рис. 2 видно, что при увеличении теплоты сгорания топлива, расходы на топливо ведут себя неоднозначно. При цене доменного газа более 0,4 – 0,5 грн/м³ замена природного газа низкокалорийным

топливом экономически нецелесообразна. При цене доменного газа менее  $0,2 - 0,4$  грн/м<sup>3</sup> вариант замены природного газа природно-доменной смесью возможен при доле природного газа 20 %. При этом максимальное сокращение абсолютного расхода природного газа составляет 14,5 %. Мы называем это теоретическим пределом: при доле природного газа 20 % действительная температура дыма от сжигания низкокалорийного топлива соответствует максимальным технологическим зонам температур. При снижении доли природного газа ниже 20 % технологический процесс нагрева заготовок возможен только при более высокой температуре подогрева воздуха и в данной работе не рассматривается.

Переход с природного газа на природно-доменную смесь при существующих отношениях цен на топливо в рассматриваемой печи с шагающим подом является нецелесообразным.

Целесообразность перехода с природного газа на низкокалорийную смесь газов наступает при отношении цен на доменный и природный газ 1 : 25. В настоящее время на предприятии отношение цен составляет 1 : 12. Таким образом, установленная на предприятии цена доменного газа в размере  $0,84$  грн/м<sup>3</sup> не стимулирует проведение работ по экономии природного газа. При снижении цены на доменный газ до  $0,2 - 0,4$  грн/м<sup>3</sup> возможно получить экономию природного газа до 14,5 %.

### **Выводы**

1. Теоретическая максимальная экономия природного газа при переходе нагревательной печи с шагающим подом с отопления природным газом на природно-доменную смесь составляет 14,5 % при доле природного газа в смеси 20 %.

2. Возможность перехода с природного газа на природно-доменную смесь зависит от соотношения цен на доменный и природный газ – при соотношении более 1 : 25 использование доменного газа нецелесообразно.

3. На действующей печи с шагающим подом соотношение цен на доменный и природный газ составляет 1 : 12. Поэтому замена природного газа природно-доменной смесью экономически нецелесообразна при любой доле природного газа в смеси.

### **Список литературы**

1. Румянцев В. Д. Теплотехника. – Днепропетровск : Пороги, 2011. – 543 с.
2. Металлургические печи. Теория и расчеты. В 2 т. Т.2 / В. И. Губинский [и др.]. Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. – Минск : Белорус. наука, 2007. 832 с.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

*Гупало Е.В.<sup>1</sup>, Здоровиченко С.А.<sup>2</sup>, Седнев А.Ю.<sup>2</sup>, Гупало В.И.<sup>2</sup>*

*1 – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

*2 – Комплексное производство ЧАО "ПТП "УКРЭНЕРГОЧЕРМЕТ",*

*г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

В работе приведены результаты теплотехнических испытаний вращающейся печи для обжига известняка при использовании в качестве технологических топлив природного газа или пылеугольного топлива. Выполнено сравнение технико-экономических показателей работы печи для рассмотренных вариантов ее отопления. Предложена методика расчета экономической эффективности замены природного газа пылеугольным топливом. Показано, что применение приведенной методики расчета позволяет оценить ожидаемый экономический эффект от внедрения мероприятия с погрешностью не превышающей 1 – 2 %.

Ключевые слова: природный газ, пылеугольное топливо, известняк, известь, вращающаяся печь, замена топлива, экономическая эффективность.

## **Введение**

Высокая стоимость природного газа способствует поиску промышленными предприятиями альтернативных видов топлив, обеспечивающих снижение затрат на тепловую обработку материалов. Особо остро вопросы энергосбережения стоят перед предприятиями черной металлургии, которые являются одними из основных потребителей природного газа в промышленности. В технологическом процессе производства извести в качестве альтернативы природному газу может рассматриваться пылеугольное топливо (ПУТ), которое в настоящее время широко используется в доменных печах вместо природного газа [1].

**Цель настоящей работы** – оценка эффективности замены природного газа пылеугольным топливом при обжиге известняка во вращающихся печах.

## **Краткая техническая характеристика вращающейся печи**

В качестве объекта исследования выбрана вращающаяся печь, представляющая собой противоточный тепло-массообменный агрегат цилиндрической формы длиной 75 м и диаметром 3,6 м. Стальной корпус печи (барабан) футерован изнутри огнеупорным кирпичом толщиной 230 мм и установлен с уклоном в сторону выгрузки под углом 3,5°. Скорость вращения барабана составляет 0,67 – 1,34 об/мин. Печь имеет загрузочную и откатную головки. Известняк поступает в шахтные подогреватели, где нагревается уходящими дымовыми газами до температуры 350 – 450 °С. Известь (готовый продукт) на выхо-

де из печи имеет температуру 1100 – 1150 °С. Физическая теплота извести используется для подогрева воздуха до 300 – 400 °С, подаваемого на сжигание топлива. Печь оборудована одной многотопливной горелкой фирмы FCT. Для поджигания ПУТ в горелку подается природный газ в количестве 2 – 3 % от общего расхода топлива на печь (расход природного газа 80 – 100 м<sup>3</sup>/ч). Стоимость топлива на момент выполнения исследований: природного газа – 6957 грн/тыс. м<sup>3</sup>; ПУТ – 2500 – 3500 грн/т (в зависимости от стоимости угля). Таким образом, стоимость смеси ПУТ и природного газа, подаваемых в горелочное устройство, составляет 2590 – 3600 грн/т.

Основным недостатком в работе печи на ПУТ является образование гарнисажных колец на внутренней поверхности кладки вращающегося барабана на расстоянии 8 – 9 м от носика горелочного устройства. Основной причиной образования гарнисажа является изменение формы факела ПУТ при переменных расходах топлива в переходных режимах работы печи.

### Теплотехнические испытания вращающейся печи

Сравнительные теплотехнические испытания выполнены при работе печи с производительностью 13200 кг/ч по готовой продукции при одинаковом химическом составе известняка. Испытания проводились при отоплении печи природным газом и топливом, состоящем из смеси ПУТ (98 %) и природного газа (2 %). Результаты теплотехнических испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты теплотехнических испытаний вращающейся печи для обжига извести при отоплении природным газом (ПГ) и пылеугольным топливом (ПУТ)

№ п/п	Показатель	Топливо	
		ПГ	смесь ПУТ и ПГ
1	2	3	4
1	<u>Топливо</u>		
	Теплота сгорания топлива	8200 ккал/м <sup>3</sup>	7573 ккал/кг
	Расход топлива	2900 м <sup>3</sup> /ч	3060 кг/ч
2	<u>Воздух</u>		
	Коэффициент расхода воздуха	1,2	1,2
	Действительный расход воздуха	11,76 м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	10,72 м <sup>3</sup> /кг
	Температура подогрева воздуха, °С	300	300
3	<u>Дымовые газы</u>		
	Удельный выход дыма	12,8 м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	11,05 м <sup>3</sup> /кг
	Температура уходящего дыма, °С	800	800
	Состав сухих продуктов сгорания на выходе из печи (по результатам газового анализа):		
	- CO <sub>2</sub> , %	21,3	25,7
- O <sub>2</sub> , %	3,3	3,1	

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
	- N <sub>2</sub> , %	75,4	71,2
	- SO <sub>2</sub> , %	-	0,02
4	<u>Известняк</u> Состав известняка, кг/кг: - CaCO <sub>3</sub> - MgCO <sub>3</sub> Производительность по известняку, кг/ч Температура подогрева известняка, °С	0,732 0,242 26000 410	0,732 0,242 26000 410
5	<u>Известь</u> Состав извести, кг/кг: - CO - MgO Производительность печи по извести, кг/ч Температура извести на выходе из печи, °С	0,61 0,258 13200 1100	0,61 0,258 13200 1100
6	<u>Тепловой баланс печи</u> Приход теплоты, Гкал/ч (%): - физическая теплота воздуха - химическая теплота топлива Расход теплоты, Гкал/ч (%): - нагрев известняка от 410 до 850 °С - диссоциация известняка - нагрев извести от 850 до 1100 °С - нагрев неразложившегося известняка от 410 до 700 °С - потери с CO <sub>2</sub> , образовавшимся при диссоциации известняка - потери с уходящим дымом - потери с уносом пыли - потери теплопроводностью через кладку печи - неучтенные тепловые потери	27,023 (100,0) 3,243 (12,0) 23,78 (88,0) 27,023 (100,0) 2,471 (9,14) 8,176 (30,26) 0,682 (2,52) 0,114 (0,42) 1,742 (6,45) 10,453 (38,68) 0,276 (1,02) 3,044 (11,27) 0,65 (0,24)	26,293 (100,0) 3,12 (11,87) 23,173 (88,13) 26,293 (100,0) 2,471 (9,4) 8,176 (31,1) 0,682 (2,59) 0,114 (0,43) 1,742 (6,63) 9,765 (37,14) 0,276 (1,05) 3,044 (11,58) 0,023 (0,08)
7	<u>Технико-экономические показатели печи</u> Коэффициент полезного действия печи, % Коэффициент использования теплоты топлива Удельный расход ПГ, м <sup>3</sup> /т извести Удельный расход ПУТ, кг/т извести Удельный расход топлива (ПУТ и ПГ) Удельный расход условного топлива, кг у.т./т извести Удельный расход теплоты, ккал/кг извести Удельные затраты на топливо при обжиге известняка, грн/т	41,92 0,613 219,7 - - 257,4 1800 1528,45	43,1 0,629 4,6 227,2 231,8 250,8 1755,4 600,4 – 834,5

Из таблицы 1 видно, что, независимо от используемого топлива, с подогретым воздухом в печь поступает 12 % от подведенной теплоты, а количество теплоты, выделившееся от сжигания топлива, составляет 88 %. На процесс обжига известняка расходуется 43 % теплоты, поступающей в печь. Потери теплоты с уходящим дымом и  $\text{CO}_2$ , образовавшемся в процессе диссоциации известняка, составляют 44 – 45 %, в то время как тепловые потери через кладку печи – 11,5 % от всей теплоты, подведенной в печь. При одинаковой производительности печи и соблюдении одинакового температурного режима обжига разница в удельных расходах условного топлива и теплоты, затраченной на процесс обжига, при использовании природного газа и ПУТ не превышает 2,5 %.

### **Экономическая эффективность замены природного газа ПУТ**

Основным показателем экономической эффективности применения ПУТ для отопления печи является снижение затрат на топливо, которые могут быть определены как:

$$\mathcal{E} = \frac{C_{\text{Г}} - C_{\text{ПУТ}}}{C_{\text{Г}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $C_{\text{Г}}$  и  $C_{\text{ПУТ}}$  – затраты на топливо при работе печи, соответственно на природном газе и на ПУТ, грн/ч:

$$C_{\text{Г}} = V_{\text{Г}} \cdot \text{Ц}_{\text{Г}}; \quad (2)$$

$$C_{\text{ПУТ}} = B_{\text{ПУТ}} \cdot \text{Ц}_{\text{ПУТ}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{Г}}$  – расход природного газа,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\text{Ц}_{\text{Г}}$  – цена природного газа,  $\text{грн}/\text{м}^3$ ;  $B_{\text{ПУТ}}$  – расход ПУТ,  $\text{кг}/\text{ч}$ ;  $\text{Ц}_{\text{ПУТ}}$  – цена ПУТ,  $\text{грн}/\text{кг}$ .

С учетом (2) и (3) получим:

$$\mathcal{E} = \left( 1 - \frac{B_{\text{ПУТ}} \cdot \text{Ц}_{\text{ПУТ}}}{V_{\text{Г}} \cdot \text{Ц}_{\text{Г}}} \right) \cdot 100\%. \quad (4)$$

На основе результатов теплотехнических испытаний, приведенных в таблице 1, с использованием (4) выполнен расчет снижения затрат на обжиг известня при замене природного газа смесью пылеугольного топлива и природного газа. Как показали расчеты, при стоимости смеси ПУТ и природного газа 2590 грн/т снижение затрат на топливо достигает 60,7 %. При увеличении стоимости смеси ПУТ и природного газа до 3600 грн/т снижение затрат на топливо уменьшается до 45,4 %.

## Оценка ожидаемой экономической эффективности перевода печи на отопление ПУТ

При известных технико-экономических показателях работы печи на природном газе ожидаемое снижение затрат на топливо при переводе печи на ПУТ может быть определено расчетным путем, исходя из следующих условий:

- 1) производительность печи, температурный режим обжига, состав и влажность известняка при замене топлива не изменяются;
- 2) количество теплоты, оставшейся в рабочем пространстве печи и пошедшей на совершение тепловой работы и покрытие тепловых потерь через кладку, остается постоянным [2, 3]:

$$V_{\Gamma} \cdot Q_{\text{н}\Gamma}^{\text{p}} \cdot \eta_{\Gamma} = V_{\text{пут}} \cdot Q_{\text{нпут}}^{\text{p}} \cdot \eta_{\text{пут}}, \quad (5)$$

где  $Q_{\text{н}\Gamma}^{\text{p}}$  – низшая рабочая теплота сгорания природного газа, кДж/м<sup>3</sup>;  
 $Q_{\text{нпут}}^{\text{p}}$  – низшая рабочая теплота сгорания ПУТ, кДж/кг;  $\eta_{\Gamma}, \eta_{\text{пут}}$  – коэффициенты использования теплоты топлива при отоплении печи природным газом и ПУТ, соответственно.

Из условия (5) определяется предполагаемый расход ПУТ:

$$V_{\text{пут}} = V_{\Gamma} \cdot \frac{Q_{\text{н}\Gamma}^{\text{p}} \cdot \eta_{\Gamma}}{Q_{\text{нпут}}^{\text{p}} \cdot \eta_{\text{пут}}}, \text{ кг/ч.} \quad (6)$$

Тогда из уравнения (4) с учетом (6) получим расчетную формулу для определения ожидаемого экономического эффекта от замены топлива:

$$\Xi = \left( 1 - \frac{C_{\text{пут}} \cdot Q_{\text{н}\Gamma}^{\text{p}} \cdot \eta_{\Gamma}}{C_{\Gamma} \cdot Q_{\text{нпут}}^{\text{p}} \cdot \eta_{\text{пут}}} \right) \cdot 100\%. \quad (7)$$

Коэффициент использования теплоты топлива при работе печи на ПУТ ( $\eta_{\text{пут}}$ ), входящий в формулу (7), определяется по результатам расчета горения ПУТ при коэффициенте расхода воздуха, температурах подогрева воздуха и уходящих дымовых газов, соответствующих работе печи на природном газе.

Расчеты по формуле (7) показывают, что при стоимости ПУТ 2500 грн/т ожидаемое снижение затрат на топливо достигает 61,8 %, а при стоимости ПУТ 3500 грн/т – 46,6 %. Таким образом, применение приведенной методики позволяет оценить ожидаемую экономическую эффективность от внедрения мероприятия с погрешностью не превышающей 1,2 %. Стоимость природного газа при отоплении печи ПУТ не учитывается.

## **Выводы**

На основе теплотехнических испытаний вращающейся печи для обжига известняка определена экономическая эффективность замены природного газа пылеугольным топливом. Показано, что при одинаковой производительности печи и одинаковом составе известняка экономия средств по статье «топливо технологическое» составляет 45,4 – 60,7 % в зависимости от стоимости пылеугольного топлива.

Предложена методика расчета ожидаемой экономической эффективности внедрения технологии обжига известняка с использованием пылеугольного топлива вместо природного газа, основанная на фактических технико-экономических показателях действующей печи при работе на природном газе и теоретических расчетах горения пылеугольного топлива и природного газа. Использование предложенной методики позволяет оценить ожидаемую экономию средств с достаточной для практики точностью

## **Список литературы**

1. Грес Л. П. Энергоэффективность и защита окружающей среды от промышленных загрязнений / Л. П. Грес, А. О. Еремин, С. А. Карпенко, Е. А. Каракаш. – Днепропетровск : Пороги, 2015. – 392 с.
2. Розенгарт Ю. И. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю. И. Розенгарт, Б. Б. Потапов, В. М. Ольшанский, А. В. Бородулин. – Киев; Донецк : Вища школа. Головное изд-во, 1986. – 296 с.
3. Ревун М. П. Высокотемпературные теплотехнические процессы и установки в металлургии / [Ревун М. П., Потапов Б. Б., Ольшанский В. М., Бородулин А. В.] – Запорожье : Изд-во ЗГИА, 2002. – 443 с.

# **ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ У ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ І ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ФІЗИЧНОЇ ТЕПЛОТИ КОЛОШНИКОВОГО ГАЗУ**

*Каракаш Є.О., Дереза С.А.*

*Національна Металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

## **Анотація**

Питання зниження питомого енергоспоживання при виробництві чавуну актуальні протягом декількох десятиків років [1]. Одним з основних напрямків зниження питомого енергоспоживання є зменшення питомої витрати коксу за рахунок вдування пиловугільного палива (ПВП) та використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР). В сучасних умовах роботи доменного цеху найбільш перспективним є використання саме низькопотенційних ВЕР.

Ключові слова: вторинні енергетичні ресурси, тепловий насос, утилізація теплоти, колошниковий газ.

## **Вступ**

Залежно від використовуваної технології і якості ПВП даний захід дозволяє заощадити від 10 % до 40 % споживаного коксу. Якщо раніше споживання коксу при виробництві чавуну становило 500 – 550 кг/т чавуну, то на деяких заводах за рахунок використання ПВП цей показник був знижений до 270 – 237 кг коксу/т чавуну.

Однак, процес підготовки ПВП пов'язаний з рядом технологічних складнощів. В першу чергу це якісна сушка перед вдуванням в піч через повітряні фурми. Для сушки можуть використовувати природний і доменний газ, а також продукти горіння, що відходять від доменного повітрянагрівача, та деякі інші ВЕР, ефективне використання яких, призведе до зниження собівартості виробництва чавуну. Корисно оцінити використання ВЕР на доменних печах у сучасних умовах.

## **Потенціал складових доменного комплексу щодо використання ВЕР**

Якщо розглядати основні складові комплексу доменної печі, то необхідно розглянути у вигляді оцінки теплового балансу наступних об'єктів:

- 1) доменної печі;
- 2) системи газоочищення;
- 3) доменних повітрянагрівачів.

### *Доменна піч.*

Велика частина всієї теплової енергії, що виділяється в шахті та вноситься з гарячим дуттям в доменну піч витрачається: на фізико-хімічні процеси всередині шахти, на зміну ентальпії і плавлення ком-

понентів шихти, на перегрів готового чавуну і шлаку, а також на нагрів теплоносія і зміну його агрегатного стану в системі охолодження, крім того частина теплової енергії відходить з колошниковим газом.

Найбільш реальним джерелом ВЕР є фізична теплота теплового агента системи охолодження, фізична теплота колошникового газу, а також часткове використання теплоти перегрітого рідкого шлаку. Але подібне використання ВЕР практично не застосовується, за винятком рідкого використання котлів-утилізаторів для системи випарного охолодження [2]. Використання фізичної теплоти перегрітого рідкого чавуну є навіть теоретично важко досяжною метою, тому що його перегрів відносно невеликий.

У системах охолодження доменної печі основним тепловим агентом є вода, яка в системах випарного охолодження може бути як в газоподібному так і в рідкому стані. На більшості підприємств для її охолодження використовуються градирні або спеціальні ставки-охолоджувачі без утилізації фізичної теплоти.

#### *Система газоочищення доменної печі.*

Основним і єдиним тепловим ресурсом цього об'єкта є фізична теплота колошникового газу. При виході з доменної печі колошниковий газ має температуру від 170 °С до 450 °С, в залежності від особливостей доменної плавки. При цьому температура доменного газу після очищення становить від 15 °С до 65 °С відповідно. Використовувати високу температуру колошникового газу у стандартних теплообмінниках до системи газоочищення важко через значну запиленість (до 20 г/м<sup>3</sup>). Стандартні теплообмінні апарати практично не можуть працювати при такому вмісті пилу в одному з теплових агентів.

#### *Доменні повітрянагрівачі.*

Основним джерелом вторинної теплової енергії є димові гази з температурою 180 – 250 °С, що йдуть з доменних повітрянагрівачів [3]. Ці ВЕР успішно використовуються на багатьох підприємствах, однак і тут є ряд обмежень, які знижують ефективність утилізації фізичної теплоти. Серед яких є умова мінімальної температури диму, що йде з теплообмінника, яка повинна бути не менше 110 – 230 °С, так як точка роси сірчаних кислот, які містяться в димі, знаходиться на цьому рівні. Якщо температура диму впаде нижче вказаного значення, то станеться випадіння крапельної вологи на стінки теплообмінника і це призведе до кислотної корозії. Приклади подібних явищ спостерігалися на меткомбінаті Запоріжсталь у 2005 році.

Таким чином, можна зробити висновок, що в більшості наведених прикладів використовується лише частина ВЕР [4].

## **Використання системи теплових насосів та їх розрахунок для умов доменного цеху**

У роботі пропонується використання системи утилізації фізичної теплоти на основі теплових насосів і теплових труб. Дана система включає до свого складу проміжний теплоносій і може працювати з низькопотенційними джерелами фізичної теплоти [5].

Одним із пропонованих рішень поставленої задачі є відбір енергії від доменного газу, як до системи газоочищення, так і після неї. При цьому, теплообмінник з проміжним теплоносієм (фреоном або маслом) не обов'язково повинен взаємодіяти безпосередньо з запиленним колошниковим газом, а може бути надійно закріплений на зовнішній поверхні газопроводу відведення колошникового газу. У цьому випадку кількість теплоти яка відбирається від колошникового газу, буде залежати від площі теплообмінної поверхні, сумарних коефіцієнтів теплопередачі від поверхонь до газового середовища на «гарячій» і «холодній» сторонах, а також від теплового опору в місцях контакту трубчатки з поверхньою трубопроводу колошникового газу. В середньому температура колошникового може бути знижена на 70 – 120 °С до входу в систему газоочищення. З іншого боку теплообмінник з проміжним теплоносієм може бути розміщений усередині повітропроводу, що подає повітря на горіння в доменні повітрянагрівачі (ПН). ККД цієї установки може становити 45 – 80 %, що дозволить підвищити температуру гарячого дуття на 10 – 15 °С. При загальному зниженні витрат доменного газу на опалення ВН на 6 – 8 %, середній показник економії питомих енерговитрат в доменному переділі складе близько 0,5 % [6]. При проектуванні запропонованої системи можна виключити установку компресорного устаткування і розширювальних клапанів (які є на всіх системах теплових насосів), а також виключити зміну агрегатного стану проміжного теплоносія. У готовому вигляді це система теплообмінників з проміжним високотемпературним теплоносієм. Але якщо температура на «гарячій» стороні подібної системи нижче 180 – 200 °С, то таке виконання обладнання видається малоперспективним. А для температури доменного газу за системою газоочищення представляється можливим лише використання класичного теплового насоса або теплових трубок. Температура газу після газоочищення становить 40 – 65 °С. Відзначимо, що утилізувати теплоту при менших температурах не має ніякого практичного сенсу. Нам бачиться, що головним завданням в даному випадку, є не стільки утилізація невеликої кількості фізичної теплоти, а загальне зниження температури доменного газу перед пальниками. Справа в тому, що доменний газ з відносно високою температурою (від 45 °С і вище) має досить велику вологовміст, що знижує його калорійність. У роботі [7] були досить докладно розглянуті дані вмісту вологи доменного газу на реальних печах в залежності від температури і вплив цих парамет-

рів на кінцеву температуру горіння в ПН. Для утилізації цієї теплоти і зниження температури доменного газу пропонується використовувати тепловий насос з теплоносієм для внутрішнього контуру типу фреон.

Розрахунок роботи теплового насосу в умовах доменного цеху та його основних параметрів згідно [5] відбувався за наступних вихідних даних для випарника охолодження доменного газу:

- холодильний агент: фреон R22;
- температура кипіння холодильного агенту:  $t_{\phi} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- ізобарна теплоємність фреону:  $C_p^{\phi} = 0,714 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$ ;
- температура доменного газу на вході:  $t_1 = 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- температура доменного газу на виході:  $t_2 = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- температура інею на поверхні випарника:  $t_{\text{ин}} = -12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- початковий вологовміст доменного газу:  $d_1 = 250 \text{ г/м}^3$ ;
- кінцевий вологовміст доменного газу:  $d_2 = 54 \text{ г/м}^3$ ;
- об'ємна витрата доменного газу:  $V_{\text{дг}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ м}^3 / \text{год}$ .

У результаті розрахунку визначено, що потужність компресора складає  $N = 330 \text{ кВт}$ .

Розрахунок конденсатора для нагріву повітря є аналогічним розрахунку випарника. За результатами розрахунку густина теплового потоку складає  $q = 565 \text{ Вт/м}^2$ ; площа теплопередавальної поверхні апарату –  $F_3 = 1219 \text{ м}^2$ .

COP – коефіцієнт трансформації, який показує відношення виробленої і теплової енергії до електроенергії, спожитою тепловим насосом. Коефіцієнт також можна визначити відношенням теплопродуктивності конденсатора до потужності гвинтового компресора.

COP теплового насосу визначається як:

$$\eta_{\text{COP}} = \frac{Q_{\text{к}}}{N} = \frac{1378}{330} = 4,2.$$

Розрахувавши COP даного теплового насосу, робимо висновок, що тепловий насос виробляє теплової енергії у 4,2 рази більше, ніж він споживає електроенергії на виконання роботи.

### Висновки

Використання системи теплових насосів для зниження питомих енергетичних витрат в умовах доменного цеху є досить перспективним напрямом і може бути застосовано практично на всіх підприємствах де є домені печі.

### Список літератури

1. Карп И. Н. Энергосберегающие технологии в металлургии / И. Н. Карп, А. Н. Зайвый // Экологические и ресурсосбережение, 2006 . – С. 13–20.
2. Розенгарт Ю. И. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии / Ю.И. Розенгарт. – К. : Вища школа, 1988. – 328 с.
3. Каракаш Е. А. Рециркуляция уходящих газов в тепловых установках аглодомного производства / Каракаш Е. А., Грес Л. П. // Acta Metallurgica Slovaca. – 2000. – № 3. – Р. 135–138.
4. Грес Л. П. Новые подходы к созданию высокоэффективных доменных воздухонагревателей / Грес Л. П., Каракаш Е. А., Флейшман Ю. М. // Металлургическая теплотехника. – 2009. – 1 (16). – С. 65–71.
5. Д. Рей. Тепловые насосы / Д. Рей, Д Макмайкл. – М. : Энергоиздат, 1982. – 223 с.
6. Каракаш Е. А. Повышение энергоэффективности нагрева доменного дутья на эксплуатируемых доменных печах путем установки системы теплообменников для нагрева компонентов горения и модернизации воздухонагревателей / Каракаш Е. А., Грес Л. П., Флейшман Ю. М. // Металл и литье Украины. – № 5. – 2014.
7. Грес Л. П. Теплообменники доменных печей / Грес Л. П., Карпенко С. А., Миленина А. Е. – Днепропетровск : Пороги, 2012. – 491 с. – ISBN 978-617-518-207-9

# ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ЧУГУНОВОЗНОГО КОВША

*Колодяжный В.С., Губинский М.В., Сленко С.А.*

*Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

## Аннотация

Рассмотрены вопросы теплообмена в чугуновозном ковше с целью определения тепловых потерь при транспортировке ковша от доменного цеха до миксерного отделения сталеплавильного цеха и разработки мероприятий по их снижению. Задача решается с помощью математического моделирования с использованием метода конечных разностей.

Ключевые слова: чугуновозный ковш, тепловые потери, математическое моделирование, экран.

## Введение

Металлургия является одной из наиболее энергоемких отраслей промышленности, связанных с тепловой обработкой материалов [1]. Затраты энергии на получение конечного продукта составляют около 30 % от общего потребления энергии в промышленности. Решение вопросов энергосбережения в металлургии позволяет не только уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду, создать экономию энергетических и материальных ресурсов, но также повысить конкурентоспособность отрасли на мировом рынке.

## Постановка задачи

Определить тепловые потери чугуновозного ковша при транспортировке жидкого чугуна от литейного двора доменного цеха до миксерного отделения сталеплавильного цеха и пустого ковша обратно, а также определить влияние на тепловые потери чугуновозного ковша мероприятий по их снижению при следующих допущениях:

- теплопроводность жидкого чугуна равна бесконечности;
- не учитываются переходные процессы при заполнении ковша и при сливе чугуна;
- сложная форма ковша заменена цилиндром, у которого поверхность и объем такие же как у реального ковша;
- учитывая отношение внешнего радиуса футеровки к внутреннему, цилиндрическую стенку рассматриваем как развернутую плоскую;
- теплоотдача конвекцией рассчитывается при постоянном коэффициенте теплоотдачи;
- температура окружающей среды в течение всего периода расчета неизменна.

## Метод решения

Задача решается с помощью математического моделирования, используя метод конечных разностей и уравнения неявного вида [2]. При этом используются известные законы передачи тепла излучением, теплопроводностью и конвекцией [3].

Задача является циклической и состоит из двух ветвей: первая и основная от момента наполнения чугуновозного ковша жидким чугуном в доменном цехе до момента слива чугуна в сталеплавильном цехе, вторая – от момента слива чугуна до момента наполнения чугуновозного ковша жидким чугуном. Начальное температурное состояние футеровки чугуновозного ковша на результаты решения не влияет, так как цикл, состоящий из транспортировки полного ковша, а затем транспортировки пустого ковша, повторяется пока не наступает с заданной точностью квазистационарное состояние.

На рис. 1 представлена схема чугуновозного ковша, который состоит из трех геометрических форм: 1 – усеченный конус, 2 – половина сферы, 3 – цилиндрические вставки, 4 – экран.

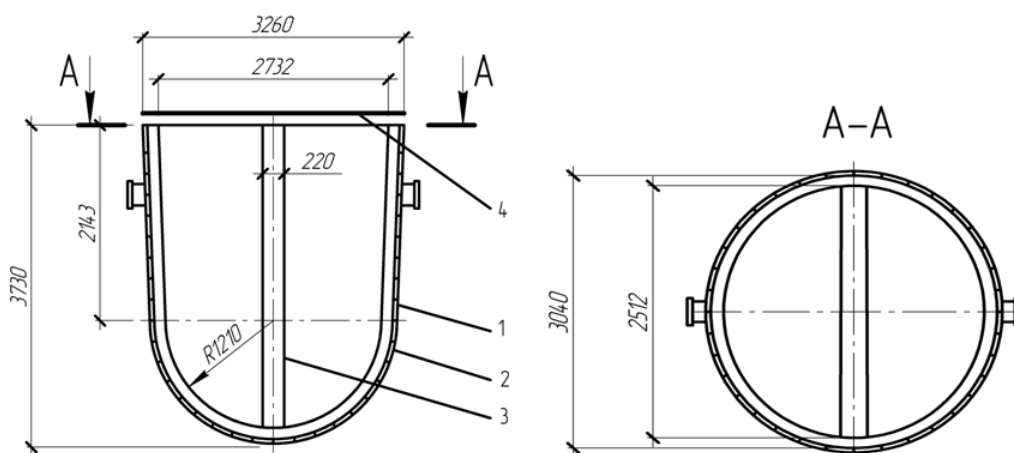


Рис.1. Схема чугуновозного ковша

Для определения тепловых потерь составлено уравнение теплового баланса при транспортировке полного чугуновозного ковша:

$$\Delta Q_{\text{чуг}} = (q_{\text{гп}} + q_{\text{ф}}) \cdot \tau_{\text{трп}}, \quad (1)$$

где  $\Delta Q_{\text{чуг}}$  – потери теплоты жидким чугуном при его транспортировке от доменного цеха до миксерного отделения сталеплавильного цеха, Дж;

$q_{\text{гп}}$  – потери теплоты от зеркала чугуна в ковше, Вт;

$q_{\text{ф}}$  – потери теплоты на нагрев футеровки, Вт;

$\tau_{\text{трп}}$  – время транспортировки полного ковша, с.

Уравнения составляющих теплового баланса (см. уравнение (1)) полного чугуновозного ковша имеют вид:

$$\Delta Q_{\text{чуг}} = G_{\text{ч}} \cdot \Delta t_{\text{ч}} \cdot C_{\text{ч}}, \quad (2)$$

где  $G_{\text{ч}}$  – вес чугуна в ковше, кг;

$\Delta t_{\text{ч}}$  – изменение температуры чугуна, К;

$C_{\text{ч}}$  – удельная теплоемкость чугуна, Дж/(кг·К).

$$q_{\text{гп}} = \varepsilon_{\text{зс}} \cdot C_{\text{а}} \left[ \left( T_{\text{пз}}/100^4 \right) - \left( T_{\text{ос}}/100^4 \right) \right] \cdot F_{\text{з}} + \alpha_{\text{г}} \cdot (T_{\text{пз}} - T_{\text{ос}}) \cdot F_{\text{з}}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{\text{зс}}$  – степень черноты системы зеркало ковша – окружающая среда;

$C_{\text{а}}$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$T_{\text{пз}}$  – температура поверхности зеркала ковша, К;

$T_{\text{ос}}$  – температура окружающей среды, К;

$F_{\text{з}}$  – площадь поверхности зеркала ковша, м<sup>2</sup>;

$\alpha_{\text{г}}$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности чугуна конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$$q_{\text{ф}} = \left[ (T_{\text{ч}} - T_{\text{ос}}) / \left( \frac{\delta_{\text{б}}}{\lambda_{\text{б}}} + \frac{\delta_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}}} + \frac{\delta_{\text{а}}}{\lambda_{\text{а}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{к}}} \right) \right] \cdot F_{\text{фс}}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{ч}}$  – температура чугуна, К;

$\delta_{\text{б}}$ ,  $\delta_{\text{ш}}$ ,  $\delta_{\text{а}}$  – толщина слоев футеровки соответственно из бетона, шамота и асбеста, м;

$\lambda_{\text{б}}$ ,  $\lambda_{\text{ш}}$ ,  $\lambda_{\text{а}}$  – коэффициент теплопроводности слоев футеровки соответственно из бетона, шамота и асбеста, Вт/(м·К);

$F_{\text{фс}}$  – площадь средней поверхности футеровки, м<sup>2</sup>;

$\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией от кожуха, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При транспортировке пустого ковша уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\Delta Q_{\text{ф}} = (q_{\text{гс}} + q_{\text{к}}) \cdot \tau_{\text{трс}}, \quad (5)$$

где  $\Delta Q_{\text{ф}}$  – потери теплоты футеровкой, Дж;

$q_{\text{гс}}$  – потери теплоты через горловину ковша, Вт;

$q_K$  – потери теплоты кожухом, Вт;

$\tau_{\text{трс}}$  – время транспортировки пустого ковша, с.

Уравнения составляющих теплового баланса (см. уравнение(5)) пустого чугуновозного ковша имеют вид:

$$\Delta Q_{\text{ф}} = G_{\text{ф}} \cdot \Delta t_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}}, \quad (6)$$

где  $G_{\text{ф}}$  – вес футеровки ковша, кг;

$\Delta t_{\text{ф}}$  – изменение температуры футеровки, К;

$C_{\text{ф}}$  – удельная теплоемкость материала футеровки, Дж/(кг · К).

$$q_{\text{Гс}} = \varepsilon_{\text{фс}} \cdot C_{\text{а}} \cdot \Phi \left[ \left( T_{\text{пф}}/100^4 \right) - \left( T_{\text{ос}}/100^4 \right) \right] \cdot F_{\text{Г}} + \alpha_{\text{ф}} \cdot (T_{\text{пф}} - T_{\text{ос}}) \cdot F_{\text{ф}}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{\text{фс}}$  – степень черноты системы футеровка – окружающая среда;

$\Phi$  – коэффициент диафрагмирования;

$T_{\text{пф}}$  – температура внутренней поверхности футеровки, К;

$F_{\text{Г}}$  – площадь горловины ковша, м<sup>2</sup>;

$F_{\text{ф}}$  – площадь внутренней поверхности футеровки, м<sup>2</sup>;

$\alpha_{\text{ф}}$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией от футеровки, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

$$q_K = \alpha_K \cdot (T_K - T_{\text{ос}}) \cdot F_K, \quad (8)$$

где  $T_K$  – температура поверхности кожуха, К;

$F_K$  – площадь поверхности кожуха, м<sup>2</sup>.

Влияние экранов на снижение тепловых потерь и теплообмен рассмотрено в работе [4].

### Результаты решения

Исследовано влияние на тепловые потери чугуновозного ковша времени при транспортировке полного и пустого ковша. При этом влияние продолжительности транспортировки полного ковша примерно в семь раз превышает влияние времени транспортировки ковша после слива чугуна.

В таблице 1 приведены результаты расчета влияния экрана (см. рис. 1) на тепловые потери ковша для вариантов: без экрана и с экраном различной конструкции. Наиболее эффективным, снижающим в три раза тепловые потери ковша, является экран с теплоизоляцией из базальтовых матов толщиной 30 мм.

Таблица 1

## Влияние экрана на тепловые потери ковша

Тепловые потери элементов ковша, ГДж	Варианты расчета			
	без экрана	металлический экран	экран с теплоиз. из бетона	экран с теплоиз. из базальтовых матов
Горловина	12,41	2,35	1,99	0,23
Изм. аккумулятивной футеровкой	4,58	4,10	3,94	2,46
Кожух	2,12	2,25	2,45	3,47
Общие	19,11	8,70	8,38	6,16

На основе выполненных исследований разработаны способы транспортировки чугуновозных ковшей и устройства для их реализации, позволяющие уменьшить величину тепловых потерь.

#### Список литературы

1. Лисиенко В. Г. Хрестоматия энергосбережения / Лисиенко В. Г., Щелочков Я. М., Ладыгичев М. Г. Справочное издание : В 2-х книгах; под ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2005. – Кн.1. – 688 с., Кн.2.– 678 с.
2. Рихтмаер Р. Д., Разностные методы решения краевых задач / Р. Д. Рихтмаер. – М. : Мир, 1978. – 418с.
3. Румянцев В. Д. Теория тепломассообмена / В. Д. Румянцев // Учебное пособие. – Днепропетровск : Пороги, 2006. – 532 с.
4. Колодяжный В. С. Теплопередача при использовании экранов / В. С. Колодяжный // Теория и практика тепловых процессов в металлургии : Сб. докладов международной научно-практической конференции, 18-21 сент. 2012 г. : УрФУ. – Екатеринбург, 2012. – С. 272–275.

# ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ МЕТОДАМИ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

*Кравцов С.В.<sup>1</sup>, Мешкова А.Г.<sup>1</sup>, Сулименко С.Е.<sup>1</sup>, Саввин А.В.<sup>1</sup>*

*1 – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

Приводятся результаты изучения магнитных свойств техногенных железосодержащих отходов. Показано, что с уменьшением крупности материала увеличивается содержание магнетита и гематита, в крупных фракциях содержится большое количество кварца. Установлена принципиальная возможность получения из отходов кондиционного железного концентрата с извлечением на уровне 98 %, а также кварцевого продукта.

Ключевые слова: техногенные отходы железных руд, магнетит, гематит, магнитное обогащение.

## **Введение**

Отходы горно-металлургического производства и теплоэнергетики, представленные вскрышными, вмещающими породами, бедными, забалансовыми, некониционными рудами, хвостами обогащения, техногенными россыпями, золами и шлаками тепловых электростанций, шлаками и шламами металлургического производства, обладают значительным ресурсным потенциалом и все чаще рассматриваются как перспективное, заскладированное минеральное сырье. Являясь потенциальными ресурсами, способными расширить минерально-сырьевую базу страны по черным, цветным металлам, техногенные образования весьма агрессивно воздействуют на природную среду, поэтому интерес к их переработке обусловлен не только коммерческими задачами, но и возросшими экологическими требованиями.

Следует отметить, что горно-металлургический комплекс, вследствие громадных твердых и жидких массопотоков, труднее других областей хозяйственной деятельности поддается технологическому совершенствованию. Эффективность комплексного использования минерального сырья, включая ликвидацию последствий его промышленной переработки, базирующейся на современных технологиях добычи и переработки, может способствовать решению этой проблемы.

Техногенное минеральное сырье – особый вид сырья, поэтому переработка его по существующим традиционным технологиям во многих случаях будет характеризоваться низкими показателями, невысокой рентабельностью и повторным образованием отходов. Для вовлечения в промышленную переработку сложного, труднообогащаемого сырья необходимо установить закономерности влияния его строения, фазового состава, в том числе вторичной минерализации,

физических и физико-химических свойств, обусловленных условиями их формирования и преобразования, на эффективность разделительных процессов для адаптации традиционных методов обогащения к техногенному сырью [1].

### **Постановка задачи**

Магнитное обогащение, основанное на различной магнитной проницаемости железосодержащих фаз, используют для отделения парамагнитных (слабомагнитных) и ферромагнитных (сильномагнитных) компонентов смесей твердых материалов от их немагнитных составляющих под действием магнитного поля. Сущность магнитной сепарации заключается в изменении магнитным полем траектории движения частиц, обладающих разной магнитной восприимчивостью.

На основании полученных результатов можно охарактеризовать магнитные свойства исследуемых отходов и их эффективность. Сильномагнитными минералами из числа найденных в отходах являются ферромагнетик  $\alpha$ -Fe, ферримагнетики магнетит и маггемит ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Вюстит, сидерит и пирит являются парамагнетиками, которые намагничиваются при внесении в магнитное поле, а обнаруженный в железшламах и золе от сжигания углей тонкодисперсный оксид железа является суперпарамагнитным. Гематит является слабым ферромагнетиком, чаще его относят к антиферромагнетикам, в сильном магнитном поле мелкие частицы гематита могут притягиваться к сильномагнитным частицам магнетита, маггемита или металлического железа.

Техногенные отходы золы от сжигания углей (проба 2) могут быть классифицированы как техногенное магнетитовое сырье, в котором преобладают сильномагнитные фазы, а именно, магнетит 65,7 %, что обуславливает целесообразность его обогащения магнитным методом, при этом наиболее эффективно обогащать мелкую фракцию крупностью менее 1 мм, т.е. зольную фракцию.

Техногенные отходы железшламов (проба 3) представляет собой богатое железорудное сырье с суммарным содержанием железосодержащих минералов 72 – 86 %, в котором суммарное содержание сильномагнитных форм железа (магнетит, металлическое железо) составляет 44,1 %, а содержание слабомагнитных компонентов, которые могут намагничиваться в магнитном поле и тянутся за сильномагнитными, составляет 55,9 %. Эффективность магнитного обогащения железшламов может быть очень высокой, однако следует отметить, что это техногенное сырье по содержанию железа близко к железорудным концентратам. Поэтому это техногенное сырье может быть использовано в металлургии непосредственно без предварительного обогащения. Ограничением при использовании в агломерационном производ-

стве может являться лишь содержание цинка.

Техногенные отходы обогащения углей (проба 1) содержат 19 – 28 % железосодержащих фаз с преобладанием слабомагнитного сидерита  $\text{FeCO}_3$  и могут быть отнесены к техногенному сидеритовому сырью. При этом, рассев пробы перед обогащением нецелесообразен, так как сидерит распределяется по фракциям различной крупности примерно равномерно.

Для усиления магнитных свойств железа в отходах углеобогащения может быть применен магнетирующий обжиг при температуре от 600 до 850 °С. Магнетирующий обжиг используется в практике обогащения железных руд для перевода немагнитных соединений железа (гематит, сидерит) в магнитные (магнетит, маггеммит). После магнетирующего обжига руда подвергается магнитной сепарации. Магнетизация железных руд обжигом производится на Криворожском ГОКе, Кремиковском металлургическом комбинате в Болгарии [2].

### **Основная часть исследований**

Для исследований были отобраны 3 пробы:

- проба 1 – отходов углеобогащения КХП ЧАО «ЕВРАЗ – Днепропетровский металлургический завод»;
- проба 2 – зола и шлак ДТЭК Приднепровская ТЭС;
- проба 3 – железосодержащие шламы газоочисток доменного, конвертерных цехов, ЧАО «ЕВРАЗ – Днепропетровский металлургический завод».

Исследовалась возможность и эффективность обогащения проб методом сухой магнитной сепарации выполнены на лабораторном электромагнитном анализаторе.

Выход концентрата определяли по формуле:

$$V_k = \frac{M_k}{M_n} \times 100, \% \quad (1)$$

где  $M_k$  – масса концентрата, г;  $M_n$  – масса исходной пробы, г.

Выход хвостов определяли по формуле:

$$V_x = 100 - V_k, \% \quad (2)$$

Исследовали пробы крупностью 0 – 1 и 1 – 3 мм при различных значениях силы тока.

Установлено, что методом сухого магнитного обогащения разделяются все исследованные пробы. При этом наименьшая степень извлечения концентрата (магнитная фракция) наблюдалась для пробы № 1 (отходы углеобогащения) – от 28 до 46 %, а наибольшая – для пробы № 3 (железошламы) – от 76 до 95 %, для пробы № 2 (отходы от сжигания угля) выход концентрата составил от 56 до 90 %.

В таблице 1 представлены результаты химического анализа продуктов обогащения – концентраты (магнитная фракция) и хвосты (немагнитная фракция).

Таблица 1

Содержание компонентов в продуктах сухого магнитного обогащения, % сух. массы

Наименование пробы	Крупность частиц, мм	Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>мет</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ППП
1 исходная	0-1	12,9	0,19	13,8	3,84	29,1
1 концентрат		25,6	2,02	27,01	5,12	16,01
1 хвосты		2,69	0,3	0,75	3,9	25,89
1 исходная	1-3	13,9	2,01	14,52	4,11	19,05
1 концентрат		32,5	7,12	28,74	6,02	15,0
1 хвосты		7,82	1,2	3,32	3,0	18,13
2 исходная	0-1	20,32	0,42	5,03	24,0	1,15
2 концентрат		22,12	0,87	6,1	22,58	1,6
2 хвосты		5,32	0,1	2,14	5,02	3,0
2 исходная	1-3	17,45	0,3	4,02	21,0	0,24
2 концентрат		16,98	0,8	6,2	18,47	1,52
2 хвосты		6,54	0,3	3,08	5,42	2,01
3 исходная	0-1	59,01	10,2	30,1	36,31	2,67
3 концентрат		62,01	13,54	31,22	34,52	1,89
3 хвосты		45,68	5,02	3,35	59,16	7,23
3 исходная	1-3	59,0	8,95	28,43	37,0	4,75
3 концентрат		58,13	12,1	29,2	34,16	3,95
3 хвосты		60,31	11,2	27,01	42,01	2,16

Эффективность сепарации оценивали по степени извлечения двух компонентов – железа общего Fe<sub>общ</sub> и железа металлического Fe<sub>мет</sub> представлено в таблице 2.

Таблица 2

Показатели эффективности процесса сухого магнитного обогащения

Наименование пробы	Крупность частиц, мм	Степень извлечения Fe, %	Степень обогащения
№1	0-1	89,8	1,84
	1-3	94,2	1,9
№2	0-1	98,1	1,0
	1-3	91,5	1,1
№3	0-1	98,6	1,03
	1-3	93,4	1,01

## **Выводы**

Установлено, что методом сухого магнитного обогащения достигается высокая степень извлечения железа для всех исследованных проб – более 90%. Наибольшая степень извлечения железа получена при обогащении проб № 3 и № 2, содержащих сильномагнитные минералы – магнетит и металлическое железо. При уменьшении крупности частиц этих проб степень извлечения железа возрастает. При обогащении пробы № 1 выявлена обратная зависимость, при этом степень извлечения железа из фракции 1 – 3 мм составила более 94 % и превысила степень извлечения из аналогичной фракции для проб № 2 и № 3.

Данные о степени обогащения свидетельствуют о целесообразности обогащения проб № 1, в результате обогащения которых концентрация железа возрастает практически в 2 раза, в то время как для проб № 2, и, особенно, № 3 – незначительно. В то же время, для этих проб получен наибольший выход концентрата, что обусловлено намагничиванием и захватом с магнитными частицами немагнитных, а также наличием сростков магнитных и немагнитных компонентов.

## **Список литературы**

1. Шадрунова И. В. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков / И. В. Шадрунова, Е. Г. Ожогина, Е. В. Колодежная, О. Е. Горлова // ФТПРПИ. 2013. – № 5. – С. 180–190.
2. Волынкина Е. П. Исследование обогащения отходов, накопленных в шламохранилище ОАО «ЕВРАЗ СМК», методом магнитной сепарации / Е.П. Волынкина, В.Н. Зоря, А.Е. Аникин, Е.П. Волынкина, А.Н. Федякина // Управление отходами: сб. докладов четвертой международной научно-практической конференции, 23-25 октября 2012 г. – Новокузнецк : СибГИУ. – 2012. – С. 190–198.

# ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКЕ

*Мных А.С.*

*Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина*

## **Аннотация**

В работе проведены исследования по повышению энергоэффективности четырехвалковой дробилки с целью увеличения выхода кондиционной фракции дорогостоящего топлива. Изучен механизм измельчения топлива и предложена методика расчета производительности дробилки.

Ключевые слова: агломерационная шихта, сыпучий материал, фракционный состав, дробление топлива.

## **Введение**

Основным источником энергии процессов окускования материала на машинах конвейерного типа, является теплота сгорания твердого топлива, в качестве которого выступает коксовая мелочь или антрацитовый штыб. Подготовка топлива к использованию в агломерационном процессе заключается в его измельчении до требуемого фракционного состава в дробильно-измельчительных установках.

В мировой практике для дробления топлива применяются молотковые дробилки и стержневые мельницы, которые отличаются нестабильностью показателей измельчения топлива. В отечественном процессе в основном используются четырехвалковые дробильно-измельчительные агрегаты, с более низким, на 18 – 20 %, содержанием вредных мелких классов, чем у вышеуказанных дробильных машин. Несмотря на это выход вредных пылеватых классов, крупностью 0 – 0,5 мм остается достаточно высоким, что снижает качество тепловой обработки сыпучего материала при спекании и увеличивает общие потери дорогостоящего твердого топлива с уходящими газами.

## **Постановка задачи**

Анализ исследований влияния крупности твердого топлива на процесс агломерации, позволил сделать вывод о необходимости стабилизации крупности топлива в диапазоне 0,5 – 3,0 мм, при снижении содержания крупных и пылеватых фракций. Применяемые на отечественных аглофабриках четырехвалковые дробилки, являются более эффективными, чем зарубежные аналоги, но характеризуются наличием вредного переизмельчения топлива.

Таким образом, для оптимизации подготовки твердого топлива и интенсификации выхода кондиционной фракции необходимо:

– исследовать физику процесса дробления в четырехвалковой дробилке;

- проанализировать эффективность существующей схемы дробления топлива;
- разработать методику расчета производительности дробилки;
- исследовать влияние крупности дробленого топлива на время его выгорания.

### Изложение результатов исследования

Процесс дробления твердого топлива в четырехвалковой дробилке может быть представлен схемой, приведенной на рис. 1.

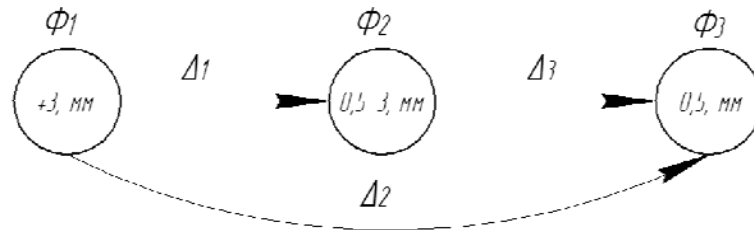


Рис. 1. Механизм дробления материала в четырехвалковой дробилке

Механизм процесса измельчения можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \Phi_1' - \Phi_1'' = (\Delta_2 + \Delta_3)t_0; \\ \Phi_2'' - \Phi_2' = (\Delta_1 - \Delta_3)t_0; \\ \Phi_3'' - \Phi_3' = (\Delta_1 - \Delta_2)t_0. \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Phi_i'$  – содержание  $i$ -й фракции в исходном материале, %;  $\Phi_i''$  – содержание  $i$ -й фракции в дробленном материале, %;  $t_0$  – время дробления, с;  $\Delta_i$  – интенсивность измельчения  $i$ -й фракции, %/с.

При исследовании механизма процессов в дробильном агрегате принято, что дробление осуществляется в результате сдавливающих  $\xi_1, \xi_2$  (+3,0; 0,5 – 3,0 мм) и истирающих  $\xi_3$  (0 – 0,5 мм) воздействий на сыпучую массу. Исходя из того, что  $\xi_3$  является основным источником образования некондиционных пылеватых фракций, с целью обеспечения условия (2), долю этих воздействий в процессе дробления необходимо свести к минимуму. Последнее, возможно осуществить путем изменения схемы подготовки топлива и его дробления в валковом агрегате.

$$\begin{cases} \Phi_1(+3,0\text{мм}) \longrightarrow \min \\ \Phi_2(0,5-3,0\text{мм}) \longrightarrow \max \\ \Phi_3(0-0,5\text{мм}) \longrightarrow \min \end{cases} \quad (2)$$

Для условий аглофабрики МК «Запорожсталь» в исходном коксике содержание кондиционной фракции (0,5 – 3,0 мм) достигает 40 %, что объясняется использованием отсева коксика доменного производства. Существующая схема дробления рис. 2, обуславливает

наличие вредного переизмельчения топлива и увеличения доли истирающих нагрузок при дроблении.

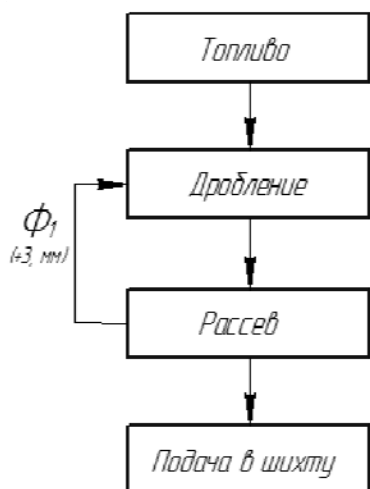


Рис. 2. Существующая схема дробления

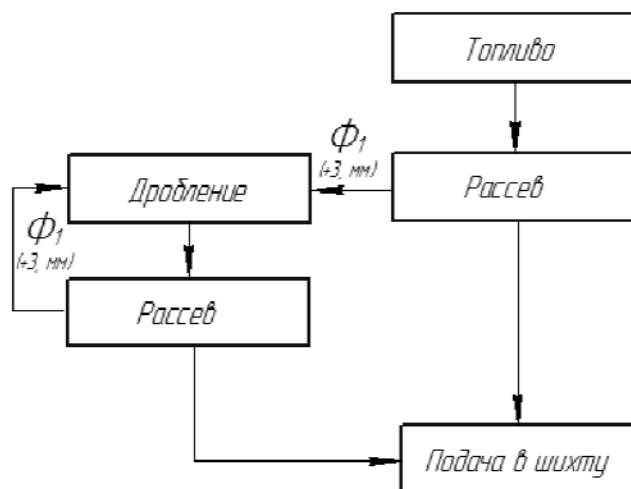


Рис. 3. Предлагаемая схема измельчения

Снижение доли  $\xi_3$  и ее влияния на дробление топлива можно достичь при использовании предложенной авторами схемы измельчения, рис. 3. Предварительный рассев топлива перед дроблением исключит переизмельчение кондиционной и мелкой фракции, а так же увеличит долю сдавливающих нагрузок  $\xi_1, \xi_2$  при измельчении.

Известно, что фракционный состав дробленного топлива в значительной степени зависит от производительности дробильно-измельчительного агрегата. С целью определения оптимальной производительности четырехвалковой дробилки, для обеспечения условия (2), проведены серии опытов по дроблению коксика и антрацитового штыба. Результаты экспериментов позволили установить значение оптимальной производительности дробилки при дроблении коксика, которая составляет  $Q = 14$  т/ч и обеспечивает максимальный выход кондиционной фракции. Интенсивность выхода фракции (0,5 – 3,0 мм), при этой производительности так же максимальна.

В случае дробления антрацитового штыба, оптимальная производительность четырехвалковой дробилки составит  $Q = 12$  т/ч, рис. 5. Интенсивность измельчения кондиционной фракции при этой производительности достигает максимальных значений.

Анализ полученных результатов показывает, что при стабильном режиме дробления, спектр крупности дробленного топлива зависит от его природных свойств. Так, по результатам первой серии опытов, при близком гранулометрическом составе исходных материалов минимальное содержание пылеватых фракций (0 – 0,5 мм) в дробленном коксике в два раза больше чем в штыбе.

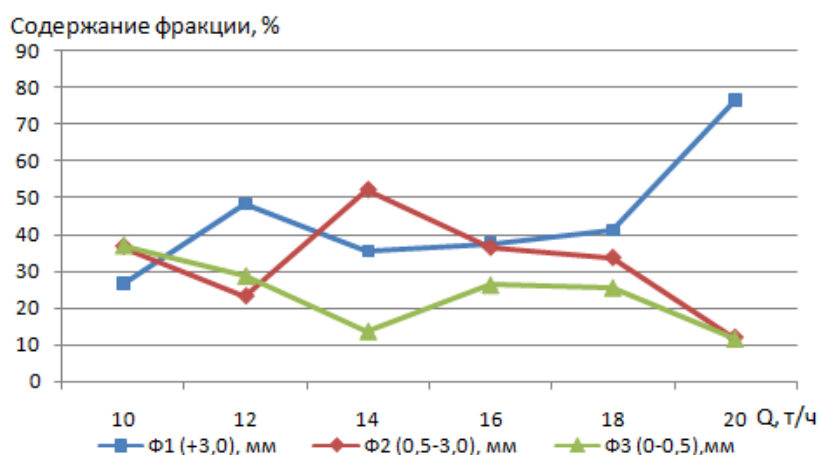


Рис. 4. Зависимость фракционного состава коксика от производительности

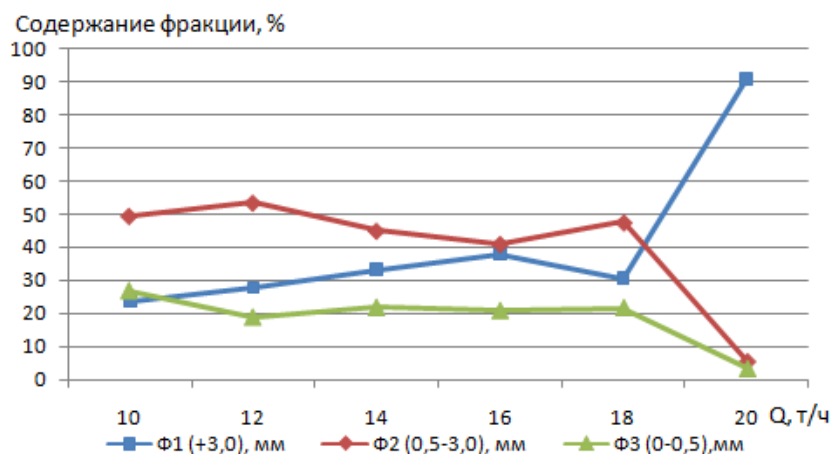


Рис. 5. Зависимость фракционного состава штыба от производительности

Анализ результатов расчета показывает, что при снижении производительности агрегата уплотняется структура материала, что вызывает пропорциональное снижение интенсивности его дробления под действием сдвливающих нагрузок. Это явление можно объяснить снижением подвижности отдельных частиц и их более плотном примыкании друг к другу, что усиливает влияние истирающих нагрузок, и, как следствие, увеличивает выход пылеватых фракций – 0,5 мм.

Исходя из того, что температура зоны горения и ее высота зависят от крупности топлива, а последнее, в свою очередь, характеризует длительность его горения, в работе проведены исследования по установлению времени выгорания кондиционной фракции твердого топлива.

Экспериментальные данные Карабасова Ю.С. [10] по кинетике выгорания частиц топлива различного размера, позволили установить закон изменения скорости выгорания частиц. Влияние размера частицы на время ее выгорания представлено на рис. 6. Из полученных результатов видно, что среднее выгорание частицы коксовой мелочи

кондиционного размера составляет 48 – 52 с, а антрацитового штыба 72 – 76 с.

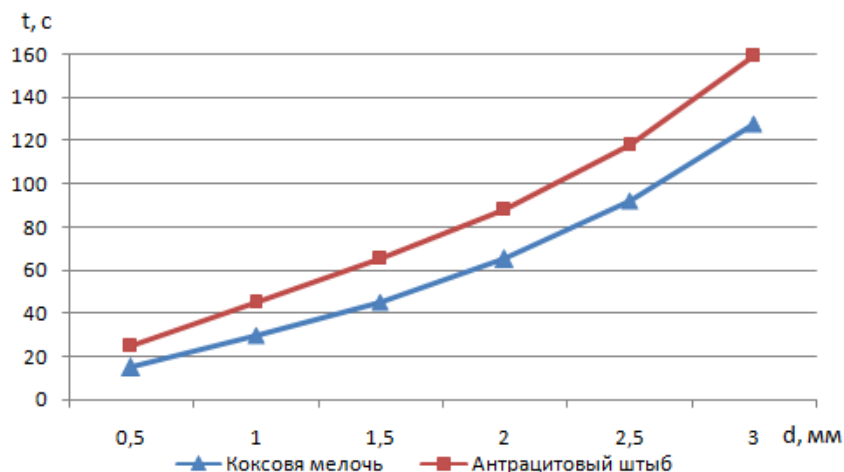


Рис. 6. Зависимость времени выгорания частицы топлива от ее размера

Последнее свидетельствует о более низкой реакционной способности и интенсивности выделения теплоты частицей штыба в сравнении с коксиком, что предопределяет температурный уровень процесса спекания и время пребывания единичных объемов шихты в зоне высоких температур.

### Выводы

В работе установлено, что природные свойства топлива существенно влияют на выход кондиционной фракции при стабильном режиме дробления. Максимальный выход кондиционной фракции при дроблении коксика обеспечивается при производительности 14 т/ч, а штыба 12 т/ч.

Исследования механизма дробления в валковом агрегате, позволили сделать вывод о необходимости изменения схемы дробления топлива с его предварительным рассевом, с целью снижения влияния истирающих нагрузок на измельчаемый материал.

Установлено влияние крупности дробленного топлива на время его выгорания, что обуславливает температурный режим процесса спекания шихты.

### Список литературы

1. Мных А. С. К вопросу оптимизации подготовки твердого топлива к тепловой обработке агломерационной шихты [Текст] / А. С. Мных, И. Г. Яковлева, М. Ю. Пазюк // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 10 (141). – С. 56–63.

## ПРО ОСОБЛИВОСТІ СУШІННЯ ПОРИСТИХ ТІЛ

*Назаренко О.М., Мельник О.Г., Назаренко І.А.*

*Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя, Україна*

### Анотація

Сушка однорідних тіл, викликана потребами виробництва та потребує енергетичних витрат. Якщо спосіб сушіння енерговитратний, то необхідно дослідити можливі витоки та розробити нову технологію знешкодження вологи. Аналіз джерел втрат енергії та впровадження природньої сушки – один з шляхів енергозбереження на підприємстві.

Ключові слова: вологе тіло, енергозбереження, прогрів, витрата енергоносія, потреби, виробництво, насичення повітря, температура, інтенсивність, конвективна сушка.

### Актуальність проблеми

Сушка вологих матеріалів являє собою складний технологічний процес, що характеризується сукупністю процесів тепло- та масообміну, що супроводжується структурно- механічними, а в ряді випадків і хімічними змінами речовини, що висушується. Цей процес є одним з основних в різних галузях народного господарства, промисловості та важливий з економічної точки зору.

Великий внесок в розвиток теорії, техніки та технології сушки внесли провідні вчені такі як О.В. Ликов, М.В. Ликов, А.В. Лебедев, П.Д. Лебедев, Ю.А. Михайлов, П.С. Коссович, П.О. Ребиндер, М.В. Кірпічов, і багато інших. Їх наукові труди описують форми зв'язку вологи з речовиною, явища переносу теплоти та маси в тілах різних типів, кінетику та динаміку процесу сушки, методи розрахунку сушильного устаткування та є основними при розробці нових способів сушіння та конструкцій сушильної техніки.

При взаємодії навколишнього середовища з вологим матеріалом відбуваються процеси тепло- та масообміну. На випаровування вологи витрачається суворо визначена кількість теплоти. Отже необхідно забезпечувати постійне підведення теплоти до сировини, в результаті якого буде відбуватися випаровування вологи з поверхні та з внутрішніх шарів.

З метою підвищення ефективності сушіння необхідно одночасно з нагрівом матеріалу відводити вологу за межі об'єкту, що сушиться. Процес сушіння можливий лише тоді, коли тиск водяних парів всередині сировини або на її поверхні вище, ніж в навколишньому середовищі. Такий процес проходить при підвищеній температурі матеріалу. Якщо температура матеріалу дорівнює температурі навколишнього середовища, то процес сушіння припиняється.

Процес сушіння матеріалів умовно можна розділити на три періоди (див. рис. 1):

1. Період прогріву матеріалу. В цьому періоді температура в середині матеріалу протягом часу збільшується більш повільно ніж температура поверхні. Через визначений проміжок часу температури поверхні та центру матеріалу стають рівними температурі, яка відповідає адиабатичному насиченню повітря (температура мокрого термометру). Інтенсивність випаровування вологи з поверхні матеріалів в цей період уповільнена. Тривалість прогріву матеріалу не значна, тому при розгляданні тепломасообмінних процесів в процесі сушіння цим періодом нехтують.

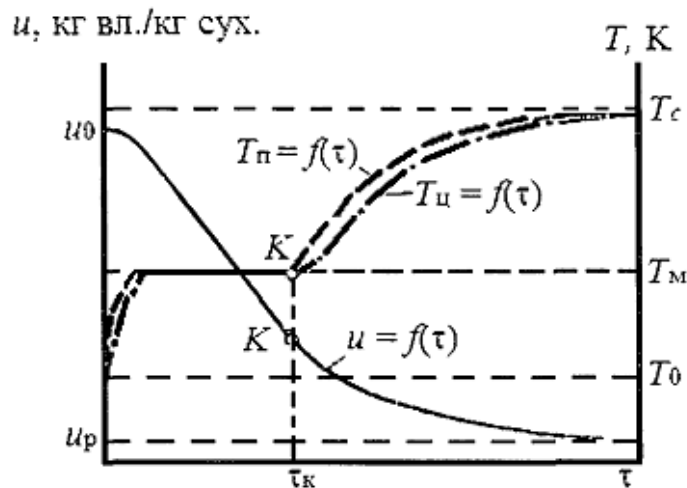


Рис. 1. Зміна вологовмісту та температури на поверхні та в центрі вологого матеріалу

2. Період постійної температури матеріалу (постійної швидкості сушіння). Вологовміст матеріалу в цьому періоді зменшується протягом часу за лінійним законом, що відповідає постійній швидкості сушіння (зміна вологовмісту в одиницю часу). Температура поверхні матеріалу залишається не змінною та дорівнює температурі мокрого термометру, тому вся теплота, що підводиться до матеріалу, що сушиться, витрачається на випаровування вологи з поверхні матеріалу. Цей період характеризується видаленням вільної вологи з матеріалу і відповідає максимальному вологовидаленню.

3. Період температури, що підвищується. Цей період характеризується видаленням залишеної пов'язаної вологи з матеріалу. Потік вологи з центральної частини об'єкту відстає від швидкості її випаровування, у зв'язку з чим, на поверхні матеріалу створюються ділянки, які недостатньо насичені вологою. Це приводить до швидкого розігріву поверхні та центру матеріалу, причому температура центру матеріалу трохи відстає від температури його поверхні. Вологовміст та швидкість сушки в цьому періоді знижуються протягом часу. Через визначений проміжок часу вологовміст досягає рівноважного значення, видалення вологи не відбувається, а температура матеріалу стає рівною температурі навколишнього середовища. Процес сушіння закінчується.

До основних факторів, які впливають на процес сушіння та на якість матеріалу, що сушиться відносяться: температура сушильного агенту; швидкість повітряного потоку; вологість повітря; атмосферний тиск; товщина шару матеріалу.

У зв'язку з підвищеними вимогами до якості сировини виникає необхідність в розробці нових способів сушки, що забезпечують високу якість матеріалу та значну інтенсифікацію процесу. За параметр, що характеризує інтенсивність процесу, приймають інтенсивність випаровування вологи с 1 м<sup>3</sup> робочої камери установки, яка залежить від концентрації матеріалу в об'ємі робочої камери, від максимально допустимих температури та вологості матеріалу та навколишнього середовища, від активної поверхні тепло- та масообміну в одиниці об'єму установки та аеродинамічних умов.

Інтенсивність конвективної сушки характеризується рівняннями балансу теплоти та маси:

$$\alpha_n \cdot (t_c - T_n) = r \cdot j_n + \frac{c \cdot m_0}{F_n} \frac{dT}{d\tau}, \quad (1)$$

$$j_n = \beta(\nabla u + \delta \nabla T)_n, \quad (2)$$

де  $\alpha_n$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні матеріалу, Вт/(м·К);  $t_c$  – температура навколишнього середовища, К;  $T_n$  – температура поверхні матеріалу, К;  $r$  – теплота пароутворення води, Дж/кг;  $j_n$  – інтенсивність випаровування з поверхні матеріалу, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $c$  – приведена питома теплоємність вологого матеріалу, кг вол./кг сух.;  $m_0$  – маса сухого матеріалу, кг;  $F_n$  – площа поверхні матеріалу, м<sup>2</sup>;  $T$  – середня по об'єму температура матеріалу, К;  $\tau$  – час процесу сушки, с;  $\beta$  – коефіцієнт масоотдачі з поверхні матеріалу, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\delta$  – термоградієнтний коефіцієнт, К<sup>-1</sup>;  $\nabla u$ ,  $\nabla T$  – градієнт вологовмісту та температури.

Проаналізувавши ці рівняння, можна зробити висновок про те, що для інтенсифікації процесу конвективної сушки та підвищення економічної ефективності роботи установки може бути обрано один з наступних шляхів:

- використання більш високих початкових температур повітря;
- використання більших локальних швидкостей повітряного потоку, вібрації часток матеріалу;
- збільшення площі поверхні матеріалу;
- застосування комбінованих способів сушіння та суміщення різноманітних процесів в одному апараті;
- використання вторинних енергетичних та теплових ресурсів виробництва.

З підвищенням температури середі стрімко скорочується тривалість сушіння, в результаті матеріал зберігає свої якісні показники. При цьому зменшуються питомі витрати електроенергії.

Збільшення інтенсивності сушки можна домогтися за рахунок

збільшення коефіцієнту тепловоїдачі, так як в даному випадку підвищується теплообмін тіла з навколишнім середовищем. Однак великі швидкості руху газів потребують більших витрат електроенергії. Для збільшення інтенсивності сушки необхідно збільшити коефіцієнт дифузії вологи та градієнт вологовмісту. При цьому напрямлення градієнтів вологовмісту и температури протилежні. Також інтенсифікація процесу сушки можна досягнути зміною напрямлення потоку газу.

Практика сушіння підтверджує, що висока температура сушильного агенту приводить до різкого підвищенню температури поверхні часток. Отже безперестанно інтенсифікувати процес сушки шляхом зменшення розмірів часток, не змінюючи якості сушеного матеріалу не можливо. З іншого боку, для збільшення продуктивності устаткування бажано збільшити товщину шару матеріалу, інтенсивність випаровування різко знижується із-зі більшого насичення повітря, що проходить крізь шар матеріалу.

Як правило, режим сушки не повинен бути сталим протягом усього процесу сушки, а повинен змінюватися по ходу процесу у відповідності з закономірностями переносу тепла та вологи в даному матеріалі. Здійснити змінні режими можна при використанні комбінованих методів підводу теплоти.

### **Висновки**

1. Підвищення ефективності роботи різних видів сушильних установок пов'язано з інтенсифікацією теплових та масообмінних характеристик за допомогою різних факторів;

2. Підвищення ефективності роботи агрегатів можливо шляхом застосування теплових насосів у якості генераторів теплоти, що має економічний та екологічний ефект;

3. Доцільно розробка комбінованих пристроїв, використовуючих альтернативні джерела вторинної та природної енергії.

### **Список літератури**

1. Хейфец Л. И., Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. – М. : Химия, 1982. – 320 с.

2. Чейлытко А. А. Особенности процесса порообразования в вспучивающихся материалах на основе глинозема / А. А. Чейлытко, А. М. Павленко, М. А. Носов // Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Междунар. науч.–практ. конф. (Тамбов, 30 июня 2014) в 9 т. Т. 4. – Тамбов : ООО «Консалтинговая компания Юком». – 2014. – С. 114–116.

3. Dufresne E. R., Corwin E. J., Greenblatt N. A., Ashmore J., Wang D. Y., Dinsmore A. D., Cheng J. X., Xie X. S., Hutchinson J. W., Weitz D. A.: Flow and fracture in drying nanoparticle suspensions. Phys. Rev. Lett. 91(22), 224501-1–224501-4 2003. – P. 168.

4. Newman A. B. The drying of porous solids: diffusion and surface emission equations. Am. Inst. Chem. Eng. Trans. 27. – 1931. – P. 203–220.

# ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЙ ПЕРЕПЛАВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ВАЛКОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ И РОЛИКОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

*Педченко Е.А., Медовар Л.Б.*

*Институт электросварки им. Е.О. Патона, Киев*

## **Введение**

В классическом процессе ЭШП используют электроды постоянного сечения, и с как можно большим отношением диаметра электрода к диаметру кристаллизатора, т.н. коэффициентом заполнения. Это вызвано тем, что чем больше коэффициент заполнения, тем лучше качество слитка. Иногда возникают задачи, когда при ЭШП диаметр электрода имеет переменное сечение, и это вызывает сложности для получения слитка с однородной структурой, а тем самым и качеством. Речь идет, в частности, о переплаве отработавших прокатных валков и роликов МНЛЗ.

## **Состояние проблемы**

Давно известен положительный опыт применения отработавших валков и роликов МНЛЗ в качестве расходного электродов для ЭШП. Технология ЭШП позволяет повторно использовать отработавшие валки и ролики в качестве дешевого исходного материала для электродов. Поскольку валок имеет переменное сечение по своей длине то коэффициент заполнения варьируется в диапазоне 0,25 – 0,7. Такое большое изменение коэффициента заполнения влечёт за собой изменение формы и объема жидкометаллической ванны, скорости плавления, что приводит к разной направленности роста кристаллов, а значит и изменению свойств. ЭШП с низким коэффициентом заполнения вызывает образование конуса на конце электрода, с высоким – плоский или даже вогнутый профиль, так как Джоулево тепло выделяется в локальной области у поверхности раздела шлак-электрод [1]. При большом коэффициенте заполнения температура по периметру электрода больше, чем в его центре, и наоборот. Так как основным источником тепла в жидкой металлической ванне есть капли металла, которые отрываются от электрода, то использование электрода с меньшим диаметром вызывает концентрацию тепла в центре слитка и увеличивает глубину металлической ванны. Чем больше коэффициент заполнения, тем профиль ванны будет иметь более плоскую форму, что положительно влияет на образование в слитке направленной дендритной структуры и уменьшение сегрегации. Уменьшение коэффициента заполнения также влечет за собой увеличенный расход электроэнергии и уменьшение скорости плавления, что в свою очередь негативно влияет на поверхность выплавляемого слитка [2].

Для того что бы сохранить коэффициент заполнения постоянным и достаточно большим, шейки валков и роликов отрезали, а бочки

сваривали между собой. Таким образом полученный расходный электрод имел одинаковый диаметр, а слиток имел одинаковые свойства по своей длине. Однако, стоимость подготовки такого электрода слишком высока и уменьшает эффективность данного способа утилизации валков и роликов. А переплав роликов и валков без обрезки шеек весьма затруднителен.

Поскольку применение ЭШП в производстве валков холодной прокатки, да и роликов МНЛЗ, позволяет достичь наивысшего качества продукции [3, 4], то и их утилизация методом ЭШП весьма привлекательна для производителей. На данный момент перед металлургами стал вопрос о более рациональной утилизации валков холодной прокатки и роликов машин непрерывного литья заготовок с помощью ЭШП.

Для того что бы уменьшить изменение профиля металлической ванны, валки и ролики – электроды переменного сечения – мы рекомендовали переплавлять в коротком уширенном токоподводящем кристаллизаторе со сменой электродов в ходе переплава. Короткий уширенный токоподводящий кристаллизатор позволяет подводить ток к периферии формирующегося слитка. При переплаве секции электрода с низким коэффициентом заполнения основная часть жидкого металла получается в центре слитка, тем самым увеличивая глубину металлической ванны. При дополнительном тепловложении в область корки слитка форма металлической ванны начинает выравниваться, приобретая более плоский профиль. Таким образом при правильном распределении тепловложения между электродом и токоподводящей секцией можно воздействовать на форму металлической ванны и получать требуемый ее профиль, это дает возможность переплавлять электроды сменного сечения [6 – 10].

### **Экспериментальная проверка**

Для проверки эффективности применения токоподводящего кристаллизатора для утилизации роликов и валков были проведены натурные эксперименты по ЭШП электрода переменного сечения, моделирующего валок/ролик. Исходный металл – прокат, диаметром 150, сталь 40Х – был проточен ступеньками на диаметры 110 мм и 800 мм, а переплав вели в токоподводящий кристаллизатор, диаметром 180 мм. При таком соотношении диаметров коэффициент заполнения составлял соответственно 0,69, 0,37 и 0,2. Переплав начинали с электродом 150 мм при подводе примерно 90 % мощности переплава через расходный электрод и 10 % через токоподводящий кристаллизатор. Затем при переходе от 150 мм к 110 мм электроду и соответственно уменьшению коэффициента заполнения пропорционально увеличивали долю мощности, подводимой через кристаллизатор до примерно 40 – 45 %, добиваясь сохранения производительности переплава на уровне, достигнутом при переплаве 150 мм электрода. Аналогично поступали и при переходе

на 80 мм электрод, сохраняя скорость наплавления слитка с перераспределением мощности переплава примерно до 70 % на кристаллизаторе и 30 % на электрод. Сравнение поверхности слитка, выплавленного из электрода разного диаметра существенных различий не выявило. Макроисследования продольных темплетов показали, что профиль жидкометаллической ванны практически не изменился. Дальнейшие исследования будут сфокусированы на исследовании микроструктуры и свойств металла ЭШП, полученных из электродов разного диаметра.

### Выводы

1. Для получения качественных слитков при электрошлаковом переплаве электродов переменного сечения возможно с использованием короткого уширенного токоподводящего кристаллизатора.

2. Утилизация валков холодной прокатки и роликов МНЛЗ возможна без обрезки шеек с помощью технологии электрошлакового переплава с заменой электродов в ходе переплава в коротком уширенном токоподводящем кристаллизаторе.

### Список литературы

1. М. Каваками. Исследование распределения температуры и электрического потенциала в шлаковой и металлической ваннах в процессе ЭШП. - Специальная электрометаллургия, 1975, вып. 3, с. 136-151.
2. К. Ямагучи, М. Фунацу, Т. Ишихара Влияние параметров переплава на химический состав, физические и механические свойства металла ЭШП. - Специальная электрометаллургия, 1975, вып. 3, с. 111-118.
3. Г. Егер, Л. Кубиш Улучшение качества валков холодной прокатки путем электрошлакового переплава. - Специальная электрометаллургия, 1979, вып. 5, с. 226-236.
4. Т. Мошизуки, Е. Ога. О качестве кованых закаленных валков, изготовленных методом электрошлакового переплава. – Специальная электрометаллургия, 1975, вып. 3, с. 253-265.
5. Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. Ксендзык Г.В. Специальная электрометаллургия, 1975, вып. 27, с. 32–40.
6. Цыкуленко А. К., Ланцман И. А., Медовар Л. Б. и др. Двухконтурная схема электрошлакового переплава расходуемого электрода. – Проблемы специальной электрометаллургии, 2000, № 3, с. 16–20.
7. Медовар Л. Б., Цыкуленко А. К., Чернец А. В. и др. Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны. – Проблемы специальной электрометаллургии, 2000, №4, с. 3.
8. Патент 25605 Україна, МПК7 В22D19/06, 19/08, 19/10, 19/16, 19/30. Струмopідвiдний кристалiзатор [Текст] / Медовар Б. І, Медовар Л. Б., Федоровський Б. Б., Цикуленко А. К., Ланцман І. А., Чернець О. В., Шевченко В. Ю., Цикуленко К. А., Ус В. І., Саєнко В. Я.; заявник та патентовласник ЗАТ «Елмет-Рол – Група Медовара». - №98042026; заявл. 22.04.98; опубл. 15.10.01, Бюл. № 9. – 6 с.
9. Патент 25607 Україна, МПК7 В22D19/06, 19/08, 19/10, 19/16, 19/30. Струмopідвiдний кристалiзатор [Текст] / Медовар Б. І, Медовар Л. Б., Федоровський Б. Б., Цикуленко А. К., Ланцман І. А., Шевченко В. Ю., Цикуленко К. А., Ус В. І., Белоглазов О. П., Саєнко В. Я., Чернець О. В.; заявник та патентовласник ЗАТ «Елмет-Рол – Група Медовара». - №980031384; заявл. 19.03.98; опубл. 15.02.02, Бюл. № 6. – 6 с.

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СУШКИ И РАЗОГРЕВА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КОВШЕЙ

*Пилипенко Р.А., Пилипенко А.В.*

*Институт газа НАН Украины, г. Киев, Украина*

## **Аннотация**

Приведен анализ известных систем нагрева футеровки металлургических ковшей продуктами сгорания природного газа и газогорелочных устройств, применяемых для этой цели. Отмечено, что эффективность нагрева зависит от полноты сгорания, скорости движения греющих газов и интенсивности их перемешивания в пределах емкости ковша. Приведены результаты применения скоростных газовых горелок, в частности горелок серии ГНБ, при сушке и разогреве металлургических ковшей емкостью от 0,25 т до 250 т, подтверждающие эффективность их применения: сокращение длительности процессов, уменьшение расхода топлива, уменьшение вредных выбросов, равномерность нагрева.

Ключевые слова: ковш, горелка, сушка, разогрев, интенсификация, экономия, экология.

## **Введение**

Металлургические ковши относятся к вспомогательному оборудованию сталеплавильного производства и предназначены для транспорта и разлива жидких металлов. Для защиты металлического корпуса ковша от воздействия высокой температуры расплава его изнутри футеруют огнеупорными материалами. Срок службы футеровки обычно составляет 9 – 15 плавов, а иногда и меньше. После замены футеровку сушат, а перед заливкой металла разогревают до температуры 600 – 1200 °С в зависимости от вида заливаемого металла [1].

Сушка и разогрев ковшей осуществляются продуктами сгорания природного (или другого) газа или жидкого топлива, обычно мазута. Затраты природного газа на эти операции значительны и составляют 40 – 70 % затрат газа, например, в конвертерном производстве [2]. Горелочное устройство устанавливается в крышке ковша, продукты сгорания удаляются либо через отверстие в крышке и далее под зонтом, либо через зазор между крышкой и кромкой ковша непосредственно в цех.

## **Постановка задачи**

В связи с постоянно возрастающей стоимостью топлива, затрат на ремонты и ужесточением требований по экологии уменьшение расхода топлива на сушку/разогрев ковшей, сокращение продолжительности процесса, увеличение срока службы футеровки и минимизация вредных выбросов являются задачами важными и актуальными.

При решении этих задач необходимо учитывать ряд специфических требований:

- нагрев футеровки должен быть максимально равномерным;
- продолжительность прогрева футеровки должна быть минимальной;
- процесс сгорания топлива должен быть завершённым и управляемым;
- содержание вредных веществ в продуктах сгорания не должно превышать допустимые нормы;
- тепло продуктов сгорания желательно использовать для подогрева воздуха на горение или для других целей.

Известно, что организация равномерного нагрева возможна при интенсивной циркуляции продуктов сгорания, а завершение процесса сгорания газа в объеме ковша и его управляемость обеспечиваются при сжигании предварительно подготовленной смеси газа и воздуха [3].

Известно, что существенными способами уменьшения количества оксидов азота в продуктах сгорания являются интенсивная рециркуляция продуктов сгорания к корню факела, двухстадийность сжигания газа [4], использование кислорода или обогащенного им воздуха [5]. Исследования процесса сгорания предварительно подготовленной газозоудшной смеси в скоростной прямоочной струе показывают, что указанные выше требования выполнимы при наличии соответствующего газогорелочного устройства [6, 7]. Характерной особенностью таких струй является сжатый объем факела и высокая скорость движения (до 100 м/с и выше). Сжигание смеси в таких струях обеспечивает полное сгорание газа в объеме ковша, интенсивную рециркуляцию газов к корню струи, выравнивание температуры в их объеме, интенсифицирует теплопередачу от газов к футеровке и ее прогрев. Дальнобойность струи,  $(\rho w^2)_T = 0,5 \cdot (\rho w^2)_0$ , составляет  $X \geq 30D$ . Здесь  $(\rho w^2)_T$  – текущий осевой импульс,  $(\rho w^2)_0$  – начальный,  $X$  – расстояние точки замера от устья струи,  $D$  – диаметр устья струи [6].

### **Решение поставленной задачи**

Наиболее известные из скоростных горелок: отечественные – струйно-нишевые – разработки национального университета «КПИ», горелки ГС – разработки института НИИСМИ и горелки ГНБ – разработки Института газа НАНУ; зарубежные – горелки фирм «Kromshreder» (Германия) и «Lingl» (Чехия). Сравнение этих горелок по требованиям к полноте сгорания в стесненном пространстве ковша, к равномерности нагрева футеровки, дальнобойности струи, управляемости процессом горения, количеству вредных выбросов и стоимости горелок показывает: при температурах нагрева до 700 °С горелки ГС и «Lingl» из-за диффузионного принципа сжигания газа не обеспечивают требуемую полноту сгорания; струйно-нишевые горелки благодаря подаче газа через систему малых отверстий не в состоя-

нии обеспечить необходимую дальнобойность. Наиболее полно отвечают поставленным требованиям горелки фирмы «Kromshreder» (Германия) и горелки ГНБ (Украина), но по стоимости преимущество на стороне горелок ГНБ.

На рис. 1 представлена горелка ГНБ-300, мощностью 300 кВт.



Рис. 1. Горелка ГНБ-300: общий вид и создаваемый ею факел

Разработана серия скоростных горелок ГНБ мощностью от 80 кВт до 1500 кВт (1,5 МВт). Горелки прошли государственные приемочные испытания и успешно используются в системах отопления промышленных печей, например, туннельных печей для обжига кирпича и огнеупоров, камерных нагревательных и термических,

печей для плавления алюминиевых сплавов и цветных металлов, на стендах для разогрева ковшей. В таблице 1 приведены результаты испытаний горелок на содержание CO и NO<sub>x</sub> в сухих неразбавленных продуктах сгорания (в пересчете на α = 1,0) при номинальной мощности горелок.

Таблица 1  
Содержание вредных веществ в продуктах сгорания горелок ГНБ

Наимен.	Ед. изм.	Норма	ГНБ-80	ГНБ-100	ГНБ-125	ГНБ-160	ГНБ-300	ГНБ-600	ГНБ-1500
CO	% (ppm)	0,05 (500)	0,0013 (13,0)	0,0016 (16,0)	0,0002 (2,0)	0,0003 (3,0)	0,002 (20)	0,002 (20)	0,007 (70)
NO <sub>x</sub>	мг/м <sup>3</sup>	210	124	126	123	97	105	80	161

Как видно из приведенных данных, эти показатели значительно ниже допустимых норм, принятых в Украине и странах СНГ и не превышают Европейские стандарты, например, EN 6761996.

На рис. 2 представлена схема стенда на два поста для сушки и прокаливания ковшей емкостью от 0,3 т до 3,0 т для литейного цеха цветных металлов. Температура разогрева – 600 °С.

Каждый пост оборудован неподвижной футерованной крышкой с центральным отверстием для отвода продуктов сгорания. С двух сторон от этого отвода установлено по скоростной горелке ГНБ-160. Над дымоотводом установлен противоточный щелевой радиационный рекуператор. Нагретый до температуры 75 – 100 °С воздух поступает в горелки. Максимальная тепловая мощность каждого поста составляет 300 кВт. После розжига горелок ковш, установленный на тележке, поднимается до стыковки с крышкой. Нагрев ведется

по многоступенчатому графику с обязательной выдержкой в конце нагрева. Максимальный расход газа на выдержку составляет не более  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ , минимальный – до  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Посты работают по смещенному графику: второй пост включается после перевода первого поста в режим выдержки. Такой регламент обеспечивает качественное обслуживание станда. Общий расход газа на станд не превышает  $40 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Стенд для сушки и разогрева ковшей малой емкости: 0,25 т; 0,5 т; 0,75 т и 1,0 т, под разлив легированных сталей, представлен на рис. 3. Требуемая температура разогрева составляет  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Время разогрева – 1 час. Стенд представляет собой площадку на стойках, в которую встроены две стационарные теплоизолированные крышки разных размеров. В крышках сбоку установлено по одной горелке. На дымоотводах установлены шиберы. Основные технические характеристики станда приведены в таблице 2.

При отоплении мазутом время сушки составляло  $12 \div 16$  часов, время догрева до  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $3 \div 4$  часа. Над ковшем постоянно висел слой частичек сажи, смрад, пламя. Мазутная форсунка заменена на горелку ГНБ-600. Горелка установлена по центру крышки. Продукты сгорания удаляются под зонтом через 4 дымоотвода в крышке. Окружающая среда над ковшем прозрачна, следы пламени вне ковша отсутствуют. Длительность сушки и разогрева сократилась более чем в 2 раза.

Для 250-ти тонного ковша разработана скоростная горелка мощностью 1,5 МВт. Горелка установлена в крышке сбоку. Вставляется и вынимается из нее с помощью лебедки. Габариты ковша без крышки: высота – 5,834 м, диаметр – 3,985/3,376 м. Розжиг горелок и контроль наличия пламени – автоматические. Продукты сжигания удаляются в цех через зазор между крышкой и кромкой ковша и через сливные желоба. Система отопления ковша находится в процессе монтажа.

В табл. 3 приведены показатели работы станда для сушки и разогрева ковшей емкостью 40 т после перевода его с отопления мазутом на природный газ.

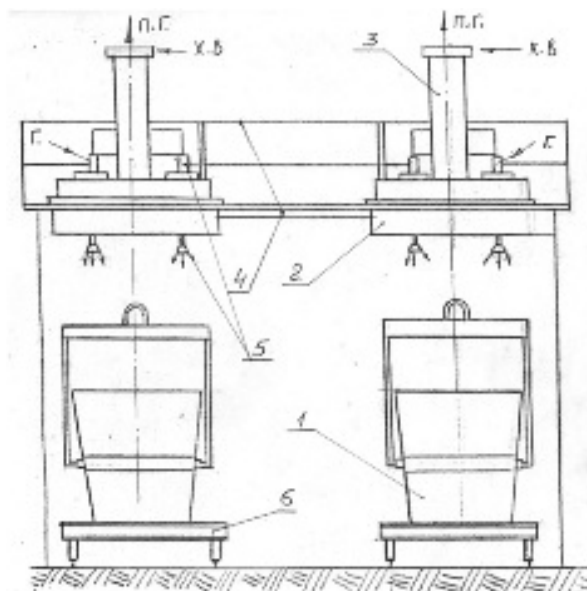


Рис. 2. Схема двухпозиционного станда для сушки и прокаливания ковшей под цветные металлы: 1 – ковш; 2 – крышка; 3 – рекуператор; 4 – площадка; 5 – горелка; 6 – тележка с устройством вертикального перемещения ковшей до крышки

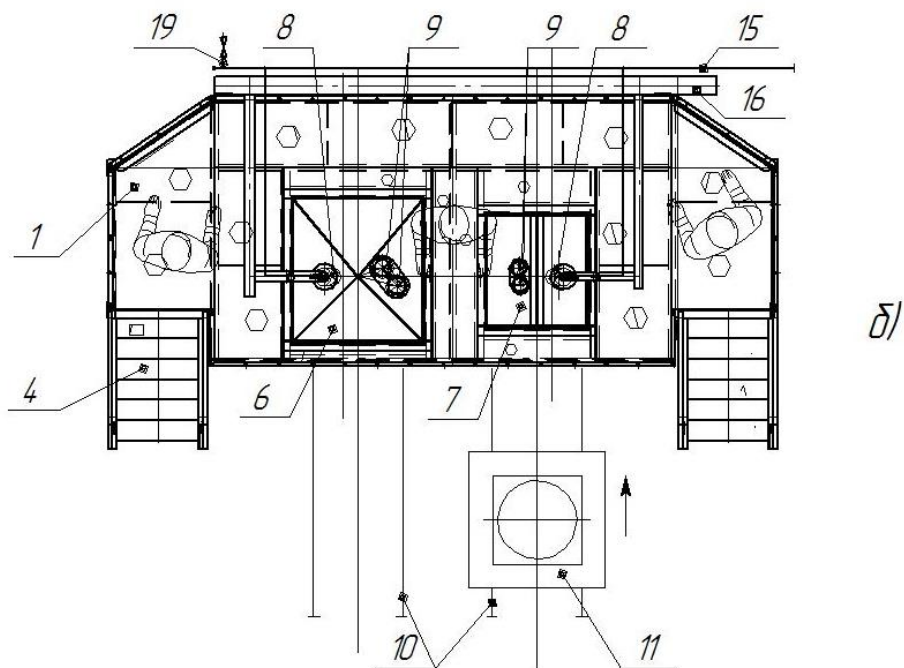
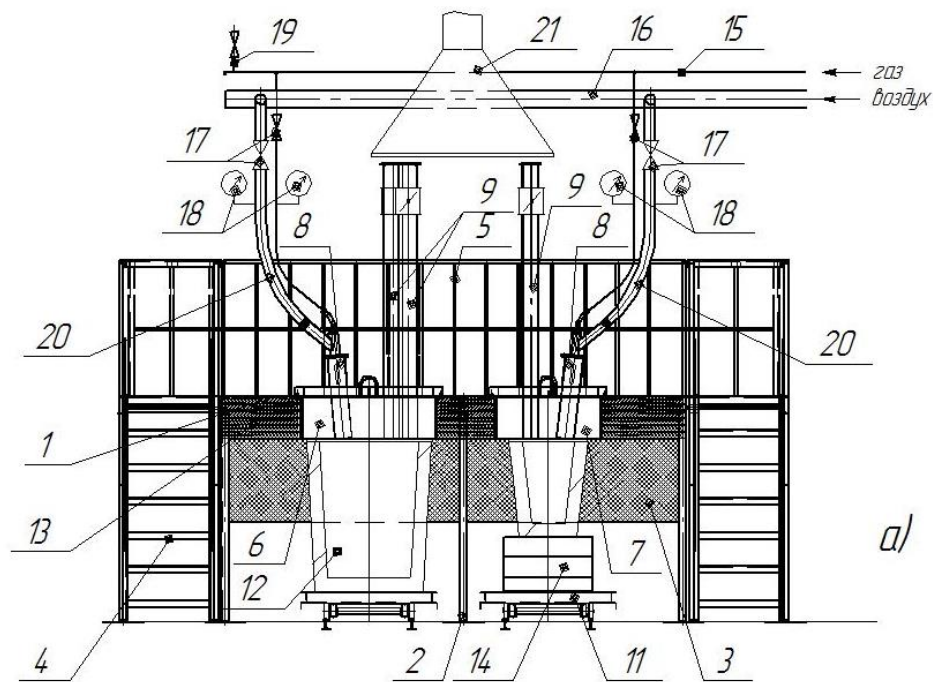


Рис. 3. Общий вид станда для сушки и разогрева ковшей:  
 а) фронтальный вид; б) план. Обозначения: 1 – площадка; 2 – стойки; 3 – ограждение рабочего пространства под крышками; 4 – лестницы; 5 – ограждение площадки; 6 – крышка № 1; 7 – крышка № 2; 8 – горелки; 9 – дымоотводы; 10 – рельсовые пути; 11 – тележка; 12 – ковши; 13 – теплоизоляция крышек и ограждений; 14 – подставки под крышки; 15 – газовый коллектор; 16 – воздушный коллектор; 17 – запорно-регулирующие краны; 18 – манометры; 19 – свеча; 20 – резиноканевые напорные рукава; 21 – зонт

Таблица 2

Техническая характеристика стенда для высокотемпературного разогрева ковшей

Наименование параметра	Ед. измер.	Значение
Максимальная тепловая мощность стенда	кВт	600
Температура разогрева ковша	°С	1200
Количество рабочих мест -постов	шт	2
Тепловая мощность поста № 1 (номинальная)	кВт	300
Тепловая мощность поста № 2 (номинальная)	кВт	160
Теплотворная способность природного газа	ккал/м <sup>3</sup>	7600
Номинальный расход газа на пост № 1, ГНБ-300	м <sup>3</sup> /ч	33,9
Номинальный расход на пост № 2, ГНБ-160	м <sup>3</sup> /ч	18,2
Давление газа перед стендом,	кПа	40,0
Давление воздуха перед стендом	кПа	4,0
Тип вентилятора		ВВД-5
Емкость ковшей на посту № 1	т	0,7; 1,0
Емкость ковшей на посту № 2	т	0,25; 0,5

Таблица 3

Показатели работы ковша емкостью 40 т со скоростной горелкой ГНБ-600

Параметр	Ед. измер.	Номинальный режим работы	
		сушка	разогрев
Режим работы		сушка	разогрев
Температура	°С	200 – 400	600 – 800
Время	час	6,0 – 8,0	1,0 – 1,5
Фактический расходы газа	м <sup>3</sup> /ч	26,9	58,1
Давление газа: перед горелкой	кг/см <sup>2</sup>	0,06	0,1
Давление воздуха перед горелкой	кПа	1,5	2,1
Температура воздуха на горение	°С	17	17
Температура уходящих газов	°С	172	210
Состав уходящих газов:	%		
CO <sub>2</sub>		6,8	5,6
CO		0,0025	0,0010
O <sub>2</sub>		8,9	11,0
NO <sub>x</sub>		0,0017	0,0023
Коэффициент избытка воздуха за ковшом		1,66	2,0
Потери тепла:	%		
- с уходящими газами		10,12	14,89
- хим. недожог		0,01	0,01
- в окружающую среду		3,13	1,45
Тепловая мощность установки	Гкал/час	0,187	0,389
КПД установки	%	86,74	83,65
Концентрация NO <sub>x</sub> , привед. к нормальным условиям, при α = 1,0	мг/м <sup>3</sup>	60,39	99,65
Концентрация CO, привед. к нормальным условиям, при α = 1,0	%	54,06	26,37
Удельные расходы топлива на 1 Гкал	кг.у.т./Гкал	164,70	170,79

## Выводы

Приведенная информация подтверждает реальность выполнения энергетических и экологических требований к процессу сушки и разогрева металлургических ковшей различной емкости и применения для их отопления скоростных горелок, в частности, горелок ГНБ разработки Института газа НАН Украины.

## Список литературы

1. Прохоренко К. К. Разливка стали и качество стальных слитков. Киев, Издательство АН Украинской ССР, 1955.
2. Карп И. Н., Зайвый А. Н. Энергосберегающие технологии в металлургии // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – № 1, 2006. – С. 17.
3. Спейшер В. А. Сжигание газа на электростанциях и в промышленности. – М. : Энергия, 1967.
4. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Ленинград : ЛО «Недра», 1988.
5. Карп И. Н., Зайвый А. Н., Марцевой Е. П., Пьяных К. Е. Использование кислорода и обогащенного кислородом воздуха в нагревательных печах, колодцах, стендах разогрева сталеразливочных ковшей. // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – № 3, 2012. – С. 27.
6. Пилипенко Р. А. Разработка, исследование и внедрение скоростных газовых горелок типа ГН // Теория и практика сжигания газа. – Ленинград, 1981.
7. Пилипенко Р. А., Єринов А. Є., Сезоненко Б. Д, та інші. Газовий паливник. Патент України 22209 F23D 14/22, 14/26 Б.В. 3, 1998.

# УЧЕТ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭКОНОМИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПЕЧАХ В УСЛОВИЯХ РЕКУПЕРАТИВНОГО ПОДОГРЕВА ОКИСЛИТЕЛЯ

*Сорока Б.С., Воробьев Н.В., Липницкий Л.В., Воробьев А.В.*

*Институт газа НАН Украины, Киев, Украина.*

## **Аннотация**

В работе рассмотрены энергетические преимущества процесса утилизации теплоты за счет подогрева воздуха горения. Выполнен термодинамический анализ эффективности топливоиспользования с определением КПД топочной камеры и экономии топлива в печах при подогреве воздуха горения. В качестве последнего рассматривается окружающий атмосферный воздух в различных климатических зонах с умеренными и высокими температурами и относительными влажностями.

Ключевые слова: влажный воздушный окислитель, КПД использования топлива, экономия топлива, рекуперативный подогрев.

## **Введение**

Местные (региональные) климатические условия существенно сказываются на эффективности использования топлива, что, как правило, до последнего времени, не учитывалось при энергоэкологическом анализе топочных процессов и устройств. В работе [1] по существу впервые рассматривается эта проблема в связи с оценкой роли температурно-влажностного режима атмосферного воздуха при использовании топлива в топочной технике.

Термодинамический анализ позволяет решить и оптимизировать задачи эффективного использования топлива различного происхождения и состава при обеспечении минимальных выбросов токсических веществ ( $\text{NO}_x$ ) и парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ) для различных климатических поясов Земли. Имеется в виду учет при анализе существенной зависимости влажности (абсолютного влагосодержания) атмосферного воздуха от его температуры и относительной влажности.

## **Постановка задачи**

Исторически прикладная теория горения развивалась как учение о сжигании топлива с сухим окислителем. Вместе с тем сухого атмосферного воздуха, служащего окислителем при горении, без специальной подготовки (осушки) не существует в природе. При этом влажность атмосферного воздуха – параметр, существенно переменный во времени и пространстве.

Вместо традиционного подхода, имеющего целью определить однозначно позитивную роль подогрева сухого воздуха горения как фактора, позволяющего экономить топливо, следует учитывать неод-

нозначную роль температуры воздуха, если этот параметр увязывается с влагосодержанием воздуха. По мере повышения температуры и влажности атмосферного воздуха в рассматриваемом регионе изменяется роль отдельных факторов, например, связанных с утилизацией теплоты уходящих газов.

### **Определение энергетической эффективности и экономии топлива в условиях рекуперативного подогрева влажного воздуха-окислителя**

Для определения КПД процесса используется подход, который основан на рассмотрении КПД цикла Карно с учетом 1-го и 2-го начал термодинамики через полные (химические) энтальпии теплоносителя (равновесных продуктов сгорания топливно-окислительной смеси заданного состава):

$$\eta_f = \frac{(1 + \lambda \cdot \Omega_{st}) \cdot (I_{g,T} - I_{g,ex})}{(1 + \Omega^*) \cdot (I_{g,T}^* - I_{g,ex}^*)}, \quad (1)$$

где  $I_{g,T}$ ,  $I_{g,ex}$  – полная энтальпия 1 кг смеси исходных компонентов горения на входе в топочную камеру и потока продуктов сгорания на выходе из нее – соответственно,  $\lambda$  – избыток окислителя,  $\Omega_{st}$  – массовое стехиометрическое число, индекс «\*» – для сухой, холодной стехиометрической топливовоздушной смеси, взятой при стандартных параметрах ( $p_0 = 101,325$  кПа;  $T_0 = 298,15$  К).

На рис. 1 показана зависимость КПД использования топлива при сжигании природного газа с воздухом различной влажности от температуры газов (продуктов сгорания), уходящих из топки, для разных составов топливно-окислительной смеси.

Из рис. 1 видно, что увеличение относительной влажности воздуха приводит к снижению топливного КПД. Максимальное понижение КПД имеет место для случая повышенной начальной температуры насыщения воздуха влагой:  $t_a = 55$  °С,  $\phi = 100$  %. при температуре рекуперативного подогрева воздуха-окислителя  $t_{a,rec} = 300$  °С составляет  $\Delta\eta_f = 12,6$  % в случае влажного насыщенного воздуха по сравнению с сухим воздухом горения при  $t_{a,rec} = 600$  °С составляет  $\Delta\eta_f = 10,1$  %.

При численном анализе сопоставляется экономия топлива в зависимости от подогрева воздуха горения для случаев варьирования температурно-влажностного режима:

$$\delta B_f = \frac{B'_f - B''_f}{B'_f} \cdot 100 \% = \left[ 1 - \frac{(1 + \lambda \cdot \Omega'_{st}) \cdot (I'_{g,T} - I'_{g,ex})}{(1 + \lambda \cdot \Omega''_{st}) \cdot (I''_{g,T} - I''_{g,ex})} \right], \quad (2)$$

где индексы «'» – для сухого холодного окислителя, «''» – для влажного подогретого окислителя.

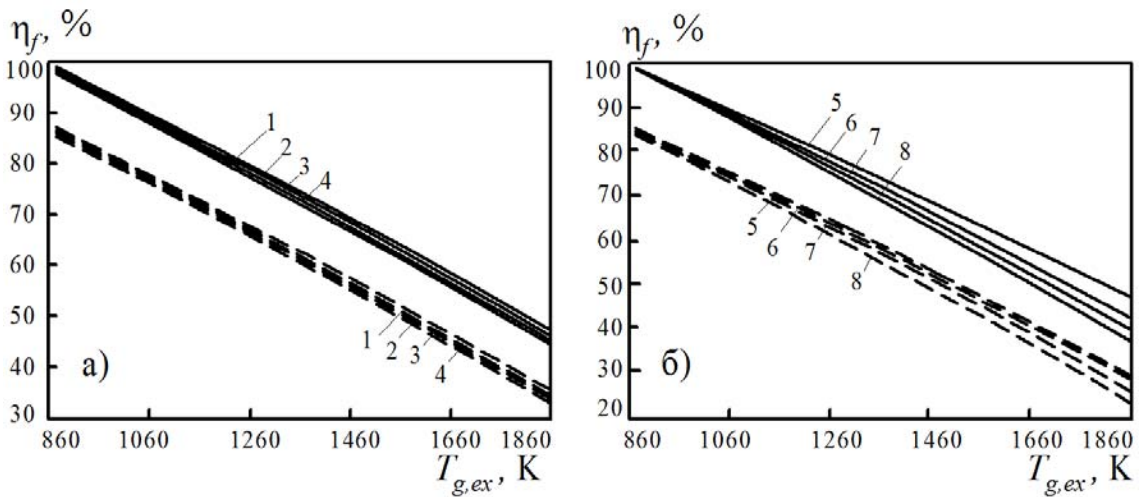


Рис. 1. Зависимость КПД использования топлива  $\eta_f$  от температуры уходящих продуктов сгорания  $T_{g,ex}$  при сжигании природного газа и различной начальной температуре  $t_a$  и относительной влажности  $\phi_a$  воздуха-окислителя. Начальная температура воздуха-окислителя  $t_a$ , °C: а – 25; б – 55. Для кривых относительная влажность воздуха-окислителя  $\phi_a$ , %: 1 – 0; 2 – 50; 3 – 75; 4 – 100. Рекуперативный подогрев воздуха-окислителя до температуры  $t_{a,rec}$ , °C: 300 – пунктир, 600 – сплошные линии

На рис. 2 представлена зависимость экономии топлива при разном уровне подогрева влажного воздуха-окислителя в рекуператоре по сравнению к случаю сжигания топлива с сухим холодным воздухом.

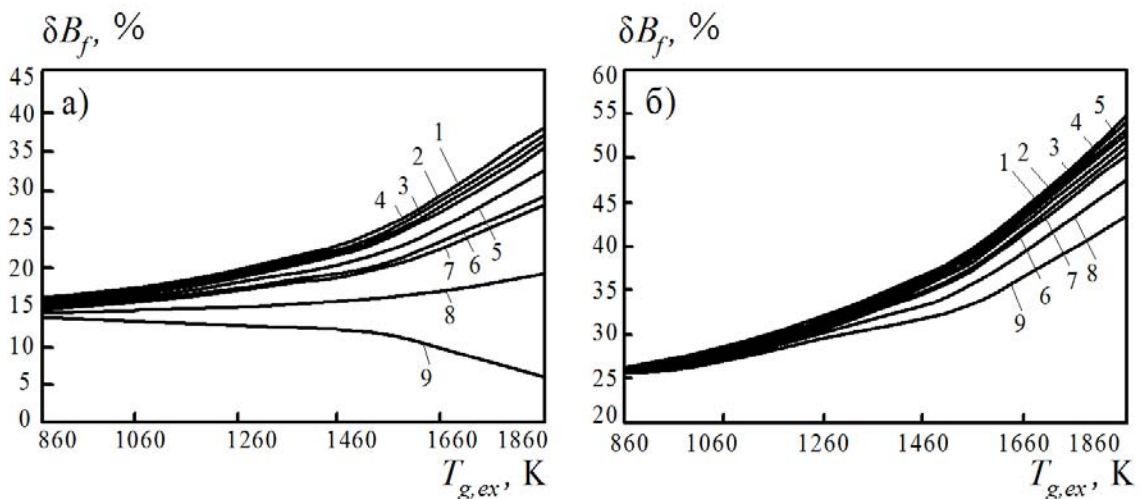


Рис. 2. Зависимость экономии топлива  $\delta B_f$  от температуры уходящих газов  $T_{g,ex}$  при сжигании природного газа и различной начальной температуре  $t_a$  и относительной влажности  $\phi_a$  воздуха-окислителя по сравнению со сжиганием топлива с сухим холодным воздухом ( $t_a = 25$  °C,  $\phi = 0$ ). Температура рекуперативного нагрева воздуха-окислителя  $t_{a,rec}$ , °C: а – 300; б – 600. Начальная температура воздуха  $t_a$ , °C: 25 – 1, 2, 3; 40 – 4, 5, 6; 55 – 7, 8, 9. Начальная относительная влажность воздуха  $\phi$ , %: 50 – 1, 4, 7; 75 – 2, 5, 8; 100 – 3, 8, 9

Из рис. 2 видно, что наличие влажности в воздухе-окислителе, вызванной атмосферными условиями ведет к снижению экономии топлива при увеличении относительной влажности (абсолютного влагосодержания). Для значительного рекуперативного подогрева воздуха-окислителя ( $t_{a,rec} = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , рис. 2, б) уровень экономии топлива монотонно возрастает с увеличением технологической температуры на выходе из печи  $T_{g,ex}$  (температуры уходящих газов). В то же время при больших значениях влагосодержания и незначительном рекуперативном подогреве воздуха-окислителя ( $t_{a,rec} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , рис. 2, а) отмечается понижение экономии топлива с ростом температуры уходящих газов (кривая 9).

Сходная картина влияния параметров воздуха-окислителя наблюдается при искусственной реализации варьируемых условий, связанных с климатом, в технологическом процессе. Речь идет, например, о схеме с двухступенчатой рекуперацией теплоты уходящих газов: использование схемы WVP – “water vapor pump” – невысоком нагреве и увлажнении атмосферного воздуха на 1-ой ступени, а также последующем существенном нагреве воздуха в печном рекуператоре на 2-ой ступени (рис. 3).

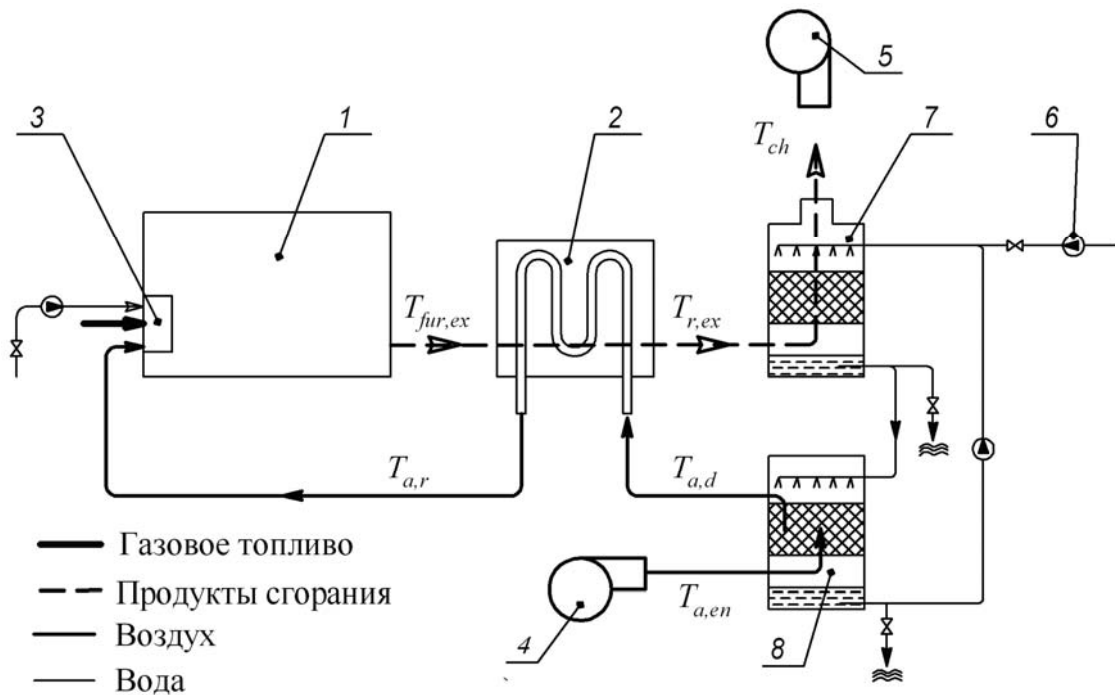


Рис. 3. Схема глубокой двухступенчатой утилизации теплоты из технологической установки с увлажнением воздуха горения и его последующим нагревом в рекуператоре: с использованием системы “water vapor pump”. 1 – высокотемпературная печь; 2 – высокотемпературный рекуператор; 3 – горелочное устройство; 4 – вентилятор; 5 – дымосос; 6 – водяной насос; 7 – контактный водяной экономайзер; 8 – контактный воздухоподогреватель

## **Выводы**

1. Рост исходной температуры влажного воздуха горения и сопутствующее повышение влагосодержания воздуха может вызвать понижение КПД использования топлива  $\eta_f$  печи при фиксированном рекуперативном подогреве воздуха. С этих позиций учет влажности воздуха при расчете системы «печь – утилизатор теплоты» необходим наряду с учетом температуры подогрева воздуха.

2. Экономия топлива при рекуперативном подогреве воздуха, помимо температуры подогрева воздуха существенно зависит от абсолютного влагосодержания воздуха горения, определяемого исходной температурой и относительной влажностью воздуха. Чем ниже температура подогрева воздуха в рекуператоре и выше технологическая температура печи, тем существенней негативное влияние повышенной влажности исходного воздуха горения на экономию топлива в печи при рекуперативном подогреве окислителя.

## **Список литературы**

1. Сорока Б. С. Влияние климатических факторов на теплотехнические характеристики, энергетическую эффективность и оценка экологических последствий сжигания газового топлива // Международный журнал Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2017; (4–6). – С. 116–129.

# **ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ЗОН РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ПЕЧИ МЕТОДИЧЕСКОГО ТИПА**

*Шемет Т.Н., Пульпинский В.Б., Ложко А.Н., Шемет В.Ю.*

*Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

Рассмотрено влияние количества зон регулирования температуры печи на ее производительность, удельный расход топлива и на другие технико-экономические показатели.

Ключевые слова: печь, температура печи, зона регулирования, технико-экономические показатели.

## **Постановка задачи**

Современные нагревательные печи методического типа могут иметь три и более зоны регулирования температуры печи по ее длине. Известно, что большее количество зон, с одной стороны улучшает технико-экономические показатели работы печи, так как позволяет более гибко управлять процессом нагрева, а с другой увеличивает затраты на систему автоматического управления печью, ее ремонт и обслуживание.

Задача настоящего исследования состоит в том, чтобы определить теоретически обоснованное количество зон регулирования температуры печи.

## **Решение поставленной задачи**

Для решения поставленной задачи необходимо выполнить расчет нагрева металла в существующей печи (поверочный расчет печи), определить рациональный режим нагрева заготовок [1], при котором производительность печи будет максимальной. Под рациональным режимом нагрева, в данном случае, понимаем такой температурный режим, при котором технологические параметры нагрева заданы (температура центра и перепад температуры по сечению заготовки в конце нагрева), расход топлива является минимально возможным, а производительность печи – максимально возможной. Далее, используя рациональный режим нагрева, определим максимально возможную производительность при разном количестве зон регулирования температуры печи.

При изменении количестве зон регулирования температуры печи длина методической зоны остается неизменной. Между зонами регулирования температуры существуют неотопливаемые участки печи – переходные зоны, длина которых соответствует интервалу нагрева. Поэтому максимальное количество зон регулирования температуры в

данном исследовании зависит от конструктивных особенностей конкретной печи (длины методической и переходных зон).

В качестве объекта исследования выбрана кольцевая печь со следующими характеристиками: средний диаметр – 24 м; ширина пода – 4,9 м; высота рабочего пространства – 2,04 м. Слитки или заготовки нагреваются до среднemasсовой температуры  $1250 \div 1280$  °С. Максимальная производительность печи –  $65 \div 70$  т/ч.

Печь отапливается природным газом. Рабочее пространство печи разделено на 4 зоны – три отапливаемые и одна – не отапливаемая (методическая), длина которой по отношению к активной площади пода составляет – 30 %.

Печь оборудована системами автоматического регулирования температуры и соотношения «топливо-воздух» по зонам, давления продуктов сгорания в рабочем пространстве и температуры первого ряда труб рекуператора.

Температура печи по зонам: I зона –  $t_{\text{печ1}} = 1230$  °С; II зона –  $t_{\text{печ2}} = 1290$  °С; III зона –  $t_{\text{печ3}} = 1290$  °С.

Разбивка печи по зонам: методическая зона –  $\gamma_{\text{мет}} = 99^\circ$ ; I зона –  $\gamma_{\text{мет}} = 89^\circ$ ; II зона –  $\gamma_{\text{мет}} = 76^\circ$ ; III зона –  $\gamma_{\text{мет}} = 66^\circ$ ; «мертвая зона» –  $\gamma_{\text{м.з}} = 30^\circ$ .

Размеры нагреваемых заготовок: диаметр – 0,46 м; длина  $l$  – 2,0 м. Марка стали – углеродистая (Сталь 20). Вид топлива – природный газ. Коэффициент рекуперации  $r_b = 0,35$ .

Технологические параметры нагрева: темп выдачи заготовок – 26 шт/ч; емкость печи  $E = 144$  шт.

Расчет нагрева металла в кольцевой печи выполняется приближенным аналитическим методом [2], который основан на аналитическом решении задачи нагрева цилиндра бесконечной длины при граничном условии II рода [3]. При расчете нагрева металла принимается, что между зонами регулирования температуры печи существуют неотапливаемые участки (переходные зоны), длина которых конструктивно принята равной 5 градусам, что составляет примерно 1,5 % активного пода кольцевой печи. При расчете расхода топлива переходная зона относится к предыдущей зоне регулирования температуры печи. Общее количество интервалов нагрева, включая методическую и переходные зоны, составляет  $N = 33$ .

Основные результаты поверочного расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты поверочного расчета

Количество зон, Z	P, т/ч	b, м <sup>3</sup> /т	M <sub>общ</sub> , кВт	t <sub>цк</sub> , °С	Δt <sub>к</sub> , °С
3	67,4	35,215	23311,2	1269,7	13,8

При поиске (определении) рационального режима нагрева на расчет накладываются следующие ограничения:

- максимальная температура печи в зоне – 1320 °С;
- температура центра заготовки в конце нагрева – не меньше 1269,7 °С;
- перепад температуры по сечению заготовки в конце нагрева – не больше 13,8 °С.

При выполнении исследования длина методической зоны остается неизменной, то есть составляет 99 градусов, а длина каждой зоны регулирования температуры печи одинакова и не может быть меньше 10 градусов.

Результаты исследования влияния количества зон регулирования температуры печи ( $Z$ ) на ее производительность и другие технико-экономические показатели (ТЭП) представлены в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2

Влияние количества зон регулирования температуры печи на ТЭП

$Z$	$L_z$ , гр	$P$ , т/ч	$b$ , м <sup>3</sup> /т	КИТ	$t_{yx}$ , °С	$t_{цк}$ , °С	$\Delta t_k$ , °С
3	73,67	81,41	35,707	0,788	707,8	1269,7	13,69
4	54	85,18	35,762	0,774	720,2	1269,72	13,67
5	42,2	87,55	35,857	0,77	731,8	1269,71	13,66
6	34,33	89,9	35,84	0,769	735,3	1269,7	13,7
7	28,714	92,57	35,733	0,77	732,9	1269,7	13,75
8	24,5	92,66	35,892	0,767	744	1269,71	13,73

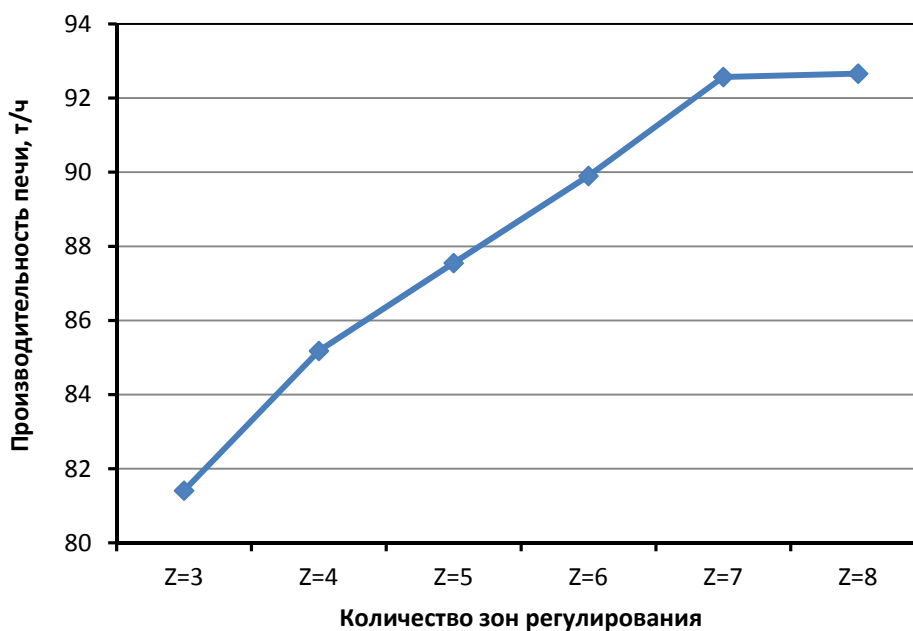


Рис. 1. Влияние количества зон регулирования температуры печи на производительность

## **Выводы**

Анализ выполненных расчетов позволяет сделать следующие выводы:

1. С увеличением количества зон регулирования температуры, до определенного предела (до 7 – 8), увеличивается максимально возможная производительность печи.

2. В связи с тем, что расчеты выполнялись для максимальной производительности, то с увеличением количества зон регулирования температуры наблюдается тенденция к уменьшению коэффициента использования теплоты топлива и соответственно к увеличению удельного расхода топлива.

3. Для данной кольцевой печи и выбранных ограничений при поиске рационального режима нагрева наиболее эффективным является 7 зон регулирования температуры печи.

4. Уменьшение роста максимальной производительности при увеличении количества зон регулирования температуры печи объясняется тем, что увеличивается количество и, соответственно, доля переходных зон.

## **Список литературы**

1. Губинский В. И., Пульпинский В. Б., Клевцур О. Ю. Способ поиска энергосберегающего режима нагрева в многозонных противоточных печах // Труды XVI международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии». – Днепропетровск. – 2011. – С. 68–69.

2. Пульпинский В. Б., Шемет Т. Н., Усенко А. Ю. Применение приближенного численно-аналитического метода для расчета нагрева изделий в промышленных печах // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика : Зб. наук. праць. – Випуск 8. – Дніпро : Нова ідеологія, 2016. – С. 156–161

3. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. – М. : Металлургиздат, 1962. – 568 с.

***Раздел 6.***  
***Экологические проблемы***  
***металлургии и энергетики.***  
***Технологии защиты***  
***окружающей среды***

***Редактор раздела*** – профессор, д.т.н., заведующий  
кафедрой экологии, теплотехники и охраны труда  
Национальной металлургической академии Украины  
***Ерёмин А.О.***

***Рецензент*** – профессор, д.т.н.,  
директор Института экологической безопасности  
и мониторинга окружающей среды Винницкого  
государственного технического университета  
***Петрук В.Г.***

# ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕЦИКЛИНГА РАДИАЦИОННО ЗАГРЯЗНЕННОГО МЕТАЛЛА

*Балакин В.Ф., Машинистов В.Е.*

*Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

Изложены результаты теоретических исследований, выполненных в НМетАУ, по развитию технологии рециклинга радиационно загрязненного металла, основой которой является его плавление в металлургической печи индукционного типа. В процессе плавления радиационно загрязненный металл из открытого источника ионизирующего излучения преобразуется в закрытый. Как следствие, создаются условия для получения из него металла безопасного в радиационном отношении. Критерием радиационной безопасности выплавленного металла является такое значение мощности эффективной дозы излучения с его поверхности, при котором обеспечивается не превышение установленного лимита дозы облучения людей. Применение данной технологии позволит вернуть в промышленное производство большие объемы накопившегося радиационно загрязненного металла и создает условия для предупреждения экологических нарушений.

Ключевые слова: радиационно загрязненный металл, рециклинг, дезактивация, плавление, источник излучения, облучение.

## **Введение**

В современных условиях все острее встает вопрос о возвращении в промышленность миллионов тонн радиационно загрязненного металла (РЗМ), который является источником опасного для биологических объектов ионизирующего излучения (ИИ).

Рециклинг РЗМ приведет к уменьшению объемов добычи и переработки минерального сырья, что создает условия для предупреждения экологических нарушений, а также обуславливает существенное уменьшение издержек на горнопромышленное производство. С другой стороны, РЗМ представляет собой возобновляемый, причем многократно, источник сырья для металлургической промышленности, что значительно улучшает технико-экономические показатели его работы. Настоятельная необходимость решения данных проблем приводит к поиску эффективных технологий переработки РЗМ.

## **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является развитие технологии рециклинга радиационно загрязненного металла, на основе его плавления, применимой для широкомасштабного промышленного использования.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- выполнить анализ РЗМ как источника облучения отдельного человека;
- исследовать влияние процесса плавления РЗМ на его радиационные параметры;
- разработать критерий радиационной безопасности выплавленного металла;

### Характеристика радиационно загрязненного металла как источника ионизирующего излучения

Создаваемое РЗМ излучение является дополнительным к постоянно действующему на человека природному радиационному фону.

Для того, чтобы загрязненный радионуклидами металл можно было повторно использовать в хозяйственной деятельности, необходимо обеспечить, чтобы индивидуальная годовая эффективная доза внешнего облучения, создаваемая этими радионуклидами не должна превышать годового лимита дозы, который установлен нормами радиационной безопасности Украины (НРБУ-97) [1].

Суммарная доза облучения от какого-либо конкретного источника ИИ зависит не только от интенсивности ИИ с его поверхности, но и от того, какими путями излучения поступают в организм отдельного человека. Схема потенциальных путей поступления ИИ и радионуклидов к человеку показана на рис. 1. В качестве источника ИИ рассматривается фрагмент металла, поверхность которого загрязнена радионуклидами.

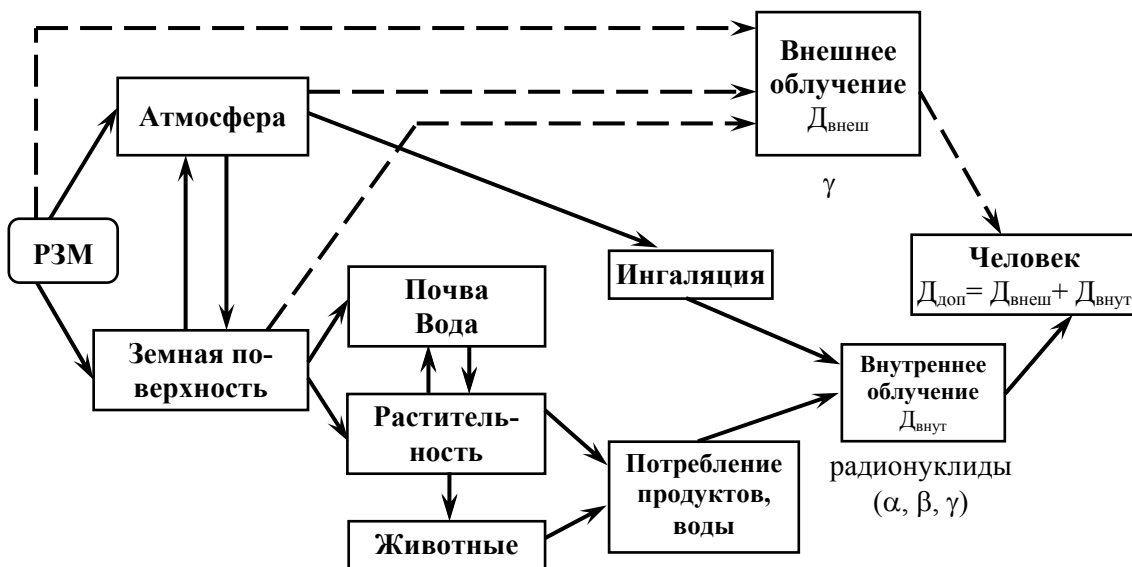


Рис. 1. Общая схема потенциальных путей поступления к человеку ионизирующего излучения и радионуклидов от радиационно загрязненного металла ( — — — — -  $\gamma$ -излучение; ————— - радионуклиды)

Создаваемое загрязняющими металл радионуклидами ИИ, достигает тканей организма человека и воздействует на них двумя различными путями – внешним и внутренним. Поскольку механизмы радиационного поражения, обусловленные этими путями, существенно различаются, то и меры защиты от внешнего облучения в корне отличаются от мер, препятствующих внутреннему облучению.

Защита от внешнего гамма-излучения базируется на законах распространения ИИ и характере его взаимодействия с веществом.

Внутреннее радиационное воздействие связано с поступлением в организм человека находившихся на поверхности РЗМ радионуклидов.

Как следует из рис. 1, уменьшать уровень ИИ, который создается радионуклидами, загрязняющими металл, можно не только путем их удаления с загрязненной поверхности, но и воздействием на пути поступления радионуклидов и ИИ к людям. Поскольку конечной целью дезактивации какого-либо объекта является исключение или уменьшение уровня ИИ, от загрязняющих этот объект радионуклидов, то всю совокупность действий по достижению данной цели можно объединить единым понятием «дезактивация».

Оба эти пути уменьшения уровня действующего на человека ИИ реализуются при плавлении РЗМ, являющегося источником этого излучения. Плавление РЗМ, не прошедшего этап его предварительной дезактивации, является основным элементом технологии его рециклинга, суть которой изложена в [2]. При плавлении радионуклиды, которые находились на поверхности металла, переходят в расплав и распределяются в его объеме равномерно. Таким же остается это распределение и в выплавленном слитке. В результате процесс плавления приводит к преобразованию открытого источника ИИ, каким был РЗМ, в закрытый, из которого радионуклиды не могут попасть в окружающую среду, распространяться в ней и попасть внутрь организма человека. Следовательно, при этом полностью исключается внутренний путь облучения человека. Что касается пути внешнего облучения, то из всех видов ИИ за пределы слитка может выходить гамма-излучение только тех радионуклидов, которые находятся у поверхности выплавленного металла. При плавлении часть радионуклидов переходит в шлаковую и в газоаэрозольную составляющие продуктов плавки, что также существенно может уменьшить количество оставшихся в металле радионуклидов. Поскольку плавление РЗМ может привести к существенному уменьшению мощности ИИ с его поверхности, то этот процесс, также как и удаление радионуклидов с поверхности РЗМ, по сути является его дезактивацией. При этом уменьшение уровня ИИ за счет его поглощения в металле, в котором оно распространяется, можно рассматривать как эффект самодезактивации.

Уровень ИИ с поверхности слитка, также как и изделий из него с течением времени только понижается за счет уменьшения количества находящихся в нем радионуклидов в следствии их распада. Никакие процессы обработки таких изделий не могут повысить уровень их радиационной опасности для биологических объектов. Безопасные уровни гамма-излучения с поверхности готовой продукции достигаются при настолько низких концентрациях радионуклидов, что они никак не влияют на изменение физических и химических свойств металлов. Таким образом, процесс плавления создает условия для получения из РЗМ металла, пригодного для использования без каких-либо ограничений.

Во многих странах принят критерий радиационной безопасности, который регламентирует содержание радионуклидов в металле [3]. Однако надо иметь в виду, что активность радиоактивного изотопа указывает только на число его распадов в секунду, и никак не свидетельствует о степени создаваемой ею радиационной опасности для биологических объектов.

Критерии радиационной безопасности людей устанавливаются на основе данных о биологическом действии радиационных факторов [7]. Для металла таким действующим фактором является гамма-излучение с его поверхности. Радиационный контроль металлопродукции проводится путем измерения мощности дозы ИИ с ее поверхности средствами объективного контроля. Решение о соответствии металла установленным требованиям принимается, если результат измерения не превышает значения 0,26 мкГр/час [5].

### **Выводы**

Таким образом метод рециклинга РЗМ на основе его плавления предлагается в качестве высоко эффективной технологии, пригодной для промышленного использования. Результаты теоретических исследований по развитию технологии рециклинга радиационно загрязненного металла, основанной на его плавлении в металлургической печи, свидетельствуют, что данный подход может быть использован для широкомасштабного промышленного рециклинга РЗМ.

Показано, что процесс плавления приводит к преобразованию источника ионизирующего излучения открытого типа, каким является РЗМ, в источник закрытого типа. Слиток и изделия из него полученные из РЗМ, является источником только гамма-излучения.

Обоснован и выбран критерий радиационной безопасности продукции, полученной из РЗМ. Таким критерием является максимальное значение мощности дозы гамма-излучения с поверхности металла при котором обеспечивается не превышение основных дозовых лимитов, установленных НРБУ.

### Список литературы

1. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Украины от 01.12.97 г., № 62.
2. Technology of recycling radioactively contaminated metal by the method of melting / V. Balakin, V. Mashinistov, O. Galkin, K. Bilan // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/5(82). – P. 31–37.
3. Перспективы развития за рубежом регенерации металлов из радиоактивного металлического скрапа методом плавления. Шульга Н. А. // Атомная техника за рубежом. – 1994, № 6. – С. 10–17.
4. Радиационная гигиена: учебник для вузов / Л. А. Ильин, В. Ф. Кириллов, И. П. Коренков. – М. : ГЭОТАР – Медиа, 2010.
5. Державні санітарно-екологічні норми і правила з радіаційної безпеки при проведенні операцій з металобрухтом. ДСЕНіП 6.6.1 – 0, 79 / 211.3. 9001-02.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО КАТАЛИЗАТОРА ДЛЯ ОКИСЛЕНИЯ ОКСИДА УГЛЕРОДА И УГЛЕВОДОРОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

*Белоконь К.В.<sup>1</sup>, Проскурнин О.А.<sup>2</sup>, Кирпичева И.В.<sup>3</sup>, Белоконь Ю.А.<sup>1</sup>*

*1 – Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина*

*2 – Научно-исследовательское учреждение «Украинский научно-исследовательский институт экологических проблем», г. Харьков, Украина*

*3 – Луганский национальный аграрный университет, г. Харьков, Украина*

## **Аннотация**

Приведен метод определения оптимального состава катализаторов для обеззараживания газовых выбросов на базе интерметаллидных соединений. Для определения регрессионной зависимости активности катализатора от концентраций входящих в его состав металлов использован непараметрический метод статистического анализа Монте-Карло. Приведен пример расчета для катализатора при окислении оксида углерода.

Ключевые слова: газовые выбросы, активность катализатора, коэффициенты регрессии, метод Монте-Карло.

## **Введение**

Техногенными источниками загрязнения атмосферного воздуха оксидом углерода и углеводородами являются теплоэлектростанции, двигатели внутреннего сгорания, предприятия химической, нефтехимической и металлургической отраслей промышленности. Химические и биологические свойства оксида углерода и углеводородов, а также их значительные объемы в газовых выбросах обуславливают повышенную экологическую опасность в районе размещения объектов. Перспективным направлением в области очистки выбросов является разработка катализаторов с заменой благородных металлов на интерметаллидные соединения. Литературный анализ [1] свидетельствуют о том, что формирование катализаторов на интерметаллидной основе способствует увеличению их каталитической активности и термической устойчивости.

Решение проблемы обезвреживания выбрасываемых газообразных отходов позволит снизить объем выбросов оксида углерода и углеводородов в атмосферу, защитить окружающую среду и человека, решить задачу соблюдения нормативных показателей газовых выбросов, установленных в Украине.

## **Постановка задачи**

Общие принципы создания катализаторов с использованием интерметаллидных соединений описаны в работах [2, 3]. Одной из под-

задач при реализации теоретических разработок является нахождение оптимального состава катализаторов. В работах [4, 5] рассматривалась эффективность данных катализаторов, и приведен механизм определения оптимального содержания в нем кобальта, марганца и меди. В качестве критерия оптимизации была выбрана активность катализатора при заданной температуре. Оптимизируемыми переменными являлись концентрации указанных металлов. Ограничения определялись технологическими возможностями промышленного производства катализаторов.

При оптимизации было учтено то обстоятельство, что активность катализатора и концентрации металлов находятся в стохастической зависимости, что позволяет построить регрессионную зависимость

$$Y = Y(X_1, X_2, X_3),$$

где  $Y$  – значение активности катализатора при заданной температуре, %;  $X_1, X_2, X_3$  – содержание соответственно кобальта, марганца и меди, масс. %.

В работе [4] при восстановлении регрессионной зависимости был использован метод наименьших квадратов. Однако данный метод относится к группе параметрических методов и поэтому он является надежным лишь при условии нормального распределения рассматриваемых случайных величин [6]. В данном же случае это условие может быть невыполнимым в силу сложности процесса обеззараживания выбрасываемых газов. Кроме того, малый объем выборки наблюдений может не позволить провести проверку статистической гипотезы о законе распределения.

Таким образом, в рамках нахождения оптимального состава катализатора ставится следующая задача. Необходимо восстановить регрессионную зависимость активности катализатора на основе непараметрических методов статистики, т.е. методов, достоверность которых не зависит от параметров вероятностного распределения рассматриваемых случайных величин.

### **Решение задачи**

Для решения поставленной задачи может быть использован метод непараметрического регрессионного анализа, основанный на методе статистических испытаний (методе Монте-Карло), который ранее применялся для оценки техногенного воздействия на окружающую среду [6]. В основе этого метода лежит следующая математическая закономерность: функция распределения любой случайной величины распределена равномерно на численном отрезке  $[0, 1]$  независимо от вида распределения исходной случайной величины.

Центральным понятием разработанного метода является интегральный показатель – величина, которая может быть определена как:

$$A = \int_{\Omega} a(\omega) d\omega, \quad (1)$$

где  $a(\omega)$  – плотность распределения показателя  $A$  в заданной области  $\Omega$  ( $\omega \in \Omega$ ) объема  $V(\Omega)$  некоторого пространства.

В работе [6] доказана возможность представления интегрального показателя в виде интеграла по функции распределения

$$A = V(\Omega) \int_0^1 a(w) dw, \quad (2)$$

где  $a(w)$  – функция, обратная к функции распределения  $w(a)$ :

$$w(a) = \int_{a_{\min}}^a \rho(a) da, \quad (3)$$

где  $\rho(a)$  – плотность распределения величины  $a$  в области ее изменения  $a_{\min} < a < a_{\max}$ .

Установленная закономерность позволяет по выборке данных наблюдений  $\{a_i\}$  методом Монте-Карло с помощью численного интегрирования делать оценку интегрального показателя  $A$  через распределение случайной величины

$$A'(\{w_i\}) = \frac{V(\Omega)}{2} \sum_{i=1}^{N+1} (a_i + a_{i-1})(w_i - w_{i-1}), \quad (4)$$

где  $\{w_i\}$ ,  $i = 1 \div N$ , – вариационный ряд равномерно распределенных случайных чисел отрезка  $[0, 1]$ ,  $\{a_i\}$ ,  $i = 0 \div N+1$ , – вариационный ряд измерений;  $a_0 = a_{\min}$ ,  $a_{N+1} = a_{\max}$ ,  $w_0 = 0$ ,  $w_{N+1} = 1$ .

Задавая с помощью генератора случайных чисел большое количество раз выборки  $\{w_i\}$ , можно получить распределение величины  $A'$ , по которому оценивается значение интегрального показателя, а также находится доверительный интервал  $[A^-, A^+]$ , которому принадлежит истинное значение интегрального показателя  $A$  с заданной вероятностью. По доверительному интервалу  $[A^-, A^+]$  проверяется нулевая гипотеза – равенство нулю интегрального показателя  $A$ .

Если регрессионная зависимость определяется как элемент евклидова функционального пространства с заданным скалярным произведением элементов и ортогональным базисом  $\{\Theta_i(x)\}$ , то каждый коэффициент регрессии  $\gamma_k$ , исходя из ортогональности базиса, равен:

$$\gamma_k = \frac{(y, \Theta_k)}{\|\Theta_k\|^2} \quad (5)$$

и может оцениваться как интегральный показатель по выборке  $\{(y_i, \Theta_k(x_i))\}$  методом Монте-Карло с последующей проверкой нулевой гипотезы через распределение случайной величины:

$$\gamma'_k(\{w_i\}) = \frac{V}{2} \sum_{i=1}^{N+1} (a_i + a_{i-1})(w_i - w_{i-1}), \quad (6)$$

где  $\{a_i\}$ ,  $i = 1 \div N$ , – вариационный ряд по выборке их скалярных произведений  $\{(y_i, \Theta_k(x_i))\}$ ;  $V$  – объем области определения величины  $a$ .

С целью представления регрессионной зависимости в виде степенного ряда (наиболее удобной формы для анализа результата решения) в качестве базиса функционального пространства целесообразно выбирать ортогональную систему полиномов.

Ниже приведен пример определения оптимального состава катализатора для окисления оксида углерода при температуре 200 °С. Исходные данные для расчета были взяты из работы [4]. Параметром оптимизации выбрана активность катализатора при окислении оксида углерода при 200 °С. В качестве функционального базиса была взята ортогональная система полиномов Чебышева 2-го рода.

В результате проведенного регрессионного анализа по описанной схеме получена зависимость каталитических свойств от содержания легирующих элементов:

$$Y = 23,7 + 4,3X_1 + 3,4X_2 + 4,68X_3 - 0,133X_1^2 - 0,084X_2^2 - 0,21X_3^2 + 0,07X_1X_2 - 0,175X_2X_3. \quad (7)$$

Оптимальное решение легко определяется с помощью системы Excel:

$$X_1 = X_2 = 10; X_3 = 5.$$

Данное решение соответствует активности катализатора на уровне  $Y = 95,4$  %.

Таким образом, расчетный оптимальный состав катализатора, масс. %: кобальт – 10, марганец – 10, медь – 5.

### Выводы

1. Предложен статистический метод определения оптимального состава катализатора для обезвреживания газовых выбросов от оксида углерода и углеводородов.

2. Предложенный метод основан на использовании непараметрических статистических методов анализа, в силу чего достоверность решения оптимизационной задачи не зависит от вероятностного закона случайных величин.

### Список литературы

1. Серета Б. П. Нові матеріали в металургії [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.] / Б. П. Серета. – Запоріжжя : ЗДІА, 2009. – 392 с.
2. Получение интерметаллических катализаторов глубокого окисления СО и углеводородов / В. Н. Санин, Д. Е. Андреев, Е. В. Пугачева [и др.] // Неорганические материалы. – 2009. – № 45(7). – С. 1–8.
3. Кожемякин Г. Б. Стратегия обеспечения качества воздуха в Европейском союзе и Украине / Г. Б. Кожемякин, К. В. Белоконов, В. Р. Румянцев // Охорона

навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України: матеріали VII Всеукр. наук.-практ. конф., (15 груд. 2011 р., Запоріжжя) : зб. статей. – Запоріжжя : ЗДІА, 2011. – С. 10–13.

4. Белоконь К. В. Оптимизация состава интерметаллидного катализатора для окисления углеродсодержащих компонентов промышленных газов / К. В. Белоконь, Ю. А. Белоконь // Еколого-правові та економічні аспекти екологічної безпеки регіонів : матеріали X Міжнарод. наук.-практ. конф., (20-21 жовт. 2015 р., Харків): зб. статей. – Харків : ХНАДУ, 2015. – С. 14–16.

5. Серeda Б. П. Влияние состава никель-алюминиевого сплава с добавками Со, Мп и Си на структуру и удельную активность катализатора на их основе / Б. П. Серeda, Г. Б. Кожемякин, В. Г. Рыжков [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. трудов. – Дн-вск : ПГАСА, 2009. – Вып. 48. – С. 101–104.

6. Проскурнін О. А. Прогнозування впливу техногенного забруднення на довкілля методом непараметричного регресійного аналізу: автор. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.01 "Екологічна безпека" / О. А. Проскурнін. – Харків, 2007. – 22 с.

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНОЙ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ СРЕД ОТ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ

*Гаращенко А.В., Гаращенко В.И., Лукьянчук А.П.*

*Национальный университет водного хозяйства и природопользования,  
г. Ровно, Украина*

## **Аннотация**

В статье приведены результаты исследований новой пластинчатой перфорированной загрузки магнитных фильтров. Установлены зависимости влияния концентрации примесей железа на коэффициент осаждения, длину слоя намагниченной пластинчатой загрузки.

Ключевые слова: очистка водной среды, ферромагнитные примеси, пластинчатая загрузка, магнитный фильтр.

## **Введение**

В технологии изготовления металлопроката в больших количествах используются оборотные воды для гидросбива окалины, охлаждения рольганга и прокатного листа. Установлено, что эти воды обогащены частицами окалины, образующейся в процессе горячей прокатки. Ее грубодисперсная фракция осаждается в открытых отстойниках, а мелкодисперсная – циркулирует в оборотной схеме. После отстойников концентрация окалины превышает норму в 8 – 10 раз.

## **Анализ последних исследований**

Исследованиями установлено, что диспергированная окалина обладает ферромагнитными свойствами, что позволяет для ее удаления использовать энергоэффективные магнитные фильтры с ферромагнитной фильтрующей загрузкой, в объеме которой создается магнитное поле с высокой степенью неоднородности [1]. Создаваемые магнитные силы захвата частиц окалины (или других феррочастиц) значительно превосходят силы захвата в традиционных фильтрующих загрузках, при этом скорость фильтрования возрастает в 5 – 10 раз. В точках контакта намагниченных феррогранул создается магнитное поле с градиентом  $1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{14} \text{ A}^2/\text{м}^3$ . Такая технология позволяет очищать жидкие, в том числе химически агрессивные, среды с температурой до 500°C, скоростью фильтрования до 1000 м/ч и больше

Для эффективной магнитной очистки необходимо выполнение условия [2]:

$$F_M > F_C, \quad (1)$$

где  $F_M$  – сила магнитного осаждения;  $F_C$  – сила сопротивления водной среды (сила Стокса).

Другие силы (сила тяжести, выталкивающая, инерциальная сила) для частиц, размеры которых составляют  $\sim 5 - 10$  мкм, на несколько порядков меньше по сравнению с магнитной силой осаждения. На основе теоретических расчетов сил  $F_m$  и  $F_c$  условие (1) запишется:

$$\frac{1,33 \cdot 10^{-7} \cdot \chi_T \cdot W \cdot H \text{grad}H}{d \cdot \eta \cdot (V - V_q) \cdot K_q} > 1, \quad (2)$$

где  $\chi_T$  – магнитная восприимчивость частицы;  $\eta$  – динамическая вязкость водной среды;  $V$ ,  $V_q$  – скорости воды и частицы;  $K_q$  – динамический коэффициент формы частицы;  $d$  – диаметр частицы;  $W$  – объем частицы;  $H$  – напряженность внешнего магнитного поля;  $\text{grad}H$  – градиент магнитного поля.

### Цели и задачи исследований

В качестве фильтрующих загрузок в магнитных фильтрах известно использование шаров, цилиндров небольших размеров, стальной и чугунной дроби, сеток, гранул феррита, стержней с рифленой и не рифленой поверхностью [1, 3]. В технологии магнитной очистки возникает задача разработки и использования ферромагнитной полиградиентной загрузки, плотность упаковки которой можно было бы изменять в широком диапазоне в зависимости от среды, подлежащей очистке (слабо или сильноконцентрированной), и от требований, предъявляемых к качеству очистки среды.

### Изложение основного материала

Для магнитной очистки предложена новая ферромагнитная перфорированная полиградиентная пластинчатая загрузка [3, 4]. Основными элементами такой загрузки являются пластины с гранеными отверстиями, которые образованы штамповкой с использованием матрицы (рис. 1, 2). При изготовлении пластин, в отверстиях образуются плоские грани и в зависимости от формы матрицы (трех, четырех, пяти или шестигранной формы) образуется соответствующее количество треугольноподобных лепестков (рис. 2).

Используя геометрию размещения пластин (рис. 2, 3) находим величину плотности  $\Psi$  упаковки пластин:

$$\Psi = \frac{h}{h + r \cdot \cos \frac{\pi}{n} \cdot \sin \gamma}, \quad (3)$$

где  $r = d/2$  – радиус описанной окружности;  $d$  – диаметр описанной окружности;  $h$  – толщина пластины;  $n$  – количество граней отверстия;  $\gamma$  – угол наклона граней.

Угол наклона граней  $\gamma$  из (1) определяем как:

$$\gamma = \arcsin \frac{h(1 - \text{Щ})}{\text{Щ} \cdot r \cdot \cos \frac{\pi}{n}} \quad (4)$$

Пластинчатая перфорированная загрузка позволяет путем изменения геометрических параметров  $h$ ,  $d$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  (рис. 3), устанавливать необходимую величину плотности Щ и плотность  $n$  контактов граней со смежными пластинами, которые обеспечивают необходимый уровень очистки жидкой среды от ферромагнитных примесей.

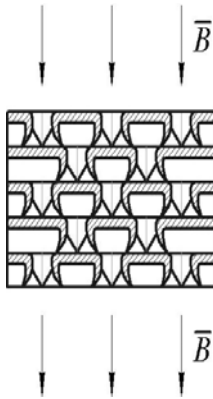


Рис. 1. Схема пластинчатой перфорированной загрузки

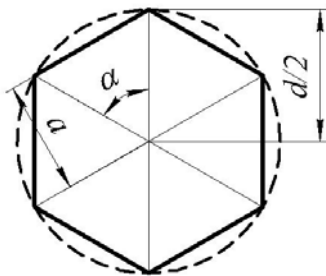


Рис. 2. Схема образования граней в перфорированных пластинах

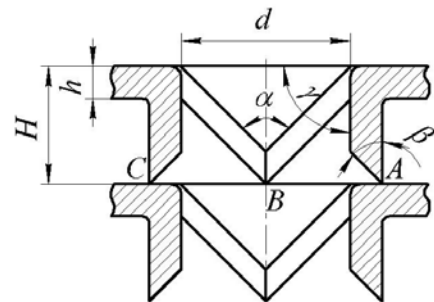


Рис. 3. Зоны (А, В, С) высокой неоднородности магнитного поля ( $H\text{grad}H$ ) в перфорированной загрузке

Изменяя параметры пластин  $n$ ,  $d$ ,  $\alpha$ ,  $h$  при  $\gamma = \pi/2$  величина плотности Щ изменяется в широком диапазоне от 0,28 до 0,93. Расчеты показывают, что для тонкой очистки водной среды величину  $d$  при изготовлении пластинчатой загрузки необходимо устанавливать в пределах 2 ... 4 мм, а величину  $h$  – 4...6 мм.

Величина плотности Щ при  $d = 2 - 4$  мм и  $h = 4 - 6$  мм достигает 0,8 – 0,9. При очистке сильно концентрированных водных сред (суспензий), как показали результаты опытов плотность упаковки рационально устанавливать 0,1 – 0,4, соответственно величины  $n$ ,  $d$ ,  $\gamma$ ,  $h$  устанавливаются таким образом, что величина плотности Щ соответствует указанному диапазону.

На величину Щ существенно влияет угол наклона  $\gamma$  граней отверстий пластин загрузки. При  $n = 3$ ,  $h = 2$  мм,  $d = 6$  мм и изменении  $\gamma$  от 5 до 90°, величина Щ изменяется от 0,94 до 0,57.

Для исследования магнитно-сорбционных свойств пластинчатой перфорированной загрузки использовали водный раствор магнетита. Цилиндрическую колонку экспериментальной установки заполняли пластинчатой загрузкой плотностью 0,112, внешнее магнитное поле создавали секционным соленоидом. Высоту слоя намагниченной загрузки изменяли от 0,1 до 0,45 м (рис. 4а). Напряженность  $H$  внешнего

магнитного поля устанавливали – 52 кА/м, скорость фильтрования – 100 м/ч. Из рис. 4б видно, что при  $L = 0,2$  м коэффициент осаждения  $\psi$  достигает величины 0,82, и при увеличении величины  $L$  до 0,45 м коэффициент  $\psi$  практически не изменяется.

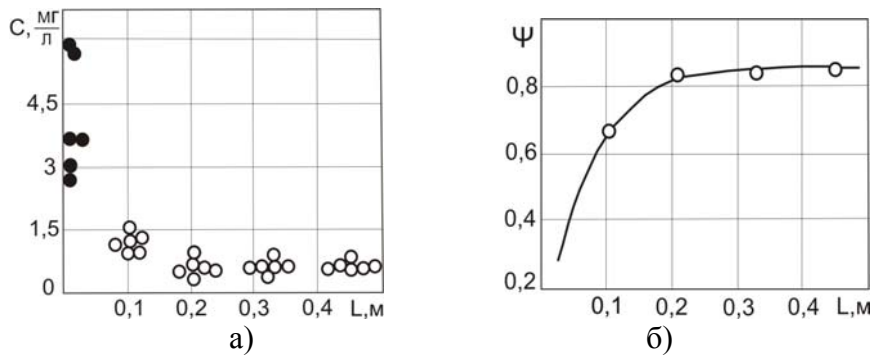


Рис. 4. Зависимость концентрации железа (а) и коэффициента очистки (б) от длины слоя намагниченной пластинчатой загрузки (водный раствор магнетита):  $\Psi = 0,112$ ,  $V = 100$  м/ч,  $H = 52$  кА/м.  
 (●, ○ - концентрация железа до и после очистки)

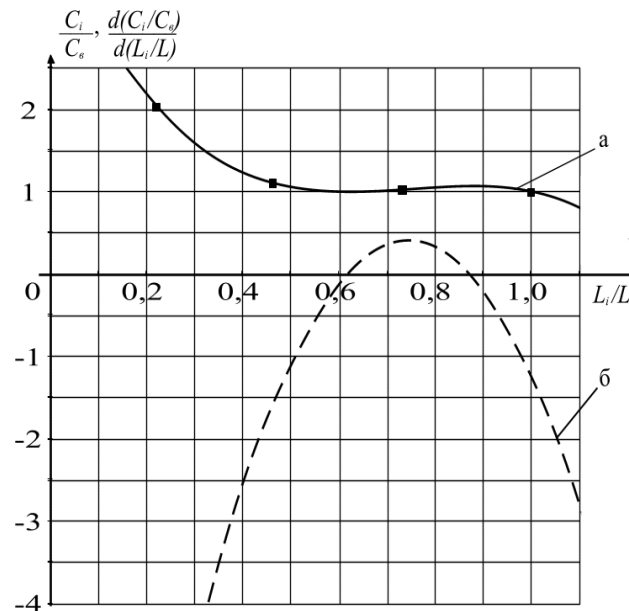


Рис. 5. Кривая кинетики (а) и дифференциальная кривая (б) магнитной очистки водной суспензии магнетита от железа в намагниченной пластинчатой перфорированной загрузке:  
 $\Psi = 0,112$ ,  $V = 100$  м/ч,  $H = 52$  кА/м

Кривая кинетики (рис. 5а) магнитного осаждения примесей железа по высоте слоя намагниченной пластинчатой загрузки показывает, что величина  $C_i/C_B$  интенсивно изменяется при изменении величины  $L_i/L$  в 0,45 – 0,5, а зона максимального осаждения примесей (рис. 5б) соответствует величине  $\frac{d(C_i/C_B)}{d(L_i/L)} = 0,4172$ , при  $L_i/L = 0,7435$  и  $C_i/C_B = 1,0356$ . Величина  $L_i$  при этом имеет значения – 0,3345 м, а ко-

эффицент осаждения  $\psi = 0,84$ . Фронт зоны максимального осаждения примесей при вышеприведенных параметрах имеет координаты  $(0,62 - 0,88)$  (рис. 5б) и смещен в зону  $L_i > 0,5L$

Обработка результатов опытов, изображенных на (рис. 5а, б) позволила аппроксимировать кривые в виде уравнений (5) и (6).

$$C_i/C_B = -8,4518 \cdot (L_i/L)^3 + 18,8525 \cdot (L_i/L)^2 - 13,6002 \cdot (L_i/L) + 4,1996 \quad (5)$$

$$\frac{d(C_i/C_B)}{d(L_i/L)} = -25,3554 \cdot (L_i/L)^2 + 37,705 \cdot (L_i/L) - 13,6002 \quad (6)$$

$$\max \frac{d(C_i/C_B)}{d(L_i/L)} = 0,4172 \quad (7)$$

$$L_i/L = 0,7435 \quad (8)$$

$$C_i/C_B = 1,0356 \quad (9)$$

Коэффициент корреляции составляет 0,999. Кривая кинетики и дифференциальная кривая (рис. 5а, б) характеризует процесс осаждения примесей железа по высоте  $L_i/L$  слоя намагниченной пластинчатой загрузки, из которых видно, что в начальный момент времени основная масса примесей железа осаждается в первых слоях пластинчатой насадки, а максимальная емкость поглощения насадкой примесей приходится на зону  $L_i/L = 0,7435$  и  $C_i/C_B = 1,0356$  (рис. 5б).

### Выводы

Пластинчатая перфорированная загрузка магнитных фильтров с исследованными параметрами может эффективно использоваться для очистки технологических, сточных водных сред предприятий тепловой, атомной энергетики и металлургии от ферромагнитных примесей. Установлены зависимости влияния концентрации примесей железа на коэффициент осаждения, длину слоя намагниченной пластинчатой загрузки.

### Список литературы

1. Сандуляк А. В., Гаращенко В. И. Электромагнитные фильтр-осадители : Монография. – Львов : Вища школа, 1982. – 70 с.
2. Гаращенко В. И. Теоретичні основи процесу осадження магнітних домішок в намагнічених феромагнітних загрузках / В. І. Гаращенко, О. В. Гаращенко, О. О. Лебедь та ін. // Вісник НУВГП. Серія «Технічні науки», Рівне, НУВГП. – 2014. – № 1 (65). – С. 118–124.
3. Гаращенко В. І., Скрипник І. Г., Лук'янчук О. П., Гаращенко О. В. Магніто-сорбційні властивості гранульованих фільтруючих насадок // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2008. – № 3. – С. 184–191.
4. В. И. Гаращенко, А. В. Сандуляк, И. В. Волков. Магнитный железотделитель // А.С.1152618 СССР „МКИ” В01D35/06. – № 3665227/23-26; заявл. 17.11.83; опубл. 30.04.85, бюл. № 16.

# РАДОНОВА НЕБЕЗПЕКА НА ДНІПРОПЕТРОВЩИНІ

*Іванов І.І., Бабенко Л.В., Саввін О.В.*

*Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

## Анотація

Розглянуто роль радону в радіоактивному опроміненні населення, джерела його виділення та фактори, що зумовлюють накопичення радону у приміщеннях. Проаналізовані регіональні особливості формування доз опромінення від радону і його дочірніх продуктів розпаду на Дніпропетровщині та шляхи зниження радонової небезпеки.

Ключові слова: радон, радіоактивність, дочірні продукти розпаду, доза опромінення, ексхалатія, протирадонові заходи.

## Вступ

За даними ООН в опроміненні людства частка впливу продуктів різних випробувань становить 0,7 %, від роботи АЕС – 0,3 %, при медичних обстеженнях – 34 %, природних чинників – 22 %, а продуктів розпаду радону – 43 %.

Міжнародним агентством з дослідження раку радон віднесений до канцерогенів I класу [1]. У Великобританії щорічно гинуть біля 2500 чоловік від раку легенів, викликаного радоном; в США щорічно близько 20 тис. онкологічних захворювань ініціюється радоном і продуктами його розпаду. Радонове випромінювання займає шосте місце серед причин смерті від раку; серед причин, що викликають рак легенів, радон на другому місці після паління [2]. Проблема впливу радону на населення гостро стоїть і в Україні.

## Постановка задачі

Радон – газ без кольору, смаку і запаху, в 7,5 разів важчий за повітря. При розпаді торію 232 утворюється  $^{220}\text{Rn}$  (торон), а з урану 238 –  $^{222}\text{Rn}$ , який за опроміненням в 20 разів небезпечніший за торон. З радону утворюються короткоживучі дочірні продукти Po 218, Pb 214, Bi 214 з періодами напіврозпаду відповідно 3,1; 26,8; 19,1 хв. Вдихання цих речовин призводить до опромінення тканин легенів людини та утворення ракових клітин.

Радон виділяється з ґрунту в місцях геологічних розломів, шахт, з матеріалу стін, питної води, природного газу, при спалюванні кам'яного вугілля. Природними джерелами підвищеного надходження радону є родовища уранових руд, радіоактивних сланців, фосфоритів, торієвих пісків, радонових мінеральних джерел. У граніті та щебені з нього, туфі, червоній цеглі, відходах виробництва алюмінію, доменному шлаку, золь-

ному пилу, фосфогіпсі вміст радону перевищує нормативний. До 1 % населення Землі споживає воду з концентрацією радону більше 1 млн. Бк/м<sup>3</sup>, 10 % – більше 100 тис. Бк/м<sup>3</sup>, в той час як середній вміст радону в повітрі приземної атмосфери становить приблизно 3,7 Бк/м<sup>3</sup>.

Радон накопичується в погано провітрюваних приміщеннях, підвалах, напівпідвалах, в підземних переходах, на нижніх поверхах будівель. Так, його вміст в приміщеннях в 4 – 6 разів вище, ніж в зовнішньому повітрі, а в підвалах – в 8 – 25 разів. Від ґрунту під будинком і будівельних матеріалів до житла надходить 70-80% радону; з повітря – 15 – 20 %; з води – 5 – 10 %; з продуктами згорання – до 10 %.

За даними [3] середня тривалість життя в Дніпропетровській області є самою низькою в Україні після ураженої радіацією Житомирської області і свій негативний внесок у цю ситуацію вносить радоновий фактор. Тому задача аналізу регіональних особливостей формування доз опромінення від радону і його дочірніх продуктів розпаду, вивчення шляхів зниження радонового ризику, що вирішується в даній роботі, є вкрай актуальною.

### **Результати досліджень**

Третина території України знаходиться в межах Українського щита, складеного магматичними і осадовими породами з підвищеним вмістом урану, торію і радію. Тому найбільш високі рівні радону спостерігаються в Житомирській, Вінницькій, Кіровоградській, Запорізькій, Дніпропетровській та інших областях. Крім того, значна частина території Дніпропетровської області забруднена відходами видобутку та переробки уранових руд, на ній розташовані захоронення джерел іонізуючого випромінювання [4].

Місто Дніпро розташоване, особливо в своїй правобережній частині, на гранітному плато, що є потужним джерелом виділення радону. Він проникає в приміщення через пори і тріщини земних порід, ґрунту, будівельних конструкцій. 31 % території міста відноситься до I категорії радонової небезпеки ( $q_{\text{ексх.гр}} \leq 25 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ), 36% – до II категорії ( $q_{\text{ексх.гр}}$  від 25 до 50 мБк/(м<sup>2</sup>·с)) і 34 % – III категорії ( $q_{\text{ексх.гр}}$  від 50 до 75 мБк/(м<sup>2</sup>·с)). Для будівництва використовувалися конструкції, облицювальний камінь і щебінь, в основному, з Томаківського кар'єру, з підвищеною радіоактивністю. У результаті радіаційний фон у місті підвищився до 24 мкР/год порівняно з природним 7 – 15 мкР/год [5,6].

В м. Кривий Ріг багато будинків розташоване над старими шахтними виробками, які є накопичувачами радону. Вибухи при відкритому видобутку залізної руди призводить до утворення тріщин в ґрунті і фундаменті будівель. Це сприяє надходження радону в підвали і по вентиля-

ційній системі в приміщення. Середній вміст радону на перших поверхах становить  $143 \text{ Бк/м}^3$ ; максимальні значення –  $820 - 980 \text{ Бк/м}^3$ . На верхніх поверхах будинків середні концентрації радону  $15 - 20 \text{ Бк/м}^3$ ; максимальні –  $200 - 300 \text{ Бк/м}^3$ .

В м. Кам'янське виявлено перевищення нормативних рівнів радону в кілька разів. Тут на ВО "Придніпровський хімічний завод" здійснювалася переробка уранової руди і було утворено 9 хвостосховищ площею  $2,68 \text{ млн. м}^2$ , у яких накопичено біля 42 млн. тонн радіоактивних відходів загальною активністю  $3,14 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$  [2]. З них в атмосферу щорічно потрапляє  $2,13 \cdot 10^{13} \text{ Бк}$  радону та 23,9 тонн радіоактивного пилу із середньою питомою активністю  $3,7 \text{ кБк/кг}$  [3]. Щільність потоку радону з поверхні, наприклад, хвостосховища «Дніпровське» досягає  $2580 \text{ мБк/(м}^2 \cdot \text{с)}$ , а сховища "ДП-6" – до  $21200 \text{ мБк/(м}^2 \cdot \text{с)}$  [7].

Середня величина ексхаляції радону в м. Жовті Води становить  $13 \text{ мБк/(м}^2 \cdot \text{с)}$  [8], його об'ємна активність в атмосферному повітрі –  $217 \div 364 \text{ Бк/м}^3$ . Поблизу міста розташовані родовища уранових руд; переробка їх на гідрометалургійному заводі супроводжується накопиченням радіоактивних відходів в хвостосховищах. Вміст радону  $50 \text{ Бк/м}^3$  спостерігається тут в 27 % приміщень;  $100 \text{ Бк/м}^3$  – в 34 %; в значній частині будівель його концентрація перевищує допустимий рівень  $100 \text{ Бк/м}^3$  і в окремих приміщеннях досягає  $6000 - 10000 \text{ Бк/м}^3$  [9]. Найбільш радононебезпечна східна частини міста характеризуються підвищеним рівнем захворювання населення [10]. Більш благополучна ситуація в західній частині міста: перевищення нормативу  $100 \text{ Бк/м}^3$  становить близько 5 % при максимальному значенні  $269 \text{ Бк/м}^3$  у для житлових приміщеннях і  $94 \text{ Бк/м}^3$  в адміністративних [11].

У 2009 р. опубліковано «Керівництво ВООЗ щодо радону всередині приміщень», в якому дано рекомендації та варіанти щодо зниження радонової небезпеки житлових і виробничих приміщень [12].

Шляхи зниження концентрації радону в приміщеннях - використання будівельних матеріалів з малою радіоактивністю, якісне зведення будівель, закладення щілин в підлозі і стінах, ізолювання підвальних приміщень від ґрунту, покриття стін фарбою на епоксидній основі та трьома шарами масляної фарби, витяжка продуктів згоряння побутового газу.

Важливим є забезпечення вентиляції: навіть однократний повітрообмін упродовж 1 години знижує концентрацію радону майже на два порядки [1]. Обклеювання стін шпалерами зменшує швидкість еманации радону на 30 – 35 %. Для зменшення надходження радону із ґрунту в приміщення першого поверху слід встановлювати протирадоновий захисний екран з поліетиленової плівки поверх фундаменту. Надходження радону у приміщення залежить від товщини і цілісності міжповерхового перек-

риття: плита товщиною 220 (300) мм зменшує його вміст у приміщеннях третього поверху житлового будинку на 73 – 89 % [13].

Норми радіаційної безпеки України [9] встановлюють гігієнічний норматив на рівень дії для  $^{222}\text{Rn}$  в джерелах господарсько-питного водопостачання 100 Бк/л. Способом зниження концентрації радону у питній воді є її кип'ятіння. Для споживачів міської водопровідної мережі проблеми радону не існує, оскільки він видаляється шляхом аерації при водопідготовці на очисних спорудах. Для води з індивідуальних свердловин застосування фільтрів на основі активованого вугілля дозволяє видалити до 99,7 % радону.

### Висновки

Радон, що виділяється з природних та техногенних джерел, є основним дозоформуєчим чинником опромінення населення. Його накопичення в приміщеннях залежить від геологічної будови території, особливостей конструкції будівель, будівельних матеріалів, води.

В промислових центрах Дніпропетровщини спостерігаються аномалії, де вміст радону перевищує нормативи в десятки і сотні разів. Для розробки та здійснення заходів з радонобезпеки необхідна паспортизація будівель, інформаційно-роз'яснювальна робота серед населення щодо природи виділення радону, його впливу на організм, можливих шляхів зниження рівня радонової небезпеки.

### Список літератури

1. Жук Л. В. Проблема радонового ризику в екології / Л. В. Жук, В. О. Васійчук, В. Є. Гончарук, С. І. Качан // Екологічна безпека та природокористування : Зб. наук. пр. – К., 2013. – Вип. 12. — С. 43–50.
2. Комов И. Л., Кулиш Е. А., Вовнянко Е. К и др. Основные проблемы радоновой безопасности. – К. : Логос, 2004. – 351 с.
3. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області за 2015 рік. – Дніпропетровськ. – 2016. – 255 с.
4. Кіреєва І. С. Містобудівні та санітарно-гігієнічні аспекти планування території Дніпропетровської області / І. С. Кіреєва, В. М. Махнюк, М. О. Лопотюк, В. Г. Муха // Гігієна населених місць. – 2013. – № 61. – С. 22– 35.
5. Екологія мегаполіса. Екологічні аспекти промислового розвитку Дніпропетровська / І. І. Куліченко, О. С. Ливенко, А. Г. Шапар [та ін.]. – Дніпропетровськ : ІМА-прес, 2002. – 368 с.
6. Долина Л. Ф. Моніторинг радіоактивності студентського містечка ДНУЗТ / Л. Ф. Долина, В. П. Кільовий, Д. В. Астахов, М. В. Калимбет // Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ. – 2016. – № 3(63). – С. 48–58.
7. Коваленко Г. Д., Дурасова Н. С. Оцінка радіаційної небезпеки хвостосховищ Придніпровського хімічного заводу для населення. Ядерна та радіаційна безпека. – 2015. – №3 (67). – С. 49–53

8. Севальнев А. И., Костенецкий М. И., Торгун В. П., Куцак А. В. Радон: радіаційна безпека і методи захисту. Навчальний посібник Запорізький державний медичний університет. – Запоріжжя, 2009. – 88 с.
9. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). – К. : Міністерство охорони здоров'я, 2001. – 135 с.
10. Сорока Ю. Н., Молчанов А. И., Павленко, Сорока М.Н. Результаты изучения радиационной обстановки в жилых помещениях города Желтые Воды // Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов / Труды XIII международной научно- практической. конференции, г. Щелкино, 6–10 июня 2005 г. – Харьков, Том 1. – 2005. – С .28–34.
11. Молчанов А. И., Сорока Ю. Н., Руденко С. А., Сорока М. Н. Комплексные исследования радиационной обстановки в жилых и административных помещениях г. Желтые Воды. Збірник наукових праць НГУ. – Д. : ДВНЗ НГУ. – 2015. – № 47. – С. 161–165
12. WHO handbook on indoor radon. World Health Organization. Geneva. – 2009. – 184 p.
13. Беликов А. С. К вопросу обеспечения радиационной безопасности жилищного строительства / А. С. Беликов, О. С. Гупало, Г. Г. Капленко, О. М. Климова // Вісник ПДАБтаА. – 2009. – № 1. – С. 38–44.

# ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПІРОЛІЗУ ЗНОШЕНИХ ШИН

*Коломієць О.В., Буличов В.В.*

*ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»,  
м. Дніпро, Україна*

## **Анотація**

В даній роботі проведено кінетичний аналіз реакцій піролізу шинної гуми (основної складової частини – каучука, частка якого в гумі до 70 %). Для прийнятого механізму піролізу, було отримано: оптимальна температура проведення процесу – 720 °С, Процентний склад отриманого газу  $C_2H_4 = 2,1\%$ ;  $C_3H_6 = 8,1\%$ ;  $C_2H_2 = 0,016\%$ ;  $CH_4 = 20,875\%$ ;  $C_4H_5 = 24,375\%$ ,  $C_3H_8 = 3,3\%$ ,  $H_2 = 18\%$ ; теплотворна здатність отриманого газу – 31,14 МДж/м<sup>3</sup>. Розходження з такими компонентами піролізного газу як  $CH_4$ ,  $C_3H_8$ ,  $H_2$  не перевищило 1,6 %.

Ключові слова: піроліз, кінетичний аналіз, шинна гума.

## **Вступ**

За прогнозами Конференції ООН по навколишньому середовищу і розвитку (Ріо-де-жанейро, 1992), об'єм твердих відходів до 2025 г. виросте в 4 – 5 разів. Загальносвітові запаси зношених автошин оцінюються від 25 до 39 млн. т. при щорічному прирості не менше 7 млн. т.

Шини, що вийшли з експлуатації є джерелом тривалого забруднення навколишнього середовища:

- шини не піддаються біологічному розкладанню;
- шини вогнебезпечні і, у разі спалаху, погасити їх достатньо складно;
- при складуванні вони є ідеальним місцем розмноження гризунів, кровосасальних комах і служать джерелом інфекційних захворювань.

В наш час у світі використовують цілий ряд технологій по переробці та утилізації відходів гуми та зношених шин, основні з яких наведено в таблиці 1.

Тобто в нашій країні 75 % шин вивозиться на звалища, хоча амортизована шина є цінною вторинною сировиною, що містить 45 – 55 % гуми (каучук), 25 – 35 % технічного вуглецю, 10 – 15 % високоякісного металу. Економічно ефективна переробка автошин дозволить не тільки розв'язати екологічні проблеми, але і забезпечити високу рентабельність перероблювальних виробництв. Багато розвинених країн готові оплачувати сам факт утилізації автомобільних покришок з розрахунку: 150 – 400 EUR за 1 тонну. Найбільш рентабельним способом переробки автомобільних шин, є

піроліз. Цільовий продукт піролізу – газ, багатий неграничними вуглеводнями: етиленом, пропиленом, бутадієном.

Таблиця 1

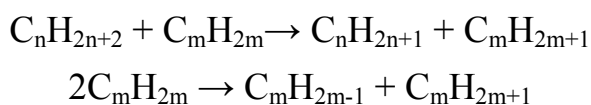
Способи утилізації шин в різних країнах [1]

	Спалення, %	Переробка в сировину, %	Відновлення, %	Вивіз на звалища, %
США	23	10	-	67
Японія	43	12	9	36
Німеччина	38	15	18	39
Великобританія	9	6	18	67
Європейський Союз	30	-	20	50
Україна	10	5	10	75

### Постановка задачі

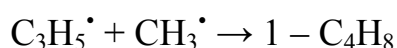
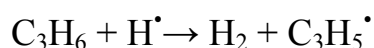
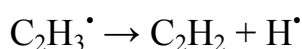
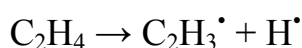
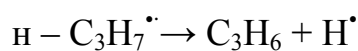
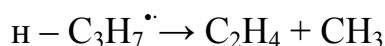
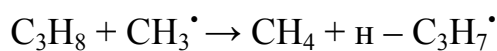
Згідно з [2] основними складовими гумової суміші є: каучук, сажа, кремнієва кислота, масла і смоли, сірка, екологічні наповнювачі.

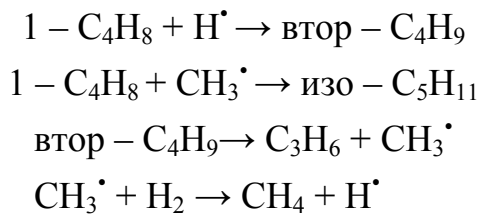
В якості стадій ініціювання при піролізі можуть виступати бімолекулярні реакції диспропорціювання за участю ненасичених вуглеводнів, наприклад:



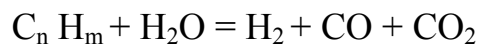
При піролізі ці реакції конкурують з мономолекулярними процесами розпаду. При термічному розкладі насичених вуглеводнів вони грають роль в процесах самоприскорення, створюючи при певних глибинах перетворення додаткове джерело радикалів. Вклад цієї реакції повинен збільшуватись зі степенями перетворення, оскільки етилен та інші ненасичені вуглеводні є основними продуктами піролізу [3].

Припускаємо, що процес піролізу проходить за реакціями [3, 4, 5]:





Згідно прийнятого механізму проходження процесу, на виході з реактору ми отримуємо газ, складовими якого будуть:  $\text{C}_4\text{H}_5$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{изо} - \text{C}_5\text{H}_{11}$ , та, звичайно, деяка доля домішок, що утворюються з радикалів,  $\text{CO}$  і  $\text{CO}_2$ , що утворюються в результаті реакції вуглеводнів з вологою що містилася в гумі та випарувалася при нагріванні, сірка, та інше.



Для знаходження теплотворної здатності отриманої суміші просумуємо теплотворні здатності окремих компонентів, згідно з їх часткою в суміші:

$$Q_{H.CM}^P = \sum Q_{H.C_nH_m}^P \cdot g_{C_nH_m},$$

де  $\text{C}_n \text{H}_m$  – складові піролізного газу, %;  $g_{\text{C}_n \text{H}_m}$  – доля даного компоненту в суміші.

Скористаємося формулою Менделєєва, щоб розрахувати теплотворну здатність компонентів суміші, для яких не маємо табличних даних:

$$Q_H^P = [418 : M][81 \text{ C} + 246 \text{ H} + 26 (\text{S} - \text{O})], \text{ кДж/кг}$$

де  $\text{C}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}$  – маси вуглецю, водню, сірки і кисню;  $M$  – молекулярна маса сполуки.

$$M = a \cdot C + b \cdot H,$$

де  $a$ ,  $b$  – кількість атомів  $\text{C}$  і  $\text{H}$  у сполуці;  $\text{C}$ ,  $\text{H}$  – молярна маса  $\text{C}$  і  $\text{H}$  відповідно.

### Вирішення поставленої задачі

За допомогою математичного моделювання кінетики хімічних реакцій, наведених вище, з використанням підходу, який базується на законі Ареніуса, детально описаного в [6] було проведено кінетичний аналіз процесу та за допомогою методу сканування отримано наступні результати: максимальний вихід  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2$  спостерігається при температурі  $720^\circ\text{C}$ ,  $\text{C}_4\text{H}_5$  – при  $770^\circ\text{C}$ ,  $\text{CH}_4$  – при  $1270^\circ\text{C}$ . Теплотворна здатність отриманого газу при температурі  $720^\circ\text{C}$  склала  $31,14 \text{ МДж/м}^3$ , при  $770^\circ\text{C}$  –  $26,7 \text{ МДж/м}^3$ , при  $1270^\circ\text{C}$  –  $25,58 \text{ МДж/м}^3$ . Тобто оптимальною є температура  $720^\circ\text{C}$ .

На рис. 1 наведено Зміна концентрації  $\text{C}$ ,  $\text{H}_2$  та  $\text{CH}_4$  в залежності від зміни температури витримки газової суміші. На рис. 2 наведено

приблизний процентний склад піролізного газу з рекламних буклетів фірм-виробників обладнання для піролізу шинної гуми та отриманого в результаті розрахунків.

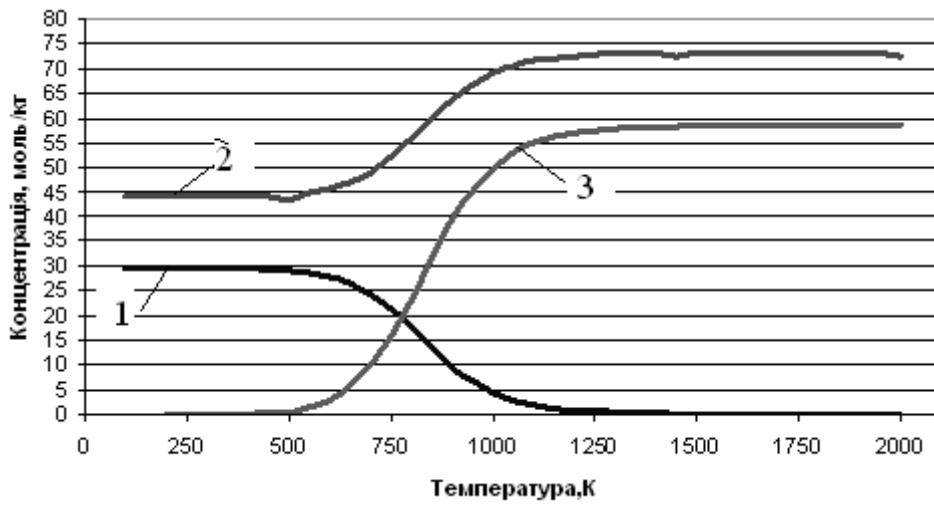


Рис. 1. Зміна концентрації CH<sub>4</sub> – 1, C – 2, , H<sub>2</sub> – 3 в залежності від зміни температури витримки газової суміші

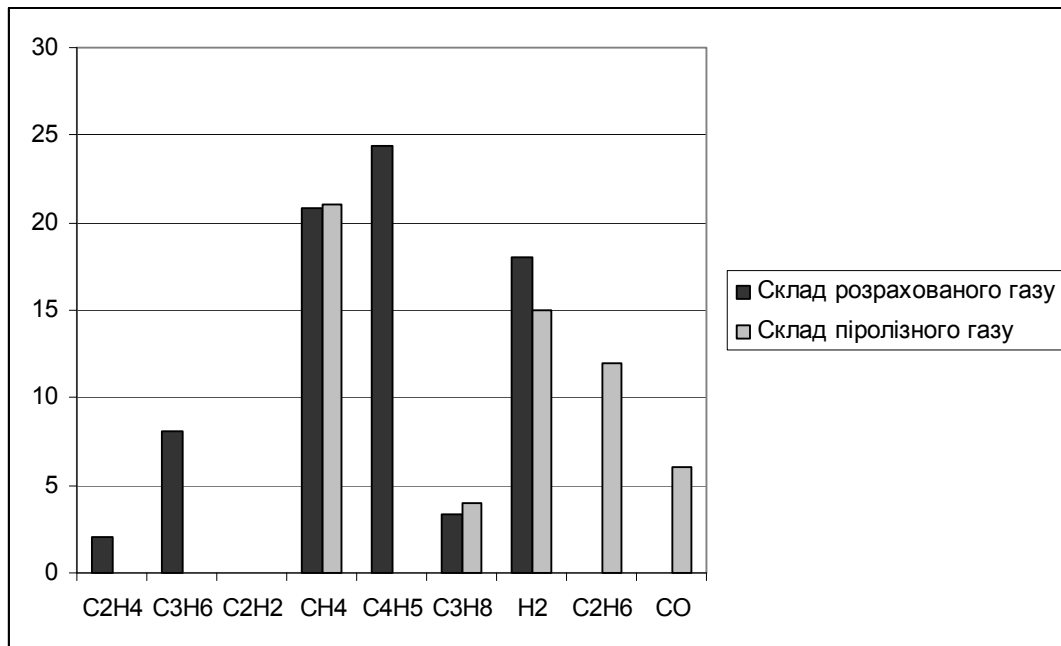


Рис. 2. Приблизний процентний склад піролізного газу та отриманого в результаті розрахунків

Тобто, отриманий нами газ має розходження з складом піролізного газу по H<sub>2</sub> – 1,6 %, по C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> – співпадає повністю, CH<sub>4</sub> – 1,08 %. Це свідчить про те, що даний алгоритм реалізовано правильно і написана за цим алгоритмом програма є адекватною.

Неспівпадіння результатів по  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  може бути викликано рядом причин:

1. В даній роботі проаналізовано лише реакції розкладу каучуку, що є основною складовою частиною шинної гуми (50 – 70 %);
2. Різний склад гумової суміші в різних виробників;
3. Часом перебування гуми в реакційній камері;
4. Температурою проведення процесу;
5. В даній роботі не розглядалася реакція отримання  $\text{CO}$  та  $\text{H}_2$ , а також реакції з парами  $\text{H}_2\text{O}$ ;
6. Механізм піролізу недостатньо вивчений.

Отримані результати перевірено також шляхом реалізації зворотного алгоритму, тобто в якості вихідних даних було введено отримані в результаті роботи даного алгоритму концентрації вихідних речовин, а після розрахунку – початкові концентрації речовин  $\text{C}_5\text{H}_8$  та  $\text{C}_3\text{H}_8$ . Розходження результатів не перевищило 0,01 %.

### Висновки

Для прийнятого механізму піролізу, було отримано: оптимальна температура проведення процесу – 720 °С, Процентний склад піролізного газу  $\text{C}_2\text{H}_4 = 2,1\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_6 = 8,1\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_2 = 0,016\%$ ;  $\text{CH}_4 = 20,875\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_5 = 24,375\%$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8 = 3,3\%$ ,  $\text{H}_2 = 18\%$ ; теплотворна здатність отриманого газу – 31,14 МДж/м<sup>3</sup>. Розходження з такими компонентами піролізного газу як  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{H}_2$  не перевищило 1,6 %.

### Список літератури

1. Сасов А. А. Перспективы развития в Украине технологий переработки изношенных автомобильных и тракторных шин / Сасов А. А., Скорняков Э. С., Коробочка А. Н., Рудасев В. Б. / Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – 2009. – № 2(9).
2. Рагулин В. В. Технология шинного производства [текст] / В. В. Рагулин. – М. : Высшая школа, 1977. – 216 с.
3. Ямпольский Ю. П. Элементарные реакции и механизм пиролиза углеводородов [текст] / Ю. П. Ямпольский. – М. : Химия, 1990. – 216 с.
4. Гориславец С. П. Пиролиз углеводородного сырья [текст] / С. П. Гориславец, Д. Н. Гомеров, В. Н. Майоров. – К. : Наукова думка, 1977. – 309 с.
5. Мухина Т. Н. Пиролиз углеводородного сырья [текст] / Т. Н. Мухина [и др]. – М. : Химия, 1987. – 240 с.
6. Царёва З. М. Основы теории химических реакторов. Компьютерный курс [текст] / З. М. Царёва, Л. Л. Товарняжский, Е. Н. Орлова. – М. : Высшая школа, 1997.

# ДОСЛІДЖЕННЯ СХИЛЬНОСТІ ВОДИ, ЩО ЦИРКУЛЮЄ В ЦИКЛАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ, ДО УТВОРЕННЯ ВІДКЛАДЕНЬ ТА КОРОЗІЇ В УМОВАХ ВАТ МЗ «ДНІПРОСТАЛЬ»

*Мешикова А.Г., Матухно О.В., Кравцов С.В.,  
Сухарева М.В.*

*Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

## **Анотація**

Підвищення ефективності роботи замкнених та оборотних систем водопостачання промислових підприємств є актуальною задачею сьогодення. Рішення її залежить від визначення оптимального режиму роботи контурів з урахуванням процесів корозії та утворення мінеральних відкладень. Проведено дослідження схильності циркулюючої води до утворення корозії та відкладень за допомогою індексів Ланжельє та Різнера для контурів, що існують на підприємстві. Надано рекомендації щодо поліпшення якості води, яка циркулює у контурах, згідно з результатами досліджень показників її якості.

Ключові слова: відкладення, корозія, поліфосфати, нітрити, вапнування.

## **Вступ**

Питанням раціонального використання природних ресурсів приділяють значну увагу все більше виробників промислової продукції. Такий підхід ініціює процеси створення систем замкнутого та оборотного водопостачання в промисловості. Зараз на сучасних підприємствах, яким є ТОВ МЗ «Дніпростааль», оборотне водопостачання – це невід'ємна частина технологічного процесу виробництва. При цьому на підприємстві створюється єдиний комплекс, який об'єднує в собі водопостачання, водовідведення та очищення стічних вод (з метою повторного їх використання та можливої утилізації отриманих відходів). Системи очищення оборотної води орієнтовані на вирішення таких основних проблем, що виникають в системах оборотного водопостачання як утворення накипу та різних відкладень, корозійні процеси і біологічне обростання, забруднення оборотної води солями, продуктами корозії і пилом. Від раціонального вирішення цих проблем залежить ефективність функціонування систем оборотного водопостачання.

Таким чином, очищення оборотної води, що охолоджує і оборотної води, що транспортує домішки, вимагає комплексного підходу. Для видалення з оборотної води накопичених забруднень використовують продування, фізико-хімічні методи, додавання в воду реагентів та біоцидів для корекційної та стабілізаційної обробки, а також мембранні методи часткового або повного знесолення води. Раціональне обрання методів обробки води згідно з умовами конкретного підприємства є актуальною задачею.

## Постановка задачі

Установа, яка існує на підприємстві ТОВ МЗ «Дніпросталь» призначена для очищення і охолодження води, що надходить від об'єднання сталеплавильного цеху і прокатного стану. Тепло, що відводиться водою безперервного оборотного циклу, розсіюється в навколишній атмосфері шляхом самовипаровування в градирнях і в пластинчастих теплообмінниках. Установа в цілому призначається для мінімізації споживання води. З цією метою вода, яка вступає в контакт з виробами і забруднюється окалиною, піддається процесу очищення (освітлення) та скорочуються до мінімуму її втрати.

Установа складається з: безконтактних закритих контурів; безконтактних відкритих контурів; контактних відкритих контурів; аварійного контуру; підживлювального контуру; підводу води зворотного осмосу; обробки осаду.

Метою дослідження є оцінка схильності циркулюючої води до корозії або утворення відкладень та розробка рекомендацій щодо корегування якості води згідно з результатами досліджень.

Оцінка термостабільності води здійснюється за допомогою індекса Ланжельє. Нестабільність розчину призводить або до утворення накипу або до корозії. Формула індекса Ланжельє:

$$pH_s = (pK_2 - pK_s) + pCa + pAlk \quad (1)$$

Розрахунок  $pH_s$  був спрощений підготовкою різних номограм, наведених в довідковій літературі [1, 2].

Для визначення індексу Ланжельє необхідні наступні параметри:  $pH$  (водневий показник) при температурі  $25^{\circ}C$ ; TDS в мг/л або провідність розчину (в  $mS/m$ ), помножена на 7; температура розчину в градусах Цельсія; жорсткість води за карбонатом кальцію ( $Ca^{2+}$ ) в мг/л; лужність за  $HCO_3^{-}$  в мг/л.

Індекс насичення, проте, вимірює тільки тенденцію або рушійну силу води. Він не може бути використаний в якості кількісної міри. Два різних види води, одна із зниженою жорсткістю, і, отже, корозійна, а інша – з підвищеною жорсткістю і, отже, формує накип, можуть мати той же самий індекс насичення.

Розроблений Різнером індекс насичення дає можливість відрізнити два таких види води. Цей індекс заснований на вивченні фактичних результатів з водами, які мають різні індекси насичення.

$$I_c = 2(pH_s) - pNa \quad (2)$$

Значення індексів Ланжельє та Різнера наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Індекс Ланжелъє	Індекс Різнера	Характеристика розчину
3	3	Надзвичайно високе утворення накипу
2	4	Дуже високе утворення накипу
1	5	Високе утворення накипу
0,5	5,5	Тенденція до утворення накипу
0,2	5,8	Легке утворення накипу
0	6	Стабільний розчин
-0,2	6,5	Дуже легка ступінь корозії
-0,5	7	Легка ступінь корозії
-1	8	Тенденція до корозії
-2	9	Дуже висока корозія
-3	10	Надзвичайно висока корозія

### Основна частина досліджень

Оцінювали схильність води до утворення мінеральних відкладень у безконтактних відкритих контурах. Сумарна кількість розчинених речовин, яка знаходиться у воді, що циркулює в контурі – 315 мг/л (за номограмою знаходимо функцію від цієї величини – 0,15).

Максимальна температура води – 50 °С (за номограмою функція від температури дорівнює 1,53). Максимальна кальцієва жорсткість – 100 мг/л (за номограмою функція від жорсткості дорівнює 1,6). Максимальна лужність – 70 мг/л (за номограмою функція дорівнює 1,85). Середнє значення рН циркулюючої води – 8.

$$pH_s = (9,30 + A + B) - (C + D) = (9,30 + 0,15 + 1,53) - (1,60 + 1,85) = 7,5.$$

$$\text{Індекс Ланжелъє: } pH - pH_s = 8 - 7,5 = 0,5.$$

$$\text{Індекс Різнера: } 2pH_s - pH = (2 * 7,5) - 8,0 = \sim 7.$$

В безконтактних закритих контурах заздалегідь підготовлена підживлююча вода використовується тільки для компенсації деяких втрат при заміні насосів і кристалізатора. У зв'язку з цим, пов'язані з корозією проблеми, звичайно ж, є найбільш важливими. Періоди циркуляції води досить тривалі, що може призвести до накопичення продуктів корозії, якщо корозія не регулюється ефективно. В основному обробка завжди націлена на уповільнення процесу корозії; більш того, даний контур дає можливість використовувати матеріали, що вловлюють розчинений кисень, запобігаючи, тим самим, будь-яким реак-

ціям окислення. Для обробки води, яка циркулює в безконтактних закритих контурах пропонується: спільна обробка нітритами і диспергуючими агентами чи обробка води нітритами і спеціальними кремніймісткими реагентами.

Основна проблема, яка пов'язана з безконтактними відкритими контурами, полягає в тому, що оборотна вода концентрується за рахунок випаровування, отже, солі, що містяться в ній, будуть утворювати нерозчинний осад. Саме з цієї причини виникають відкладення, утворення накипу і корозія.

Пропонується використовувати для обробки води комбінацію полімерних фосфонатно-молібдатних диспергаторів, які дозують в продувочну воду, або, комбінацію органічних фосформістких і акрилових інгібіторів, дозованих пропорційно витраті в продувочну воду.

Сумарна кількість розчинених речовин, які знаходяться у воді відкритих контактних контурів – 545 мг/л (за номограмою функція від цієї величини дорівнює 0,17). Максимальна температура води – 50 °С (за номограмою функція дорівнює 1,53). Максимальна кальцієва жорсткість – 180 мг/л (за номограмою функція дорівнює 1,86). Максимальна лужність – 120 мг/л (за номограмою функція від лужності дорівнює 2,08). Середнє значення рН – 8.

$$pH_s = (9,30 + A + B) - (C + D) = (9,30 + 0,17 + 1,53) - (1,86 + 2,08) = 7,06.$$

$$\text{Індекс Ланжельє: } pH - pH_s = 8 - 7,06 = 0,9.$$

$$\text{Індекс Різнера: } 2pH_s - pH = (2 \times 7,06) - 8 = \sim 6,1.$$

У цих контурах в робочому режимі виникає велика кількість проблем внаслідок контакту з забруднюючими речовинами, такими як масла, оксиди заліза, що призводить до збільшення корозії, забруднення неорганічними речовинами і активному біологічному обростанню обладнання. Це призводить до зменшення, а то й до повного блокування надходження потоку води до форсунок з катастрофічними наслідками для характеристик готового продукту.

Для ефективного вирішення вищезазначених проблем рекомендується: контроль над корозією за допомогою інгібіторів на основі поліфосфатів (гексаметафосфату натрію, триполіфосфату натрію); контроль утворення відкладень за допомогою фосфатів широкого спектра дії, що додаються пропорційно витратам продувочної води або, як варіант, можливо додавання тільки одного реагенту.

В контурі конденсатора Індекс Ланжельє дорівнює – 1,1, Індекс Різнера – 10,2.

В контурі конденсатора оборотна вода може викликати проблеми з корозією. Необхідне коригування з використанням відповідних хімічних реагентів для водопідготовки, тому що немає тенденції до утворення накипу.

## Висновки

1. Характер зміни індексу Ланжельє в закритих та відкритих безконтактних контурах в залежності від показників концентрації показує легку схильність води до утворення відкладень в закритих контактних контурах. Індекс Різнера вказує на воду з помірним утворенням накипу. Таким чином, в цих умовах циркулююча вода не викликає проблем з корозією; легка схильність до накипу може бути скорегована за допомогою використання відповідних хімічних реагентів для водопідготовки.

2. Для води безконтактних закритих контурів пропонується спільна обробка нітритами і диспергуючими агентами чи обробка води нітритами і спеціальними кремніймісткими реагентами.

3. Для води відкритих безконтактних контурів пропонується комбінація полімерних фосфонатно-молібдатних диспергаторів, які дозують в продувочну воду або комбінація органічних фосформістких і акрилових інгібіторів, дозованих пропорційно витраті в продувочну воду.

4. Для ефективного вирішення проблем контактних контурів рекомендується проводити контроль над корозією за допомогою інгібіторів на основі поліфосфатів (гексаметафосфату натрію, триполіфосфату натрію) та контроль утворення відкладень за допомогою фосфатів широкого спектра дії, що додаються пропорційно витратам продувочної води або, як варіант, можливо додавання тільки одного реагенту.

## Список літератури

1. Ахметов Н. С. Общая и неорганическая химия / Н. С. Ахметов. – М. : Высшая школа, 2001. – 640 с.

2. Николадзе Г. И. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения / Г. И. Николадзе, Д. М. Минц, А. А. Кастальский. – М. : Высшая школа, 1984. – 368 с.

# ЭВОЛЮЦИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ УГЛЕКИСЛОТНОГО РАВНОВЕСИЯ

Назаренко А.Н., Вольвач И.В., Назаренко И.А.

*Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина*

## Введение

Сосредоточение дымовых и выхлопных газов, выделяющихся на поверхности Земли, на урбанистических территориях вызывают опасение в превышении суммарных концентраций парниковых газов и уменьшении озонового слоя атмосферы. Понимание техногенных процессов и попытка нивелирования загрязняющих выбросов – основная экологическая задача энергетиков предприятий. Анализ источников загрязнений и внедрение зеленых процессов – один из путей энергосбережения на предприятии.

## Актуальность проблемы

Как известно, планета Земля окружена двумя концентрическими оболочками: атмосферой и океанами. Принято считать, что эти оболочки взаимодействуют с прочими оболочками, поверхностными породами и с тонкой пленкой биосферы. Атмосфера и гидросфера взаимодействуют разными формами физических и химических явлений. Вследствие того, что воздух имеет меньшую вязкость, он перемещается быстрее, чем вода. Концентрации редких компонентов, таких как озон ( $O_3$ ), образующиеся под действием ультрафиолетового излучения, и примеси  $SO_2$ ,  $NO_3$ ,  $NH_3$  появляются вследствие технических загрязнений, изменяющихся по величине и розе ветров.

Грозовые явления проявляют следы озона и азота, однако, концентрации их весьма малы. Электрические проявления усиливают проявления органических молекул из неорганических.

Принято считать, что циркуляция вод в реках и влияние диффузионных процессов уравнивают негативные составляющие концентраций загрязнений и условно стабилизируют качество природных вод в створах поверхностного источника. Необходимость поточного учета и постоянного контроля загрязнений свидетельствует о возможности предотвращения рисков явлений.

Концентрация главенствующего радикала как кислород в воде источника также непостоянна. Вследствие изменчивости природы распределения концентрации делаем вывод относительно его содержания в поверхностных источниках. В слое, находящемся около поверхности водоема, в хорошо освещаемом потоке и перемешиваемым ветром, концентрация постоянна, но меняется по сезонам года (табл. 1):

Таблица 1

## Динамика концентрации кислорода по сезонам года

	Зима	Весна	Лето	Осень
Поверхностный слой	12	10	35	24
Зона фотосинтеза	8	6,5	14	12
Глубинный слой	1,5	0,5	5	8

В зонах, где преобладает повышенная концентрация органических веществ, воды имеют более высокую температуру (большая интенсивность процесса окисления), градиент уменьшения концентрации может достигать 1 мг/л на 1 метр высоты.

В тех районах, где воды бедны органическими веществами и имеют пониженную температуру, градиент может быть 0,75 мг/л на 1 метр. Если вода не перемешивается, следует ожидать уменьшения концентрации  $O_2$  с глубиной.

Таблица 2

## Величины колебательных процессов кислорода Днепра

№	Год	Январь	Май	Июнь	Сентябрь
1	2012	27	32	37	39
2	2015	32	33	36	38
3	2016	34	38	33	46

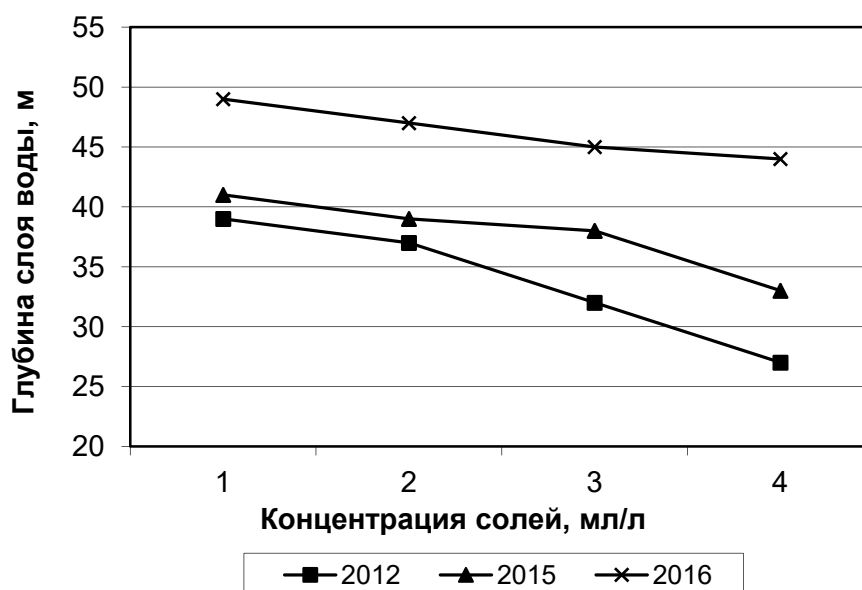


Рис. 1. Годичные колебания концентрационного профиля в водах реки Днепр

Циркуляция вод менее интенсивна вследствие длительного процесса окисления органического вещества. При высокой концентрации питательных веществ содержание кислорода уменьшается.

Углекислотно-карбонатная система постоянно участвует в истории атмосферы, гидросферы планеты. Существует определенный риск в перенасыщении  $CO_2$  в атмосфере при увеличении его концентрации. Содержание растворенного органического углерода достигает около

0,533 г/см<sup>2</sup>, в то время как в реке оно составляет 0,002 г/см<sup>2</sup>. В биосфере суши содержание кислорода составляет 0,06 г/см<sup>2</sup>, в гумусе – 0,19 г/см<sup>2</sup>.

Таблица 3

Растворимость CO<sub>2</sub> в речной воде

φ, %	0	5	10	15	20	25
0	770	641	536	457	394	342
5	740	616	515	439	378	328
10	712	593	496	423	364	316
15	674	558	472	405	351	307
20	640	498	452	389	337	295
25	524	406	345	296	257	224
30	426	332	301	197	171	149
35	365	284	258	222	169	148
40	320	249	226	194	168	147

Константы диссоциации угольной кислоты уменьшаются при повышении ионной силы раствора. При низких значениях рН воды (рН = 7), более 80 % углерода приходится в форме HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, остальные на долю CO<sub>2</sub>.

Содержание CO<sub>2</sub> в приповерхностных водах по отношению к содержанию углекислоты в атмосфере над водой редко бывают равновесными. Хотя CO<sub>2</sub> лучше растворяется в холодной воде, содержание растворенного CO<sub>2</sub> в водах, увеличивается с ростом температуры. Поскольку углекислый газ поглощается в процессе фотосинтеза, можно предположить, что происходят колебания в содержании растворенного CO<sub>2</sub>. При солнечной интенсивности (летнее время) обычно просматриваются максимум концентрации CO<sub>2</sub> в приповерхностном слое. Видимо, физико-химические процессы, зависящие от температуры, могут оказаться важнее, чем процесс фотосинтеза. Увеличение содержание растворенного CO<sub>2</sub> происходит с повышением давления.

Повышение температуры влечет увеличение скорости реакции. Выпадение карбонатных отложений MgCO<sub>3</sub> и доломит CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> не играет существенной роли. Также очевидно, что MgCO<sub>3</sub> лучше растворяется, чем CaCO<sub>3</sub> (в 2 раза). Арагонит образует при некоторых процессах осадкообразование, в условиях умеренного давления, он является неустойчивой формой по сравнению с кальцитом.

На основании исследования зависимостей констант диссоциации угольной кислот и величины произведения растворимостей CaCO<sub>3</sub> от температуры и давления, предпринята попытка разработки регулирования рН среды по месту (локально).

Вследствие химического превращения соединения возникает определенный риск повышения концентрации CO<sub>2</sub> и выделения парниковых газов. Возможно, применение альтернативной энергетики (приливные электростанции, микротурбинные ГЭС) способствуют лучше-

му перемешиванию слоя и поспособствуют уменьшению концентрации парниковых газов.

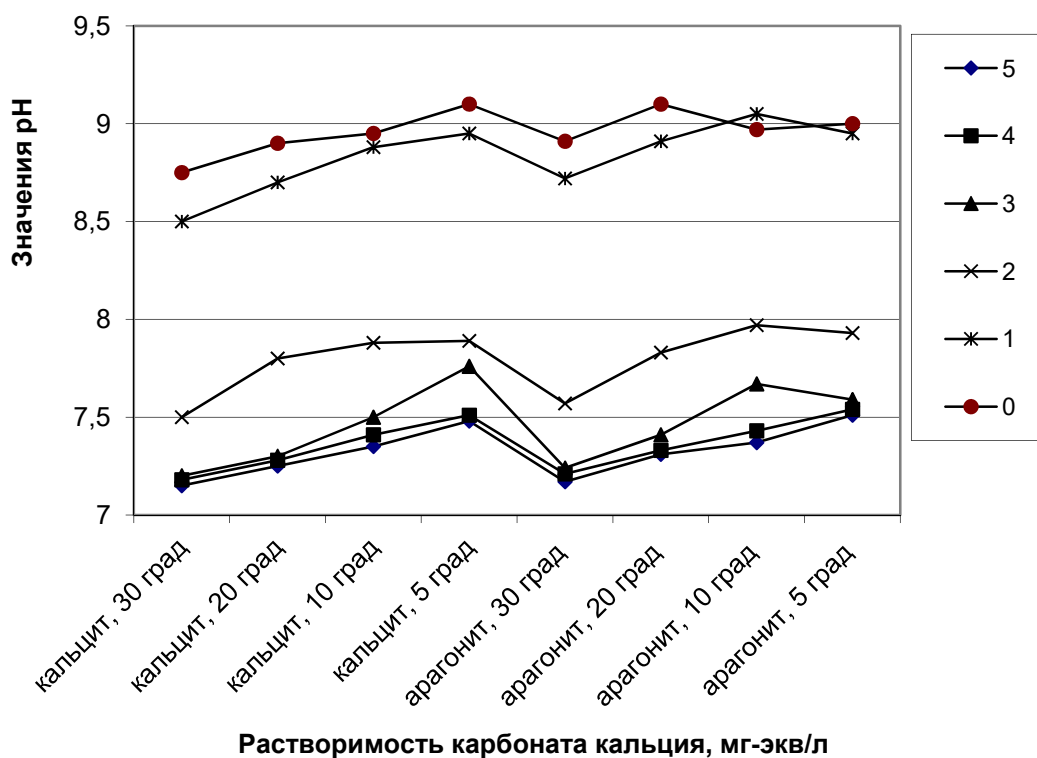


Рис. 2. Растворимость кальцита и арагонита

### Выводы

На основании проведенных исследований:

- обнаружено повышение содержания  $\text{CO}_2$  в водной среде (до  $0,533 \text{ г/см}^3$ );
- показано, что повышение температуры влечет за собой растворимость  $\text{MgCO}_3$  при  $\text{pH} = 9,2$ ;
- технически аргументировано внедрение автоматизированных систем контроля углекислотного равновесия для оперативного реагирования эксплуатационного персонала.

### Список литературы

1. Галашев А.Е., Рахманова О.Р., Чуканов В.Н. Компьютерное моделирование абсорбции молекул  $\text{CO}_2$  кластером воды. Устойчивость // Коллоидный журнал. – 2005. – Т. 67. – № 3. – С. 308–314.
2. Чейлытко А. А. Особенности процесса порообразования в вспучивающихся материалах на основе глинозема / А. А. Чейлытко, А. М. Павленко, М. А. Носов // Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Междунар. науч.–практ. конф. (Тамбов, 30 июня 2014) в 9 т. Т. 4. – Тамбов : ООО «Консалтинговая компания Юком». – 2014. – С. 114–116.
3. Treybal R. E. Mass transfer operations (3rd ed.). New York: McGraw Hill. 1980, p. 324.
4. Olson R.M., Wright S. J. Essentials of fluid mechanics (5th ed.). New York: Harper & Row. 1990. – p. 287.

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ

*Полищук С.З., Дядькина А.И., Левченко О.А.,  
Михальченко А.А., Троценко А.В.*

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,  
г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

В ходе исследования были изучены способы утилизации тепла и проведено сравнение характеристик таких выбросов, как: промышленные, вентиляционные, дымовые и печные. Рассмотрена возможность утилизации, а также определение преимуществ и недостатков использования тепла этих выбросов, влияние их на окружающую среду.

Ключевые слова: утилизация теплоты, промышленные выбросы.

## **Введение**

Теплоту уходящих газов и скрытую теплоту парообразования водяных паров можно полезно использовать. Использование теплоты уходящих дымовых газов и скрытой теплоты парообразования водяных паров называется методом глубокой утилизации теплоты газов.

## **Постановка задачи**

Целью работы было рассмотреть способы утилизации тепла и сравнить характеристики таких выбросов, как: промышленные, вентиляционные, дымовые и печные. Исследование базируется на результатах ранее опубликованных работ, где предоставлены результаты исследования способов утилизации тепла, основанные на общенаучных методах анализа и синтеза, а также аппарате математического анализа.

## **Решение поставленной задачи**

В настоящее время существуют различные технологии реализации данного метода. Метод глубокой утилизации теплоты газов позволяет увеличить КПД топливопотребляющей установки на 2 – 3 %, что соответствует снижению расхода топлива на 4 – 5 кг у.т. на 1 Гкал выработанного тепла. При внедрении данного метода, существуют технические сложности и ограничения связанные в основном со сложностью расчета процесса теплообмена при глубокой утилизации тепла уходящих газов и необходимостью автоматизации процесса, однако эти сложности решаемы при современном уровне технологий. Для повсеместного внедрения данного метода необходима разработка методических указаний по расчету и установке систем глубокой утилизации тепла дымовых газов и принятие правовых ак-

тов запрещающих ввод в эксплуатацию топливоиспользующих установок на природном газе без применения глубокой утилизации тепла газов. Наиболее часто используемый метод глубокой утилизации тепла заключается в том, что продукты сгорания природного газа после котла (либо после водяного экономайзера) с температурой 130 – 150 °С разделяются на два потока. Приблизительно 70 – 80 % газов направляются по главному газоходу и поступают в конденсационный теплоутилизатор поверхностного типа, остальная часть газов направляется в байпасный газоход. В теплоутилизаторе продукты сгорания охлаждаются до 40 – 50 °С, при этом происходит конденсация части водяных паров, что позволяет полезно использовать как физическую теплоту дымовых газов, так и скрытую теплоту конденсации части содержащихся в них водяных паров. Охлажденные продукты сгорания после каплеотделителя смешиваются с проходящими по байпасному газоходу неохлажденными продуктами сгорания и при температуре 65 – 70 °С отводятся дымососом через дымовую трубу в атмосферу. В качестве нагреваемой среды в теплоутилизаторе может использоваться исходная вода для нужд химводоподготовки или воздух, поступающий затем на горение. Для интенсификации теплообмена в теплоутилизаторе возможна подача пара атмосферного деаэрата в основной газоход. Необходимо также отметить возможность использования сконденсировавшихся обессоленных водяных паров в качестве исходной воды. Результатом внедрения данного метода, является повышение КПД котла брутто на 2 – 3 %, с учетом использования скрытой теплоты парообразования водяных паров. К техническим ограничениям и сложностям при внедрении метода можно отнести: сложность расчета процесса утилизации влажных газов, так как процесс теплообмена сопровождается процессами массообмена; необходимость поддержания заданных значений температуры и влажности уходящих газов, во избежание конденсации паров в газоходах и дымовой трубе; необходимость избегать обмерзания поверхностей теплообмена при нагревании холодных газов; при этом необходимо проведение испытаний газоходов и дымовых труб обработанных современными антикоррозионными покрытиями на предмет возможности снижения ограничений по температуре и влажности уходящих после теплоутилизационной установки газов. Массовое внедрение данного метода позволит снизить расход топлива на 4 – 5 кг у.т. на одну Гкал выработанного тепла и повлияет на экологическую обстановку путем снижения выбросов оксидов азота.

Для утилизации тепла газов в настоящее время используются аппараты (экономайзеры) как поверхностного типа, так и с непосредственным контактом газов с охлаждающей жидкостью. Последние обладают рядом преимуществ, таких как возможности создания большей поверхности контакта фаз, глубокого охлаждения газов с получе-

нием дополнительного тепла за счет конденсации содержащейся в дымовых газах влаги. Однако традиционное оборудование контактного типа (насадочное, барботажное и распылительное) допускает устойчивую работу при низких скоростях газовой фазы, обычно не превышающих 2 м/с. Использование многоступенчатых аппаратов вихревого типа, которые устойчиво работают при скоростях газа до 30 м/с, имеют малые габаритные размеры, невысокое гидравлическое сопротивление.

В настоящее время температуру уходящих дымовых газов за котлом принимаю не ниже 120 – 130 °С по двум причинам:

- для исключения конденсации водяных паров на боровах, газоходах и дымовых трубах

- и для увеличения естественной тяги, снижающей напор дымоcоса. При этом теплоту уходящих газов и скрытую теплоту парообразования водяных паров можно полезно использовать. Использование теплоты уходящих дымовых газов и скрытой теплоты парообразования водяных паров называется методом глубокой утилизации теплоты дымовых газов. В настоящее время существуют различные технологии реализации данного метода, и нашедшие массовое применение за рубежом. Метод глубокой утилизации теплоты дымовых газов позволяет увеличить КПД топливопотребляющей установки на 2 – 3 %, что соответствует снижению расхода топлива на 4 – 5 кг у.т. на 1 Гкал выработанного тепла. При внедрении данного метода, существуют технические сложности и ограничения связанные в основном со сложностью расчета процесса теплообмена при глубокой утилизации тепла уходящих дымовых газов и необходимостью автоматизации процесса, однако эти сложности решаемы при современном уровне технологий.

### Результаты

В настоящее время принимаются методы глубокой утилизации тепла уходящих газов (ВЭР) путем использования рекуперативных, смесительных, комбинированных аппаратов, работающих при различных приемах использования теплоты, содержащейся в уходящих газах. При этом данные технологии используются на большинстве вводимых в эксплуатацию котлов за рубежом, сжигающих природный газ и биомассу.

Прогноз эффективности метода в перспективе с учетом: роста цен на энергоресурсы; роста благосостояния населения; введением новых экологических требований; других факторов.

Наиболее часто используемый метод глубокой утилизации тепла дымовых газов заключается в том, что продукты сгорания природного газа после котла с температурой 130 – 150 °С разделяются на 2 потока. Приблизительно 70 – 80 % газов направляются по главному газоходу и поступают в конденсационный теплоутилизатор поверхностного ти-

па, остальная часть направляется в байпасный газоход. В теплоутилизаторе продукты сгорания охлаждаются до 40 – 50 %, при этом происходит конденсация части водяных паров, что позволяют полезно использовать как физиологическую теплоту дымовых газов, так и скрытую теплоту конденсации части содержащихся в них паров. Охлаждающие продукты сгорания после каплеотделителя смешиваются с проходящими по байпасному газоходу неохлажденными продуктами сгорания и при температуре 65 – 70 °С отводятся дымососам через дымовую трубу в атмосферу. В качестве нагреваемой среды в теплоутилизаторе может использоваться исходная вода для нужд химводподготовки или воздух, поступающий затем на горение.

Данный метод повышает эффективность сжигания природного газа и снижает выбросы оксидов азота в атмосферу за счет их растворения в конденсирующихся водяных парах.

В таблице 1 приведена систематизация способов утилизации теплоты выбросов.

Таблица 1

Систематизация способов утилизации теплоты выбросов

Источник, разновидность	Отрасль	Теплоноситель	Способ реализации (передача тепла)	Способ использования, назначение	Особенности устройства
1	2	3	4	5	6
промышленные выбросы	металлургические	вода	теплопроводность	для водоснабжения, для отопления	утилизация с помощью тепловых насосов и абсорбционных холодильных машин.
вентиляционные выбросы	строительные	вода	теплопроводность	для водоснабжения, для отопления	осуществляется: рециркуляцией части вытяжного воздуха; применением рекуперативных теплообменников-утилизаторов; применением регенеративных теплообменников-утилизаторов; применением двух рекуперативных теплообменников, которые используют промежуточный теплоноситель

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
дымовые выбросы	ЖКХ	водяные пары	теплопроводность	для водоснабжения, для отопления	применение поверхностного пластинчатого теплообменника без каких-либо органов регулирования расхода газов, где греющая среда и нагреваемая среда движутся противотоком
печные выбросы	индивидуальные	жидкость	теплопроводность	для водоснабжения, для отопления	расширение диапазона работы утилизационного водогрейного котла и повышение КПД устройства. Технический результат достигается тем, что в известном устройстве перепускной трубопровод соединяет регулирующий орган с утилизационным водогрейным котлом. Предлагаемое устройство содержит дизель, перепускной трубопровод, позволяющий направлять отработавшие газы либо в турбокомпрессор, либо непосредственно в утилизационный водогрейный котел при помощи регулирующего органа.

### Список литературы

1. Полищук С. З. Утилизация тепла промышленных выбросов и качество воздушной среды / Полищук С. З., Кушнир Е. Г., Лесникова И. Ю., Петренко В. О., Васильева Ю. Д., Хоменко Е. А. // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 76. – С. 212–220.
2. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха / А. И. Пирумов Москва : Стройиздат, 1998. – 296 с.
3. Ратушняк Г. С. Теоретичні основи технології очищення газових викидів / Г. С. Ратушняк. – Вінниця: ВДГУ, 2002. – 96 с.
4. Ратушняк Г. С. Технічні засоби очищення газових викидів : навчальний посібник / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 158 с.
5. Дунин-Борковский И. В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике / И. В. Дунин-Борковский, Н. В. Смирнов. – М. : Наука, 1965. – 511 с.

2. Чейлытко А. А. Особенности процесса порообразования в вспучивающихся материалах на основе глинозема / А. А. Чейлытко, А. М. Павленко, М. А. Носов // Современное общество, образование и наука: сборник научных трудов по материалам Междунар. науч.–практ. конф. (Тамбов, 30 июня 2014) в 9 т. Т. 4. – Тамбов : ООО «Консалтинговая компания Юком». – 2014. – С. 114–116.
3. Treybal R. E. Mass transfer operations (3rd ed.). New York: McGraw Hill. 1980, p. 324.
4. Olson R.M., Wright S. J. Essentials of fluid mechanics (5th ed.). New York: Harper & Row. 1990. – p. 287.

# ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ІНШИХ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

*Романенко М.О., Ємець М.А., Романенко І.І.*

*Інститут проблем природокористування та екології НАН України,  
м. Дніпро, Україна*

## **Анотація**

Дослідження впливу систем життєзабезпечення промислових об'єктів на загальний екологічний стан компонентів навколишнього природного середовища, а також розробка підходів до кількісного методу диференціальної та комплексної оцінки їх екологічності є актуальним науковим завданням. Показано, що життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії - це важлива ланка економіки країни, багатогалузевий господарський комплекс, до складу якого входять теплопостачання, водопостачання і водовідведення, газопостачання, електропостачання та ін. Обґрунтовано принципи методики оцінки впливу таких систем на навколишнє середовище і визначення рівня екологічності послуг, що поставляються.

Ключові слова: системи життєзабезпечення, інженерні мережі, критерії екологічності, екологічні показники.

## **Вступ**

Питанням визначення екологічності різних технологічних процесів та систем за останні роки приділяється значна увага [1 – 4]. Актуальними ці питання є також для сучасних інженерних систем життєзабезпечення об'єктів промислового господарства.

Життєзабезпечення об'єктів промислового господарства - багатогалузевий господарський комплекс, до складу якого входять теплопостачання, водопостачання та водовідведення, газопостачання, електропостачання тощо.

Підвищення екологічності систем життєзабезпечення об'єктів промислового господарства та оцінка їх впливу на навколишнє природне середовище повинна здійснюватись на основі комплексної оцінки, яка проводиться на підставі визначення відповідних показників (критеріїв). При аналізі існуючих показників оцінки екологічності, в першу чергу, розглядаються ті з них, які характеризують вплив на природне середовище і встановлюють співвідношення "вплив – можливі наслідки". Отже, організація життєзабезпечення об'єктів промислового господарства на принципах екологічності створить умови для сталого розвитку промислових агромерацій.

## **Постановка задачі**

Аналізуючи переваги, недоліки та можливості використання різних підходів до оцінки систем життєзабезпечення об'єктів промислового господарства встановлено, що характеризувати екологічність різних технологій можна через наступні показники [5, 6]:

- навантаження на природне середовище, але при цьому повинні бути використані інтегральні, а краще комплексні показники, які поки недостатньо розроблені;

- зміни стану навколишнього середовища під впливом різних технологій. Це більш досконала оцінка, однак методи прогнозування через не розробленість і недостатні відомості про стан природних і порушених екосистем, виявляються неефективними (необхідні трудомісткі розрахунки змін в компонентах навколишнього середовища і прогнози їх наслідків, велика ступінь невизначеності);

- техноємності навколишнього середовища та природоємності технологічних процесів і виробництв;

- збитків природному середовищу і ризику (є методики визначення збитків від забруднення водних об'єктів, атмосфери, земель, інтенсивно розробляються методи оцінки екологічного ризику).

Об'єктивною і повної є оцінка "природоємності" технологій, однак механізм такої оцінки поки не опрацьовано в повній мірі. Але зараз вже можна запропонувати деякі підходи до вирішення цього питання.

### **Основна частина досліджень**

Аналіз напрямків та масштабів впливу основних систем життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії на різні компоненти навколишнього природного середовища (табл. 1) свідчить про наступне:

- системи життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії впливають на всі компоненти навколишнього природного середовища;

- цей вплив на довкілля має широкий діапазон - від його відсутності до значного впливу;

- значні впливи на довкілля характерні для його опосередкованого виду, коли вони проявляються далеко за межами розташування систем життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії (наприклад, для системи теплопостачання - це теплові, атомні чи інші електростанції тощо).

Наведені обставини вимагають пошуку нетрадиційних методів та критеріїв оцінки екологічності систем життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії.

Аналізуючи публікації з проблем енергозбереження та енергоємності технологічних процесів [7, 8] пропонується в якості критерію оцінки екологічних збитків від систем життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії використати енергоємність цих систем, яка обумовлює викиди в атмосферу парникових газів, що дозволить об'єднати в єдине ціле наслідки прямих та опосередкованих впливів, а також розглядати питання енергозбереження як інструмент для скорочення споживання енергії та зниження викидів парникових газів.

Напрямки та масштаби впливу систем життєзабезпечення  
об'єктів промислової інженерії на довкілля

Внутрішні системи життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії	Прямі (+) чи опосередковані (×) впливи на компоненти довкілля			
	повітряне середовище	водне середовище	грунти	утворення відходів
Водопостачання	–	××	×	××
Водовідведення	×	×××	×××	×××
Газопостачання	+	×	××	×
Теплопостачання	++/×××	×××	×××	×××
Електропостачання	–	×××	×××	×
Вентиляція	+	+	–	+
Кондиціонування	+	+	–	+

Примітки: Значки використовуються в наступному значенні: – - вплив відсутній; +/× - вплив незначний; ++/×× - вплив помірний; +++/××× - вплив значний.

Враховуючи наведене, екологічність систем життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії може бути представлена за наступною формулою

$$E_{СЖ} = 3B \sum_i^n E C_i, \quad \text{гС}_{\text{екв}} / \text{м}^2 \quad (1)$$

де  $3B$  – середній викид парникових газів на 1 кВт-годину виробленої електроенергії на електростанціях різних типів з урахуванням структури її виробництва в країні,  $\text{гС}_{\text{екв}}$  (грам вуглецевого еквіваленту) [9];  $E C_i$  – енергоємність  $i$ -ї системи життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії, кВт-годин/м<sup>2</sup>.

Як показують результати досліджень, за показниками екологічності системи життєдіяльності промислової інженерії можна розділити на три групи.

До першої групи відносяться системи з надзвичайно низькими показниками екологічності (високими показниками викидів парникових газів) – теплопостачання, електропостачання, водопостачання гарячої води.

Другу групу складають системи з середніми показниками екологічності – газопостачання, вентиляція примусова, водопостачання холодної води.

До третьої групи слід віднести досить екологічні системи життєдіяльності промислової інженерії – кондиціонування, циркуляція, каналізація.

В процесі удосконалення систем життєдіяльності промислової інженерії слід звернути особливу увагу на теплопостачання та водопостачання гарячої води. Для цих систем формування значної частки впливу на навколишнє природне середовище (80 – 85 %) припадає на стадію споживання відповідних послуг.

## Висновки

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Виконано аналіз сучасних систем життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії з оцінкою їх впливу на навколишнє природне середовище.

2. Аналізуючи переваги, недоліки та можливості використання різних підходів до оцінки систем життєзабезпечення промислових об'єктів встановлено, що характеризувати екологічність різних технологій доцільно через показники техноємності навколишнього середовища та екологоємності та природоємності технологічних процесів та виробництв.

3. Обґрунтовано методика розрахунку екологічності сучасних систем життєзабезпечення промислових об'єктів. Проведена оцінка загальної енергоефективності (енергоемності) систем їх життєзабезпечення, аналіз зв'язку енергоемності технологічних процесів з обсягами викидів парникових газів. Визначено екологічність систем життєзабезпечення об'єктів промислової інженерії.

## Список літератури

1. Артюхов В. В. Объективная оценка экологичности хозяйственной деятельности: Методология и результаты. Предприятия, регионы России, страны мира / В. В. Артюхов, С. И. Забелин, А. С. Мартынов // SPERO. – 2012. – № 16, Весна–Лето. – С. 113–142.

2. Лысова Е. П. Анализ методов выработки электрической и тепловой энергии на предприятиях топливно-энергетического комплекса с учетом критериев экологичности и эффективности использования топливно-энергетических ресурсов / Е. П. Лысова, Л. А. Лисутина // Интернет-журнал "Науковедение". – 2013. – № 5. – 6 с.

3. Майорова Л. П. Оценка экологичности технологических процессов / Л. П. Майорова, О. А. Мищенко // Вестник Томского гос. ун-та. – 2009. – № 2 (13). – С. 111–116.

4. Скороходов А. К вопросу об эффективности и экологичности работы тепловых сетей / А. Скороходов // Новости теплоснабжения. – Москва, 2004. – № 2 (42). – С. 30–32.

5. Способи оцінки екологічності систем життєзабезпечення об'єктів житлового та комунального господарства / М. О. Романенко, М. А. Ємець, І. І. Романенко, І. Ю. Леснікова // Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия : Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве : сб. науч. трудов ГВУЗ ПГАСА. – Днепропетровск : ЧМП "Экономика", 2017. – Вып. 98. – С. 137–143.

6. Романенко М. О. Екологічна оцінка інженерних систем життєзабезпечення об'єктів промислового господарства / М. О. Романенко // Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика : Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених, спец., аспір. ; тези доповідей ; Маріуполь, 11–12 травня 2017 року. – Маріуполь : ДВНЗ Приазовський ДТУ, 2017. – С. 48–49.

7. Белоусов В. Н. Энергосбережение и выбросы парниковых газов (CO<sub>2</sub>) / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, В. Ю. Лакомкин. – СПб., Изд-во СПбГТУРП. – 2014. – 52 с.

8. Бочкарев В. А. Оценка выбросов парниковых газов предприятиями энергетики / В. А. Бочкарев, А. В. Бочкарева // Вестник Иркутского ГТУ. – 2017. – Том 21. – № 2. – С. 85–96.

9. Джозеф В. Спадаро. Выбросы парниковых газов от цепочек выработки электричества. Оценка различий / Джозеф В. Спадаро, Люсиль Ланглуа, Брюс Гамильтон // Бюллетень МАГАТЭ. – 2000. – Том 42. – № 2. – С. 19–24.

# УТВОРЕННЯ ТА УТИЛІЗАЦІЯ ШЛАМІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

*Саввін О.В., Іванов І.І., Бабенко Л.В., Мєшкова А.Г., Кравцов С.В.*

*Національна Металургійна Академія України, м. Дніпро, Україна*

## Анотація

Основними відходами металургійного комплексу є шлами, відкрите складування яких наносить значний збиток водному та повітряному басейнам. Наявність у шламах від 37 до 52 % заліза і більше 6,5 % вуглецю дозволяє розглядати їх як цінну металургійну сировину. Утилізація таких шламів традиційними методами (агломерація, отримання випалених окатишів) не вирішує екологічну проблему, а за певних умов навіть ускладнює її.

Ключові слова: відходи виробництва, залізовмісні шлами, хімічний склад шламів, агломераційне виробництво, рециркуляційний огрудкувач, безвипалювальні окатиші, міцність сирих та готових окатишів.

## Вступ

Відкрите складування шламів завдає істотної шкоди навколишньому середовищу. Володіючи високою дисперсністю, шлами під впливом кліматичних факторів поширюються на значні відстані в приземному повітряному шарі, забруднюють ґрунт, поверхневі і підґрунтові води [1].

У той же час хімічний склад шламів дозволяє віднести їх до коштовної металургійної сировини, але висока дисперсність вимагає їх укрупнення.

## Постановка задачі

За класифікацією Лісіна С.В і Юсфіна Ю.С. залізовмісні шлами металургійного виробництва підрозділяються за джерелами утворення на: шлами металургійних заводів; шлами доменного виробництва; шлами газоочищення мартенівських печей; шлами газоочищення конвертерів; шлами газоочищення електросталеплавильних печей. За масовою часткою заліза підрозділяються на: багаті – масова частка заліза 55 – 67 % (шлам і пил газоочисток мартенівських і конверторних цехів); відносно багаті – масова частка заліза 40 – 55 %; бідні – масова частка заліза менше 40 % [2].

Аналіз хімічного складу шламів газоочисток доменних печей на підприємствах чорної металургії України показав, що вони містять наступні сполуки і елементи (% маси):  $Fe_{\text{заг}} = 46,8$ ;  $Fe_2O_3 = 56,8$ ;  $FeO = 9,15$ ;  $CaO = 6,92$ ;  $SiO_2 = 9,23$ ;  $Al_2O_3 = 1,42$ ;  $MgO = 1,13$ ;  $Na_2O = 0,164$ ;  $Mn = 0,188$ ;  $P = 0,31$ ;  $S = 0,33$ ;  $Zn = 0,127$ ;  $Pb = 0,0508$ ;  $C = 6,65$ .

Отже, низький вміст Zn в доменних шламах нашої країни і високий вміст Fe<sub>заг</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO дозволяють відносити доменні шлами до коштовної металургійної сировини і розглядати їх запаси і поточні надходження як техногенні родовища. Доменне виробництво залишається основним постачальником цих техногенних родовищ. Їх маса становить мільйони тон. Сумарний обсяг доменних шламів приблизно в 10 разів перевищує вихід шламів киснево-конвертерного і прокатного виробництв. У той же час слід зазначити, що питомий винос пилу від киснево-конвертерних агрегатів з донною продувкою становить 12 – 25 кг/т сталі. Хімічний склад шламів конвертерних пилогазоочисток за змістом основних з'єднань і елементів характеризується великим розкидом в діапазоні: Fe<sub>заг</sub> = min 39,4 – max 78,3; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 5,96 – 67,8; CaO = 2,85 – 20,5; SiO<sub>2</sub> = 1,42 – 2,9; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,11 – 0,35; MgO = 0,16 – 14,5; K<sub>2</sub>O = 0,10 – 0,25; Na<sub>2</sub>O = 0,10 – 0,60; Mn = 0,74 – 1,6; P = 0,35 – 0,18; S = 0,025 – 0,30; Zn = 0,05 – 4,15; Pb = 0,016 – 0,75; C = 0,7 – 4,2.

За змістом Fe<sub>заг</sub> конвертерні шлами перевищують доменні в середньому на 14 %. Окалина і шлами прокатних виробництв досліджені досить детально, вміст заліза в цих відходах залежить від сортаменту прокату і, як правило, значно перевищує його вміст в конвертерних шламах, але вони характеризуються високим вмістом масел, а це дещо ускладнює їх подальше використання. При роботі зі шламами трубопрокатних і трубозварювальних виробництв ствердження про високий вміст заліза не є безперечним. Наприклад, шлами ПАП ІНТЕПАЙП Новомосковського трубного заводу містять, % мас.: Fe<sub>заг</sub> = 51,62; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 61,48; FeO = 10,98; CaO = 6,07; SiO<sub>2</sub> = 6,47; P = 0,046.

До теперішнього часу в Україні основним напрямком утилізації залізовмісних шламів було їх застосування в агломераційній шихті. Збільшення вмісту шламів в аглошихті об'єктивно призводить до зниження техніко-економічних показників роботи агломераційних машин і, крім цього, до підвищення негативного впливу агломераційного процесу на параметри навколишнього середовища.

Гранично допустима питома витрата шламу в короткочасному режимі не повинна перевищувати 400 кг/т агломерату [3]. На думку авторів, подальше збільшення витрат шламів в аглошихту потребує вдосконалення схем їх підготовки, тобто значних витрат. Якщо врахувати, що збільшення кількості шламу в агломераті об'єктивно призводить до збільшення пиловиділення в процесах агломерації, то агломераційному шляху укрупнення в технологічному та екологічному планах на даному етапі технічного розвитку повинен бути протиставлений екологічно ефективний спосіб укрупнення.

### **Рішення поставленої задачі**

Аналіз існуючих методів безвипалювального зміцнення окатишів показав, що в усіх випадках виявлений близький до прямої залежності зв'язок між міцністю сирих и зміцнених – готових окатишів [4].

Отже, при безвипалювальному зміцненні окатишів значно зростає роль процесу механічного зміцнення окатишів на стадії гранулювання шихтових матеріалів. Багаторічні дослідження, направлені на удосконалення грануляторів барабанного і тарілчастого типу, що широко застосовуються у світовій практиці, призвели до того, що на даному етапі навряд чи можна очікувати значного підвищення якості сирих окатишів, одержуваних в зазначених апаратах. Необхідність отримання сирих окатишів заданої – збільшеної міцності із шихт з розвиненою питомою поверхнею, включаючи металовмісні пил і шлами, зажадали застосування принципово нових засобів гранулювання – з керованими динамічними впливами на гранули і селективним відбором кондиційних фракцій. Таким вимогам відповідають гранулятори з внутрішньою керованою рециркуляцією [5].

Теоретичні дослідження і досвід використання рециркуляційних грануляторів в агломераційному цеху МК "Запоріжсталь" та проведені дослідження на базі укрупненої лабораторної установки в умовах ПрАТ «ЄВРАЗ ДМЗ» показали, що переваги, закладені в рециркуляційних пристроях, ще не повністю вичерпані. Це стало підставою для детальних досліджень процесу грудкування шламовмісних шихт. В якості базової для проведення досліджень було обрано конструкцію рециркуляційного пристрою, що не вміщує традиційної бокової стінки.

Метою даних досліджень стало наступне: оцінка ефективності застосування рециркуляційних пристроїв для отримання сирих окатишів із дрібнодисперсних і пилоподібних відходів металургійного виробництва; виявлення та усунення можливих недоліків рециркуляційних пристроїв, обумовлених складом та особливими властивостями шихтових матеріалів, які піддаються агрегуванню. До складу шихти входили: металовмісні мінерали, які пройшли стадії збагачення, одно- и двох-стадійну високотермічну обробку; активне і пов'язане вапно; твердий вуглець; вюстит; гематит; магнетит; інші сполуки та елементи.

### **Висновки**

1. Відкрите складування металургійних шламів завдає істотної шкоди навколишньому середовищу.
2. Наявність в шламах від 37 до 52 % залізу і більш 6,5 % вуглецю дозволяє розглядати їх як цінну металургійну сировину.
3. Одним із перспективних шляхів утилізації шламів є отримання безвипалювальних окатишів.

4. При утилізації шламовмісних шихт істотно зростає роль процесу гранулювання через їх відносно низьке грудкування.

5. У якості базової для проведення дослідження була вибрана конструкція рециркуляційного пристрою, що не вміщує традиційної бокової стінки.

6. Детальні дослідження процесу гранулювання шламовмісних шихт в рециркуляційному пристрою показали, що переваги, закладені в цієї технології, ще не повністю вичерпані. Це є основою для детальних досліджень процесу гранулювання шламовмісних шихт.

### Список літератури

1. Бобылев В. П. Разработка и освоение ресурсосберегающих технологий в условиях устойчивого развития черной металлургии Украины // Екологія і природокористування : Збірник наукових праць Інституту проблем природокористування та екології НАН України. – Випуск 3. – Дніпропетровськ, 2001. – С. 195–204.

2. Лисин В. С., Юсфин Ю. С. Ресурсоэкологические проблемы XXI века и металлургия. – М. : Высш. шк., 1998. – 447 с.

3. Мищенко И. М., Клягин Г. С., Хлапонин Н. С. и др. Агломерация шихт с большим содержанием шламов на фабриках Украины / Труды V Международного конгресса доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», Днепропетровск, 1999. – С. 106–110.

4. Лотош В. Е., Окунев А. И. Безобжиговое окомкование руд и концентратов. – М. : Наука, 1980. – 216 с.

5. Пат. VA 20429 А Украины. МКУ<sup>б</sup>С22 В1/00, В 01 g 2/14. Устройство для смешивания и гранулирования сыпучих материалов/ Бобылев В. П. и др. – Опубл. 15.07.97. – Бюл. № 1.

# **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И УМЕНЬШЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ЗА СЧЕТ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТУРБОКОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК**

*Скрынников В.Б., Ляховецкая-Токарева М.М.,  
Завгородняя Е.П.*

*ГВУЗ Приднепровская государственная академия строительства  
и архитектуры, г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

В статье проведена оценка работы турбокомпрессорных установок с целью повышения эффективности их работы и уменьшения теплового загрязнения окружающей среды. Приведено изменение параметров сжатого воздуха в многоступенчатом компрессоре. Приведены результаты промышленных исследований режима работы промежуточных и конечных охладителей турбокомпрессора К-500-61-1, где показан температурный режим охлаждающей воды на входе и на выходе из охладителей ( $t_{вх} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и отведенная тепловая мощность ( $Q$ , кВт) в зависимости от подаваемого расхода воды на охладители ( $W$ , м<sup>3</sup>/ч).

Ключевые слова: турбокомпрессорная установка, воздухоохладитель, температура воды, температура воздуха, охлаждение, эксергия.

## **Введение**

Во многих отраслях промышленности (газовой, горной, машиностроительной, металлургической) используется сжатый воздух. Источником сжатого воздуха являются компрессорные станции, оборудованные в основном турбокомпрессорными установками.

## **Постановка задачи**

Целью данной работы является определение путей повышения энергоэффективности и уменьшения теплового загрязнения окружающей среды за счет оптимизации работы и рациональной эксплуатации турбокомпрессорных установок.

## **Решение поставленной задачи**

Изменение параметров сжатого воздуха в многоступенчатом компрессоре приведено на диаграмме в осях эксергия-энтальпия ( $E-i$ ) на рис. 1.

Эксплуатация турбокомпрессорных установок связана с отводом в окружающую среду тепла сжатого воздуха после промежуточных и конечных охладителей.

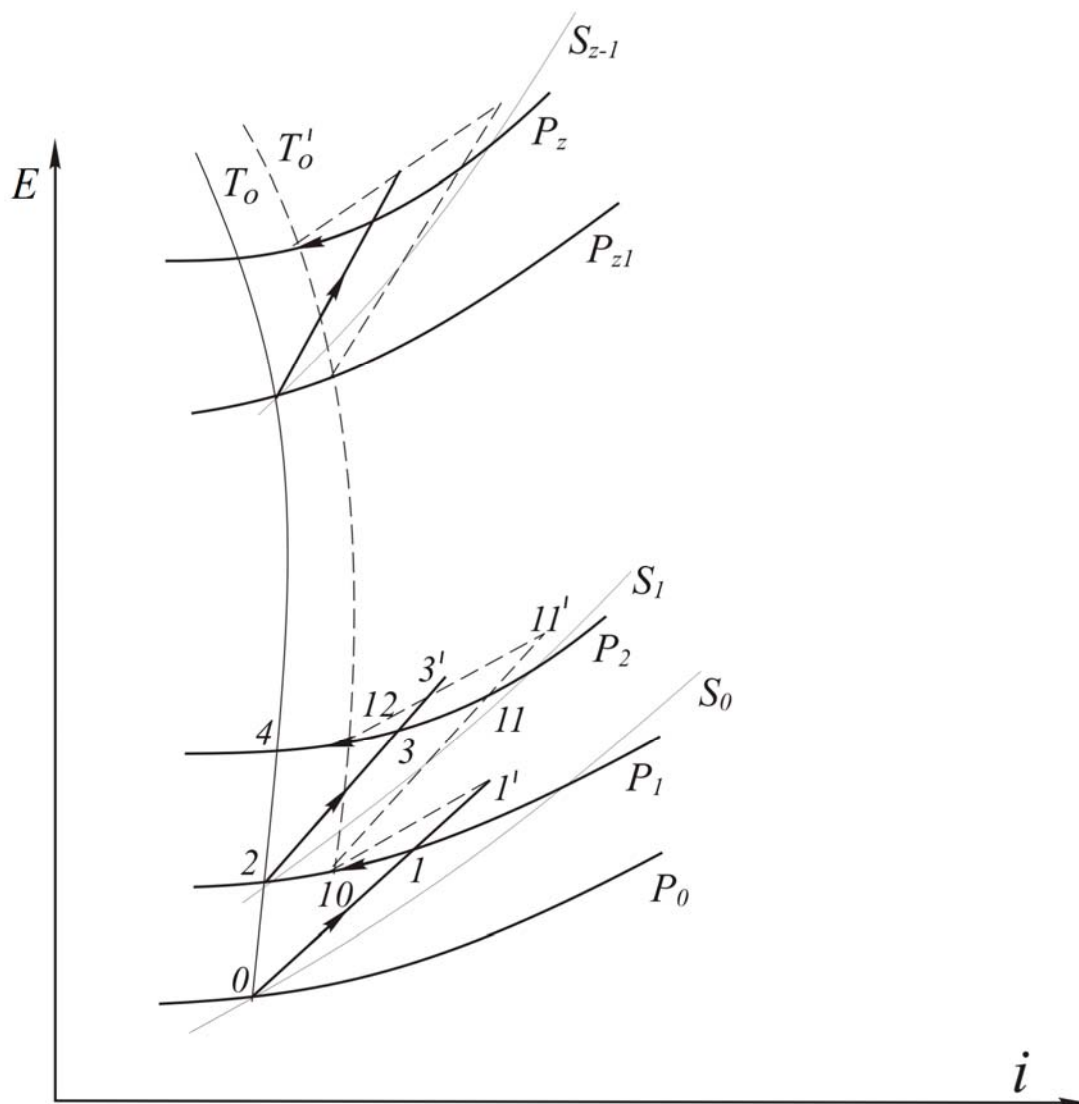


Рис. 1. Изменение параметров сжатого газа в многоступенчатой компрессорной установке в E-i диаграмме

На рис. 2 приведены результаты промышленных исследований режима работы промежуточных и конечных охладителей турбокомпрессора К-500-61-1, где показан температурный режим охлаждающей воды на входе и на выходе из охладителей ( $t_{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$ ) и отведенная тепловая мощность ( $Q$ , кВт) в зависимости от подаваемого расхода воды на охладители ( $W$ , м<sup>3</sup>/ч).

При использовании двухсекционных воздухоохладителей в системе охлаждения турбокомпрессора возможно параллельное и последовательное включение аппаратов. Предполагается, что в каждой стадии охлаждения воздух проходит через секции утилизационного контура, а затем доохлаждается. Доохлаждающий контур строится на типовой схеме охлаждения компрессора.

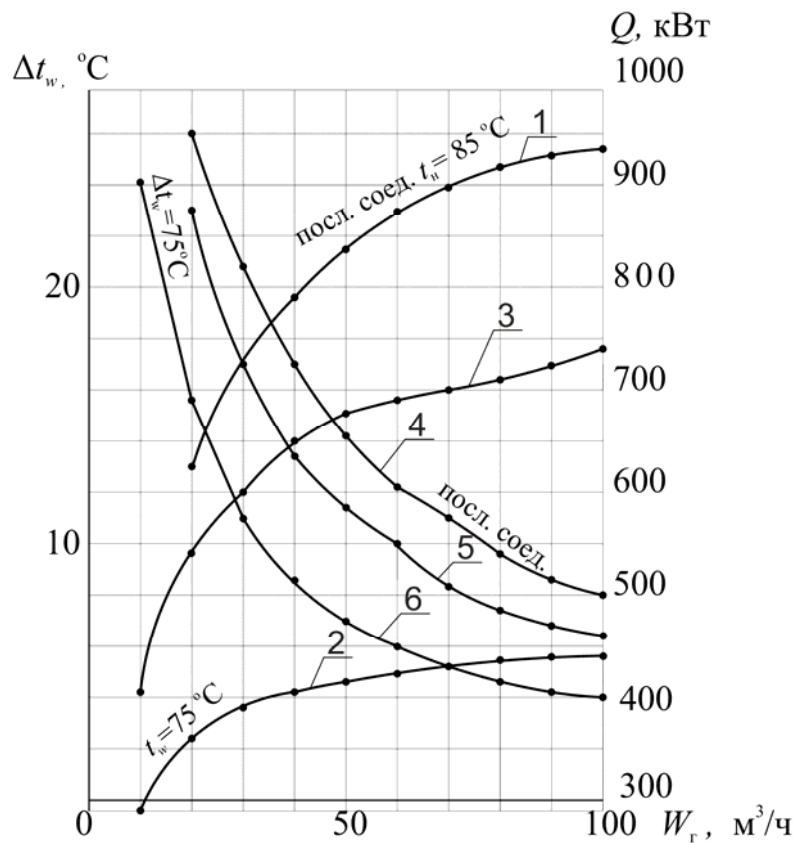


Рис. 2. Результаты исследований системы охлаждения турбокомпрессора К-500-61-1:  
 1, 2, 3 – зависимости отводимой тепловой мощности от расхода охлаждаемой воды соответственно в первом, втором и конечном воздухоохладителях;  
 4, 5, 6 – зависимости перепада температуры охлаждаемой воды от ее расхода соответственно в первом, втором и конечном воздухоохладителях

Повышение температуры воды в воздухоохладителе определяется следующим выражением [5]:

$$\Delta t_w = \frac{\tau_H \left[ e^{KF \left( \frac{1}{c_p G_v} - \frac{1}{c_w W} \right)} - 1 \right]}{\frac{c_w W}{c_p G_v} e^{KF \left( \frac{1}{c_p G_v} - \frac{1}{c_w W} \right)} - 1}, \quad (1)$$

где  $W$  – расход охлаждающей воды, кг/час;  $c_p$  и  $c_w$  – соответственно удельная теплоемкость сжатого воздуха и воды, кДж/кг·К;  $G_v$  – расход сжатого воздуха, проходящего через воздухоохладитель, кг/ч;  $\tau_H = t_{вн} - t_{wh}$  – разность температур воздуха на входе в аппарат и начальной воды, °С;  $F$  – площадь теплообмена аппарата, м<sup>2</sup>.

Предложен термодинамический коэффициент эффективности работы системы охлаждения компрессорной установки. По возрастанию значения величины данного коэффициента предложено выделить три основные группы утилизации теплоты сжатого воздуха:

– прямая утилизация тепла при непосредственном нагреве теплоносителя. Область применения – системы теплоснабжения, отопления, вентиляции, горячего водоснабжения и технологические системы (рис. 3 [2]);

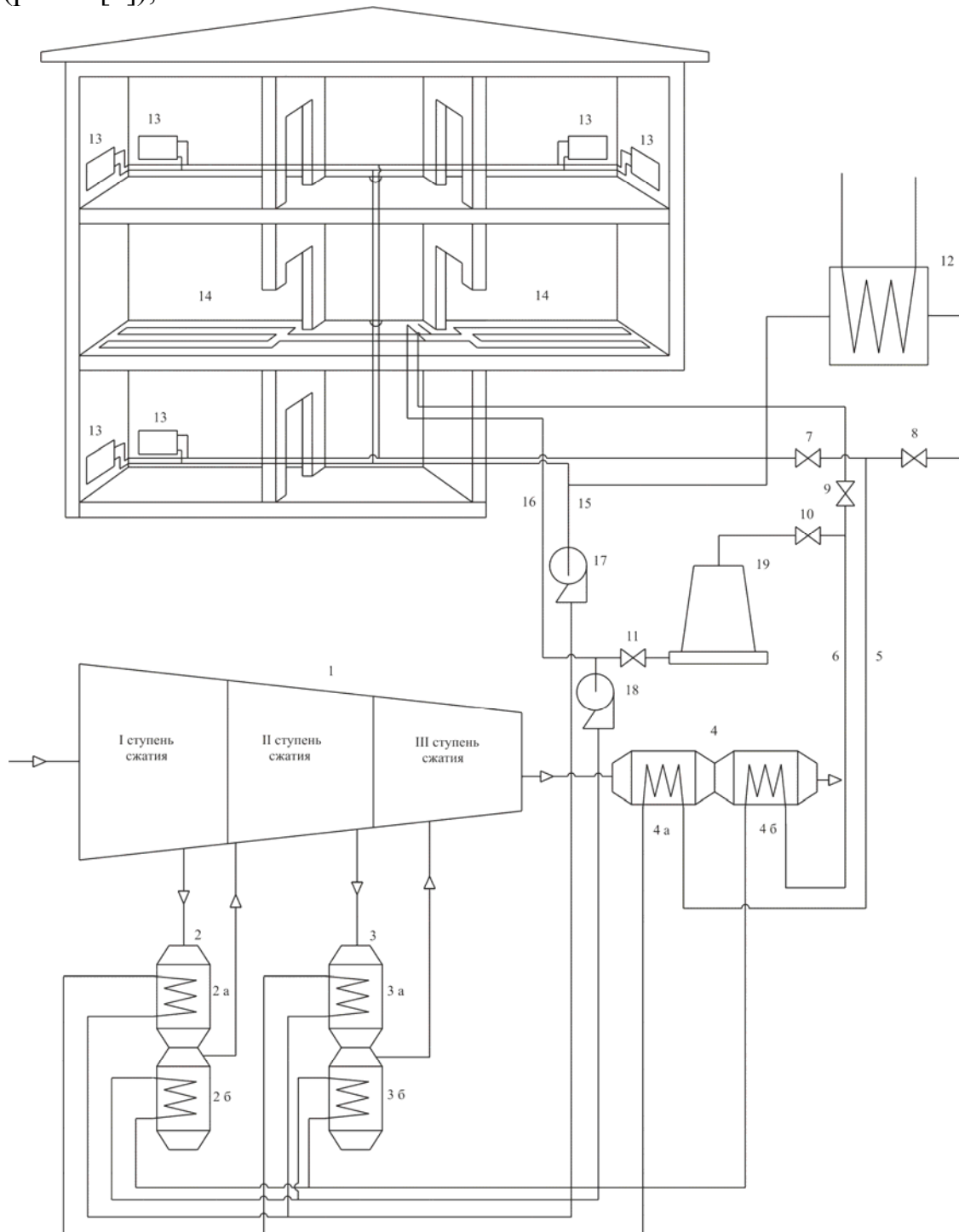


Рис. 3. Система отопления и горячего водоснабжения гражданских и промышленных зданий

– системы с трансформацией теплоты. Основной элемент этой группы – энергетические циклы с газовой турбиной, холодильные машины, абсорбционные холодильные машины (генерация пара хладагента [3]);

– теплонасосные установки с системами утилизации теплоты сжатого воздуха.

### **Выводы**

Потери эксергии в первом промежуточном охладителе составляют 0,15, во второй секции – 0,17, в третьей – 0,19.

В зависимости от режима работы с теплотой охлаждающей воды, если она не используется, теряется 15 – 20 % подводимой к турбокомпрессору энергии.

Выброс в атмосферу такого значительного количества теплоты, производимого в градирнях, осуществляет тепловое загрязнение воздушного пространства.

### **Список литературы**

1. Деклараційний патент F24D 11/00. Система опалення та гарячого водопостачання громадських і промислових будівель // Скрипніков В. Б., Савицький М. В., Бузунов О. В., Салімов Е. З., Сайченко О. В., Скрипніков Ю. В. – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2002.

2. Деклараційний патент F24D 11/00. Система опалення та гарячого водопостачання громадських та промислових будівель // Скрипніков В. Б., Савицький М. В., Скрипніков Ю. В., Ляховецька М. М., Сайченко О. В., Салімов Е. З. – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2005.

3. Патент на корисну модель № 40502 Система охолодження технологічної води. МПК (2009) F24F 5/00. Винахідники : Скрипніков В. Б., Савицький М. В., Ляховецька М. М., Скрипніков Ю. В., Липський Г. Г.

4. Парфенов В. П. Расчет и проектирование теплообменных систем компрессорных установок общего назначения. Учебное пособие. – Омск : ОмПИ. – 1987. – 80 с.

5. В. М. Кейс, В. М. Лондон. Компактные теплообменники. – М. : Энергия, 1967 – 223 с.

# ОРГАНІЗАЦІЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ВИКИДІВ В АТМОСФЕРУ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН З ДЖЕРЕЛ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВИРОБНИЦТВ

*Третьяков О.В.*

*Національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова, м. Харків*

## **Анотація**

Удосконалено теоретичні основи ДРП і СКР методи лазерної діагностики і зроблено на їх основі автоматизований лазерний комплекс оперативного високочастотного, чутливого контролю концентрації шкідливих і небезпечних речовин на рівні виходу з промислового джерела в атмосферу.

Ключові слова: шкідливі і небезпечні речовини; контроль викидів; метод диференціального резонансного поглинання.

## **Постановка проблеми**

Стан атмосферного повітря в сучасних умовах визначається в значному ступеню складом і кількістю шкідливих і небезпечних речовин, що викидаються з різноманітних джерел промислових підприємств особливо металургійних. Діюча в Україні система нормування викидів забруднюючих речовин від промислових об'єктів забезпечує встановлення граничної кількості викидів по кожному інгредієнту із застосуванням контролюючими органами економічних, адміністративних і навіть кримінальних чинників покарання за перебільшення встановлених лімітів викидів. Але відсутність постійного оперативного контролю викидів по кожному джерелу дозволяє винним уникнути таких покарань, або здійснювати збільшені викиди у час, коли не працюють лабораторії контролю СЕС та екологічного нагляду. Існуючі методи періодичного контролю за станом викидів забруднюючих речовин, що застосовуються лабораторіями різноманітних контролюючих органів, не дають оперативних результатів, тому що потребують обов'язкового відбору проб з послідувачим їх аналізом і обробкою результатів, і не в повній мірі можуть вважатися показовими, тому що сам відбір проби є втручанням у стан об'єкту аналізу і містить в собі невизначену за кожним разом свою похибку визначення концентрації.

Розробка і створення безперервних методів і технічних засобів контролю концентрацій шкідливих і небезпечних речовин, що викидаються з організованих і неорганізованих джерел промислових підприємств, які б були позбавлені недоліків пробовідбірного методу періодичного контролю і давали змогу організації автоматичного постійного контролю без втручання в потік викидів є невідкладною сучасною проблемою для забезпечення безпечних умов праці і життя

населення нашої країни. Також ця потреба викликана відповідними міжнародними зобов'язаннями, які прийняла на себе Україна, а саме виконання положень Кіотського протоколу потребує проведення постійного безперервного контролю за викидом парникових газів у атмосферу від усіх підприємств країни.

### **Аналіз останніх досягнень і публікацій**

В останні роки задля аналізу газового складу атмосфери були зроблені без пробовідбірні та безреагентні методи контролю, що засновані на наступних фізичних ефектах: диференціального резонансного поглинання (ДРП) [1] і спонтанного комбінаційного розсіяння (СКР) [2], які застосовують лазерні пристрої різноманітної конструкції і дозволяють визначати вміст різних газових домішок з досить великою точністю від одиниці до декількох десятків молекул на мільйон сторонніх [3]. Переваги цих методів у порівнянні з традиційними пробовідбірними очевидні, але створення на їх основі вимірювальних комплексів було мало перспективно внаслідок наступних недоліків: невеликий перелік газових речовин, концентрації яких вони вимірюють, неможливість визначення концентрації і будь-якої інформації про розподіл аерозольних часток (пилу) в атмосфері, яка аналізується.

У більшому ступеню ці недоліки відсутні у газо-аерозольного поляризаційного голографічного лідара [4] в основу функціонування якого покладено метод ДРП, що забезпечує поглинання світлової енергії молекулами газу, що досліджується, при співпадінні частоти випромінювання лазера з частотою електронного або коливально-обертального переходу цих молекул. Для реалізації цього методу проводиться зондування для кожного інгредієнту на двох частотах, одна з яких точно співпадає з резонансною частотою молекул, що досліджуються, а друга – декілька від неї відрізняється (звичайна різниця у довжинах хвиль становить біля 15 нм), що необхідно для врахування впливу на результати вимірів аерозольного і молекулярного розсіяння і поглинання сторонніх речовин. Основним недоліком цього більш перспективного методу є те, що він є ефективним тільки у випадку використання режиму часового накопичення і дозволяє визначити тільки середню концентрацію речовин на усьому протязі проходження лазерного променя, що неприпустимо для оперативного контролю джерел викидів забруднюючих речовин в атмосферу.

### **Постановка задачі та її розв'язання**

Удосконалити метод ДРП для забезпечення контролю повного переліку інгредієнтів, що викидаються в атмосферу промисловими підприємствами України, із забезпеченням визначення концентрації речовин у реальному часі безпосередньо на виході з джерела викидів. Роз-

робити необхідне обладнання для реалізації метода і створити на його основі автоматизований комплекс оперативного контролю.

В наслідок проведених досліджень було встановлено, що частотно-переналагоджуємий  $\text{CO}_2$  – лазер забезпечує можливість послідовного встановлення резонансної частоти поглинання світлового випромінювання в ІЧ – області практично всіх інгредієнтів, що містяться у промислових викидах, і дає змогу за рахунок реалізації методу СКР визначати концентрацію аерозольних часток в аналізуємій зоні.

Вихідне випромінювання частотно – переналагоджуємого  $\text{CO}_2$ -лазера, після проходження модулятора переривача розщеплюється за допомогою плоско-паралельної пластини на дві частини. Відбита частина випромінювання ( $\sim 5\%$  інтенсивності падаючого) реєструється в опорному каналі схеми, що складається з піроелектричного детектору, підсилювача і потенціометра. Частина випромінювання лазера, яка пройшла крізь розщеплювач, спрямовується вздовж траси, після відбиття кутовим відбивачем повертається, збирається і спрямовується у вимірювальний канал за допомогою сферичного дзеркала з великою апертурою (400 мм). Вимірюючий канал схожий з опорним каналом і містить піроелектричний приймач, підсилювач і загальний з опорним каналом потенціометр. Додатково для підвищення чутливості вимірюючого каналу в ньому розташовано синхронний детектор. Двоканальний осцилограф дозволяє візуально спостерігати сигнали в опорному і вимірювальному каналах схеми.

Застосування вище наведеної схеми виміру дозволяє визначати концентрацію вздовж проміні лазера біля сотні інгредієнтів серед яких: оксиди карбону ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), оксиди нітрогену ( $\text{NO}_x$ ), оксиди сульфуру ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ), озон ( $\text{O}_3$ ), аміак ( $\text{NH}_3$ ), гідросульфід ( $\text{H}_2\text{S}$ ), фтор ( $\text{F}_2$ ), хлор ( $\text{Cl}_2$ ), фторид сульфуру ( $\text{SF}_6$ ), метан та його похідні, етан та його похідні, карбогідрогени дієнового ряду, фтор- і хлор- похідні карбогідрогенів (в т.ч. фреони), гідразин і його похідні, бензол і його похідні, бенз-апірен, аерозольні частки та інші речовини із забезпеченням точності визначення концентрації до 0,01 ГДК.

Для уникнення впливу на показник концентрації речовин, що визначається на окремому джерелі, цих же речовин з інших можливих, поряд розташованих джерел та можливості застосування цієї схеми для створення стаціонарного оперативного автоматизованого комплексу, була розроблена оригінальна схема її застосування в промислових умовах.

Застосування двох кутових відбивачів на кожному з джерел викидів дозволяє повністю уникнути загального впливу сусідніх джерел на значення концентрації речовини, що вимірюється на виході з визначеного джерела. Проведена експериментальна перевірка працездатності такого комплексу підтвердила всі його раніше згадані переваги і дозволила встановити, що метод практично не втрачає чутливості навіть при

віддаленості джерела викидів від телескопу на 5 км. Таким чином, реалізація такої схеми дозволяє створити стаціонарний пункт спостереження за викидами забруднюючих речовин в районах з великою кількістю промислових об'єктів при використанні одного лазера і обертального механізму, що буде забезпечувати послідовну орієнтацію проміні на відповідне джерело за визначеною програмою.

Проведені дослідження дозволили створити універсальний автоматизований лазерний комплекс контролю забруднення атмосфери перевагами якого є наступне:

- висока чутливість, точність і вибірковість методу;
- значна відстань зондування атмосфери до 5 км;
- автоматизоване комплексне дослідження джерел викидів;
- великий перелік інгредієнтів, що контролюються;
- малий час виміру концентрацій до 10 сек. на одну речовину;
- відсутність відбору проб викидів;
- можливість формування комп'ютерної бази даних по забруднювачах та інгредієнтах;
- можливість організації стаціонарного пункту спостереження.

### **Висновки**

Проведені теоретичний аналіз і експериментальні дослідження по удосконаленню методу ДРП і створена на його основі експериментальна установка та проведені її випробування дозволили створити автоматизований лазерний комплекс оперативного контролю концентрації забруднюючих речовин на рівні джерела викидів в атмосферу від діючих промислових підприємств.

### **Список літератури**

1. Долгий С. И., Зуев В. В., Смирнов С. В., Шубин С. Ф. ИК лазерные газоанализаторы дифференциального поглощения “ТРАЛ – 3” и “ТРАЛ – 3М” // Оптика атмосферы. – 1991. – Т. 4, № 5. – С. 515–521.
2. Rafi A. S. Application of Raman scattering in remote sensing // Raman Spectroscopy: Sixty Years on. – Amsterdam, etc., 1989. – P. 391–422.
3. Захаров В. М., Костко О. К., Торговичев В. А., Чайнов Э. А. Лазерные методы исследования загрязнений атмосферы. Обнинск, Информац. центр, 1976. – 34 с.
4. Титарь В. П., Шпаченко О. В., Некрасов В. И. Голографический лидар для экологического мониторинга атмосферы // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна / Радіофізика та електроніка. – 2001. – № 513, вип. 1. – С. 151–160.

# ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНОГО ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМ И ТЕКТОНИЧЕСКИМ ДАННЫМ

*Тяпкин О.К.<sup>1</sup>, Пигулевский П.И.<sup>2</sup>*

*1 – Институт проблем природопользования и экологии НАН Украины,  
г. Днепр, Украина*

*2 – Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина*

## **Аннотация**

Показана возможность использования геолого-геофизической информации о системах разломов земной коры при параметризации особенностей структурно-тектонического строения для подготовки основы геоэкологического картирования и последующего мониторинга горно-металлургических регионов. Предложена методика количественной оценки уровня тектонической нарушенности изучаемой территории, позволяющая выделять на общем фоне наиболее природно-нарушенные участки этих регионов.

Ключевые слова: геофизические методы, геоэкологические проблемы, горно-металлургические предприятия, системы разломов земной коры, тектоника.

## **Введение**

При решении практически всех геоэкологических проблем в условиях горно-металлургических регионов существенную роль играет тектонический фактор. Системы разломов земной коры, по существу, определяют всю геоэкологическую обстановку любых территорий: к рекам, сеть которых предопределена системами разломов, тяготеют населенные пункты и крупные промышленные производства; к разломам приурочено абсолютное большинство месторождений полезных ископаемых, при эксплуатации которых на первый план выдвигаются проблема рационального природопользования и связанные с ними природоохранные мероприятия и даже установлены взаимосвязи направлений распространения загрязнения, вызванного перемещением воздушных масс, с особенностями тектонического строения [1]. Однако в современных условиях проведение полномасштабного геоэкологического средне- и крупномасштабного картирования горно-металлургических регионов невозможно из-за недостатка финансирования и необходимости принятия незамедлительных управленческих решений в свете необходимости перехода этих территорий к устойчивому развитию. В этой ситуации применение оперативных и относительно недорогих геофизических методов может существенно повысить качество параметризации особенностей структурно-тектонического (разломно-блокового) строения при подготовке основы геоэкологического картирования и последующего мониторинга исследуемых территорий [2, 3].

## **Постановка задачи**

Для параметризации структурно-тектонических особенностей техногенно нагруженных регионов могут быть использованы известные представления о системах докембрийских разломов, восстановленных по комплексу геолого-геофизических данных [4]. В основу этой параметризации положены общепринятые представления о том, что зонам пересечения разломов соответствуют более «раздробленные» участки земной поверхности, которые в свою очередь более «подвержены» проявлениям опасных природно-техногенных геоэкологических процессов. В связи с этим необходима разработка процедур пространственно-временной обработки и геоэкологической интерпретации геолого-геофизической информации о системах разломов земной коры.

## **Основная часть исследований**

Основой параметризации структурно-тектонических особенностей горно-металлургических регионов является модифицированная карта систем разломов этих территорий, в основу которой положена стандартная методика, подробно описанная в [4]. Модификация ее заключается в изменении подхода к определению горизонтальной мощности разломов. В отличие от геологоразведки, где важно определить горизонтальные границы разломов, как трехмерных геологических тел, к которым приурочены месторождения полезных ископаемых, при решении геоэкологических проблем основное внимание необходимо уделять прослеживанию осевых линий разломов, а не картированию их границ. Конкретизация положения последних возможна только применительно к решению конкретной проблемы (выявление участков опасных проявлений современных экзогенных геологических процессов, выявление направления распространения аварийного загрязнения и др.). Предлагается выполнение пространственного суммирования индикаторов разломов всех систем, приходящихся на единицу площади [5, 6]. При этом важной выявленной особенностью является отсутствие полного совпадения аномалий пространственной плотности даже близких (в геологическом времени) групп индикаторов разломов – особенностей рельефа кристаллического фундамента Украинского щита (УЩ) и современного рельефа поверхности. Выявление аномалий пространственной плотности конкретных групп индикаторов разломов позволяет установить соответствующее формированию указанных индикаторов время активизации этих разломов. Поэтому, в дополнение к изучению «пространственных» особенностей разломно-блокового строения исследуемых территорий, необходимо проводить уточнение полученных данных с учетом активизаций отдельных фрагментов разломов в различные промежутки геологического времени. Критерием выявления активных «активноживущих» разломов является степень отчетливости проявления (интенсивность-

контрастность аномальных эффектов и их линейная протяженность) различных групп их признаков, в каждой из которых в наибольшей степени проявляется определенный этап истории формирования разлома. «Активноживущими» являются фрагменты разломов, которые хорошо проявляются во всех группах признаков [2, 5]. При этом примечательным является то, что выявляемые активные фрагменты разломов располагаются на территории исследований не произвольно, а формируют некие аномальные участки. Так, в частности, на территории Среднеприднепровского блока УЩ активные фрагменты разломов концентрируются над зеленокаменными структурами, над которыми по данным среднемасштабного плотностного моделирования и двумерного моделирование кривых магнитотеллурического зондирования установлена корреляция между зонами электропроводности низов коры и верхней мантии и глубиной залегания поверхности Моховичича. Анализ поведения последней под основными геологическими структурами позволил установить взаимосвязь особенностей формы этой поверхности с тектоническими структурами докембрийского фундамента и осадочного чехла [3].

Результаты параметризации структурно-тектонических особенностей Днепропетровской области были использованы для прогнозирования геоэкологического влияния горно-металлургических предприятий на прилегающие к ним территории (рис. 1). Результаты этих исследований послужили, в частности, основой специальных работ по зонированию территории, которая находится под экологическим влиянием горно-металлургического комплекса Кривбасса, который в целом представляет собой сложную природно-техногенную систему, где продолжительная, интенсивная и односторонняя эксплуатация недр в объединении с функционированием промышленно-городской агломерации без надлежащих мероприятий по охране и восстановлению окружающей среды привела к исчерпанию экологической емкости окружающей среды. В частности, изучена связь проявления опасной современной геодинамики с особенностями разломно-блокового строения юга Кривбасса. По результатам геолого-геофизических работ здесь установлены многочисленные мелкие разломы, разбивающие основную субмеридиональную толщу метаморфических горных пород криворожской серии на блоки, движение которых уже в докембрии обусловили резкие колебания нижней границы железорудной толщи. Здесь выявлен аномальный участок пересечения близких по направлению простирания разломов, в центре которого сконцентрированы основные объекты Ингулецкого ГОКа [2].

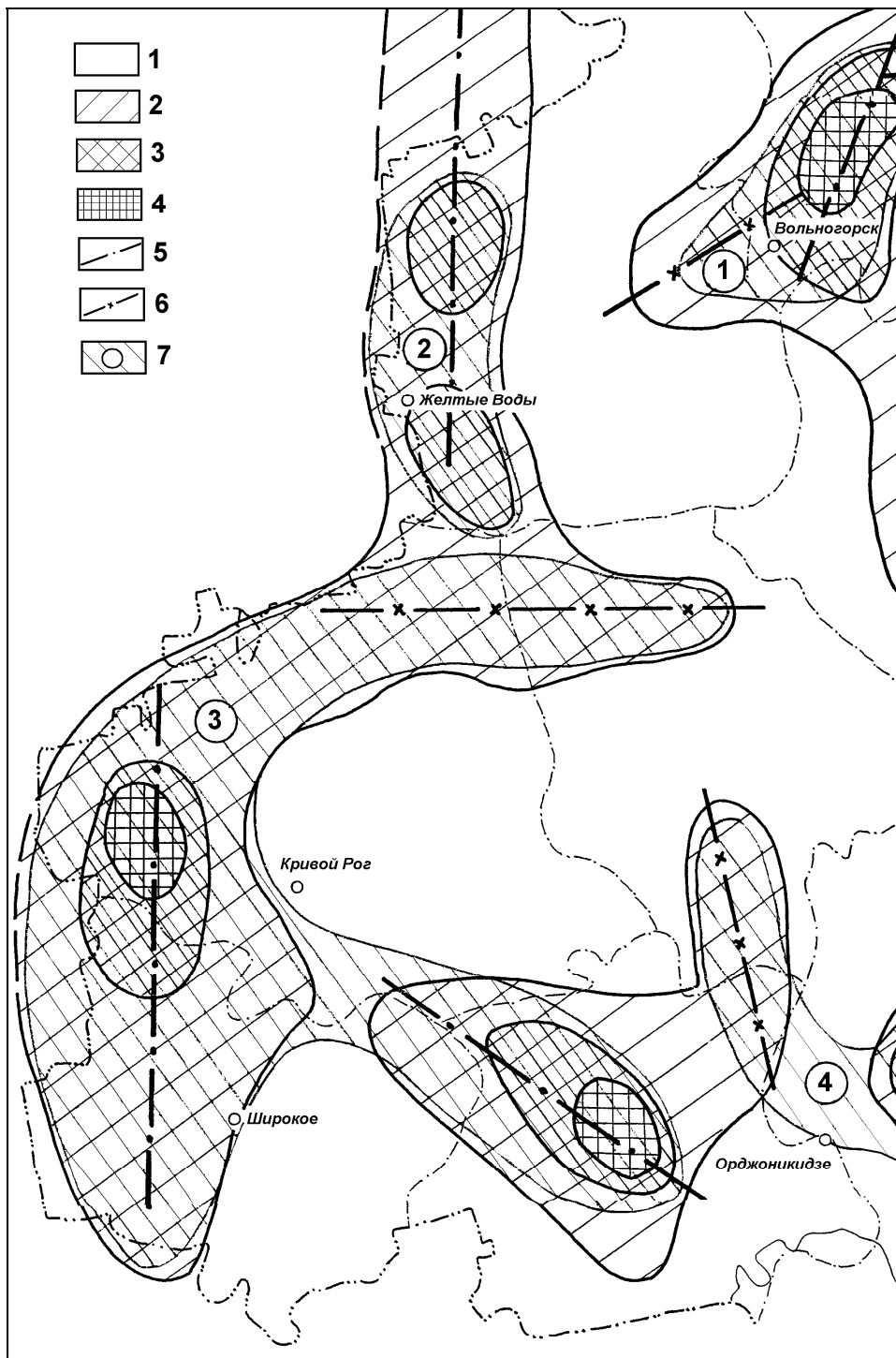


Рис. 1. Фрагмент картосхемы зонирования территории Днепропетровской области с целью определения приоритетных направлений опасных проявлений геоэкологического влияния горно-металлургических предприятий на прилегающие территории.

Зоны потенциально опасных проявлений техногенного влияния на геологическую среду: 1 – незначительное, 2 – слабое, 3 – повышенное, 4 – высокое; структурно-тектонические оси региональной анизотропии геологической среды: 5 – основные, 6 – второстепенные; 7 – зоны потенциально опасного проявления влияния горно-металлургических предприятий на геологическую среду (1 – Вольногорская, 2 – Желтоводская, 3 – Криворожская, 4 – Орджоникидзевская)

По результатам анализа и интерпретации гравиметрических, магнитных и электрометрических наблюдений в пределах этого участка, выявлены многочисленные разрывные тектонические нарушения разной направленности, которые активно влияют на динамику подземных вод, изменение фильтрационных характеристик водных коллекторов, горизонтальную и вертикальную фильтрацию и др. В частности по геоэлектрическим данным установлена фильтрация водного потока, связанная с северо-западной системой разломов, от верховьев пруда-накопителя высокоминерализованных шахтных вод в б. Свистуново в сторону р. Ингулец (с. Новоселовка) и подтвержденная наличием здесь желобообразного прогиба того же направления простирания поверхности водоупора – глины киевской свиты [7].

### Выводы

Исходя из общепринятых представлений о том, что взаимное пересечение активизированных фрагментов разломов увеличивает «раздробленность» приповерхностного слоя земной коры, уменьшая тем самым его устойчивость, для параметризации структурно-тектонических особенностей предложена методика количественной оценки уровня нарушенности изучаемой территории, позволяющая выделять на общем фоне наиболее природно-нарушенные участки горно-металлургических регионов, требующие использования специальных приемов рационального природопользования и, связанных с ними, природоохранных мероприятий.

### Список литературы

1. Tiapkin O. K. Tectonic information for prognostication of directions of dangerous radioactive influence / O. K. Tiapkin // Неделя эколога – 2017 : Доклады междунар. научн. симпоз. – Каменское: ДГТУ. – 2017. – С. 292–296.
2. Тяпкин О. К. Геофизические методы решения геоэкологических задач / О. К. Тяпкин. – Днепропетровск : Монолит, 2006. – 320 с.
3. Тяпкин О. К. К созданию тектонической основы для решения задач природопользования, экологии и техногенной безопасности / О. К. Тяпкин, П. И. Пигулевский // Науковий вісник Національної гірничої академії України. – 2000. – № 4. – С. 67–68.
4. Тяпкін К. Ф. Основи геофізики / К. Ф. Тяпкін, О. К. Тяпкін, М. А. Якимчук. – Київ : «Карбон Лтд», 2000. – 248 с.
5. Тяпкин О. К. Обоснование экотектонической базы решения геоэкологических задач / О. К. Тяпкин // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2009. – №9. – С. 51–56.
6. Шапарь А. Г. Экогеофизические аспекты районирования промышленно и техногенно-нагруженных регионов / А. Г. Шапарь, О. К. Тяпкин // Доповіді Національної академії наук України. – 1999. – № 3. – С. 133–137.
7. Результати використання геоелектричних методів при спостереженнях за станом підземних вод на території південного Кривбасу / П. Г. Пігулевський, В. К. Свистун, О. С. Кирилук, О. К. Тяпкін // ЕКОФОРУМ – 2017. Актуальні проблеми та інновації: Праці міжнародн. наук.-практ. конф. – Івано-Франківськ, 2017. – С. 31–32.

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТАЛЛУРГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ. ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Фриман И.М., Фриман Е.М.*

*Национальная Металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

Исследование экологических проблем металлургии и совершенствование технологий защиты окружающей среды является актуальной задачей современной металлургической промышленности. В работе рассмотрены негативные факторы доменного, сталеплавильного и прокатного производств, отрицательно влияющих на окружающую среду.

Ключевые слова: черная металлургия, неблагоприятная экологическая обстановка, экологический фактор, экологическое законодательство.

## **Вступление**

Современное металлургическое предприятие имеет следующие основные переделы: производство окатышей и агломератов, коксохимическое, доменное, сталеплавильное и прокатное производства. В состав предприятий входят также ферросплавное, огнеупорное и литейное производства. Все они являются источниками загрязнений атмосферы и водоемов. Кроме того, металлургические предприятия занимают большие производственные площади и отвалы, что предполагает отчуждение земель. Концентрация вредных веществ в атмосфере и водной среде крупных металлургических центров значительно превышают нормы.

Неблагоприятная экологическая обстановка наблюдается в таких металлургических городах Украины, Днепр, Никополь, Новомосковск, Запорожье, Камянское и др. Все металлургические переделы являются источниками загрязнения пылью, оксидами углерода и серы.

В доменном производстве выделяются дополнительно сероводород и оксиды азота, в прокатном - аэрозоли травильных растворов, пары эмульсий и оксиды азота. Наибольшее количество выбросов - в коксохимическом производстве. Здесь, кроме перечисленных загрязнителей, можно отметить пиридиновые основания, ароматические углеводороды, фенолы, аммиак, синильную кислоту и др.

На долю предприятий черной металлургии приходится 15 – 20 % общих загрязнений атмосферы промышленностью, что составляет более 10,3 млн. т вредных веществ в год, а в районах расположения крупных металлургических комбинатов – до 50 %. В среднем на 1 млн. т годовой производительности заводов черной металлургии выделение пыли составляет 350, оксида углерода 400, оксида азота – 42 т/сутки.

Черная металлургия является одним из крупных потребителей воды. Водопотребление составляет 12 – 15 % общего потребления во-

ды промышленными предприятиями страны. На охлаждение оборудования используется 49 % воды, очистку газов и воздуха – 26, гидротранспорт – 11, обработку и отделку металла – 12, прочие процессы – 2 % воды.

### **Постановка задачи**

Черная металлургия имеет следующие особенности сырьевой базы:

- сырье характеризуется относительно большим содержанием полезного компонента – 17 % в сидеритовых рудах до 53 – 55 % в магнетитовых железняках. На долю богатых руд приходится почти пятая часть промышленных запасов, которые используются, как правило, без обогащения. Примерно 2/3 руд требуют обогащения простым и 18 % - сложным методом обогащения;

- разнообразие сырья в видовом отношении (магнетитовые, сульфидное, окисленное и др.), что дает возможность использовать разнообразную технологию и получать металл с самыми различными свойствами;

- использование руд, сложных по своему составу (фосфористые, ванадиевые, титаномагнетитовые, хромистые и т.п.).

Важнейшей проблемой сырьевой базы черной металлургии является ее удаленность от потребителя. Размещение предприятий черной металлургии полного цикла зависит от сырья и топлива, на которые приходится большая часть затрат по выплавке чугуна, из них около половины – на производство кокса и 35 – 40 % – на долю железной руды.

Большими объемами производства отличается передельная металлургия, к которой относятся сталеплавильные, сталепрокатные и трубные заводы, специализирующиеся на выплавке стали из чугуна, металлического лома, металлизированных окатышей, производстве стального проката и труб. Заводы, передельной металлургии создаются в крупных центрах машиностроения, где потребности в металле определенных сортов достаточно велики. К передельной металлургии относятся также сталеплавильные заводы, на которых производится особо высококачественная сталь для различных отраслей машиностроения (инструментальная, шарикоподшипниковая, нержавеющая, конструкционная и др.).

### **Основная часть исследования**

Новым направлением развития черной металлургии является создание заводов, для производства стали из металлизированных окатышей, получаемых методом прямого восстановления железа, где достигаются высокие технико-экономические показатели по сравнению с традиционными способами получения металла.

Предприятия малой металлургии размещаются там, где имеются машиностроительные заводы. Выплавка на них производится из привозного металла, металлолома, отходов машиностроения.

В современных условиях все большее влияние на размещение отраслей металлургического комплекса оказывает научно-технический прогресс. С развитием научно-технического прогресса расширяется сырьевая база металлургии в результате совершенствования применения новых, наиболее эффективных технологических схем производства по комплексной переработке сырья. Научно-технический прогресс выступает важным фактором интенсификации отраслей металлургического комплекса.

На нынешнем этапе резко обострилась экологическая обстановка во многих районах Украины, что не может не учитываться в процессе функционирования металлургических предприятий, которые оказывают сильное воздействие на окружающую среду и природопользование, являясь крупными загрязнителями атмосферы, водоемов, лесных массивов, земель.

При современных объемах производства это воздействие весьма ощутимо. Известно, что чем выше уровень загрязнений окружающей среды, тем больше затрат на предотвращение загрязнения. Дальнейший рост этих затрат в конце концов может привести к убыточности любого производства.

Учет экологического фактора при размещении металлургического производства – объективная необходимость в развитии общества. В процессе обоснования развития металлургических предприятий необходимо учитывать весь комплекс факторов, способствующих организации более эффективного производства на той или иной территории, т.е. их совокупное взаимодействие на процессы производства и жизнь населения в регионах.

Металлургическое производство оказывает немалое влияние на окружающую среду из-за выброса в атмосферу продуктов сжигания различных видов топлива при работе доменных печей, переработки шихты в них. При этом в атмосферу поступают двуокись углерода и сероводород, а также пыль с содержанием графита, различных металлов легких и тяжелых (алюминий, сурьма, мышьяк, ртуть, свинец, олово и т. д.) в зависимости от характера и назначения металлургического производства.

Вредными веществами являются оксиды углерода, серы и азота. Ежегодное поступление в атмосферу сернистого газа оценивается специалистами-экологами в объеме 100–150 млн т. С его выбросами связано образование так называемых кислотных осадков, которые наносят большой вред растительному и животному миру, разрушают различные сооружения, памятники архитектуры. Загрязнение окружающей среды металлургическими производствами происходит из-за

сточных вод, в которые попадают различные химические соединения, образующиеся в процессе выплавки металлов. Воду металлургического производства потребляет в больших количествах, поэтому его предприятия всегда сооружают в непосредственной близости от рек и озер или создают специальные гидротехнические сооружения, в которых она накапливается.

В результате такого загрязнения окружающей среды происходит ухудшение здоровья населения, снижается продолжительность жизни, увеличивается смертность. По существующим оценкам, 20 – 50 % продуктов питания содержат ядохимикаты, нитраты, тяжелые металлы в концентрациях, опасных для здоровья. В зоне работы металлургических производств загрязнены источники питьевой воды как поверхностные, так и подземные, особенно после выпадения кислотных дождей. Специалисты – экологи ожидали значительное улучшение экологической обстановки в районах деятельности металлургических производств благодаря конверсии и сокращению объемов выплавки металлов. Однако результаты оказались менее значительными, чем ожидалось, из-за сильной изношенности и оборудования металлургического комплекса и их очистных сооружений. Экологи стали фиксировать массу аварийных выбросов в атмосферу и в водоемы с металлургических производств.

Поддержание экологической безопасности является одной из важнейших проблем современной Украины.

### **Выводы**

В настоящее время в Украине применяются штрафы за загрязнение окружающей среды, предусмотрена уголовная ответственность за нарушение экологического законодательства. К злостным загрязнителям окружающей среды применяются административные санкции вплоть до закрытия предприятий или отдельных производств металлургического комплекса. Решение экологических проблем в металлургическом комплексе, конечно, во многом зависит от инвестиций, позволяющих заменить устаревшее оборудование основных производств и вспомогательных, включая фильтры и очистные сооружения.

### **Список литературы**

1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 01.07.1991 р. (ред. від 04.06.2017р.)
2. Акименко Т. А., Хачко В. В. Основы экологического развития. Учебное пособие. – Харьков : Наука и техника 2013. – 312 с.
3. Голуб А. А., Струкова Е. Б. Экономические методы управления природопользованием. – М. : Наука, 2011. –136 с.
4. Кучерук Н. Г. Экономика природопользования. Учебн. пособие для вузов. – Николаев : Дело, 2012. –342 с.

# ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СПІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ БІОМАСИ ТА ВУГІЛЛЯ В КОТЕЛЬНИХ АГРЕГАТАХ

*Шишко Ю.В.<sup>1</sup>, Жмуренко В.Г.<sup>2</sup>, Сергєєв В.В.<sup>3</sup>, Хансйорг Дітше<sup>4</sup>*

*1 – Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

*2 – Дніпропетровська торгово-промислова палата, м. Дніпро, Україна*

*3 – Федерація організацій роботодавців Дніпропетровщини, м. Дніпро, Україна*

*4 – GIZ Україна, програма сприяння зеленій модернізації української економіки,  
м. Луцьк, Україна*

## **Анотація**

Виявлені найбільш екологічно сприятливі режими роботи та параметри ведення процесів при спалюванні паливної суміші з біомаси і бурого вугілля у парових й водогрійних котлоагрегатах. Розрахунки були проведені, приймаючи до уваги специфічні властивості і характеристики вихідних ресурсів.

Ключові слова: парові та опалювальні котли, біомаса, буре вугілля, викиди забруднюючих речовин, оксид азоту, діоксид сірки, бенз(а)пірен.

## **Вступ**

Розробка нових маловитратних технологій спільного використання біомаси та вугілля, впровадження цих технологій в нові або вже існуючі енергоустановки, дасть можливість істотно знизити споживання викопних палив (вугілля, газ) та отримувати енергію з більш низькою собівартістю.

Біомаса спільно з бурим вугіллям може перероблятися термохімічними способами (газифікація, піроліз) для отримання газоподібного енергоносія або піддаватися прямому спалюванню.

При використанні паливної суміші з вугілля та біомаси спостерігається істотне скорочення емісії парникового газу, оксидів сірки та азоту в навколишнє середовище[1, 2].

## **Постановка задачі**

Метою даної роботи є виявлення ступеня впливу визначальних факторів сумісної термічної обробки біомаси та бурого вугілля на інтенсивність утворення забруднюючих і токсичних речовин.

## **Основна частина досліджень**

Для визначення впливу режимних параметрів спільної термічної обробки бурого вугілля та біомаси на економічну й екологічну ефективність процесів та отримання ефективних співвідношень часток біомаси та вугілля у твердопаливній суміші була проведена низка розрахункових досліджень. Розрахунки проводились за методикою [3], яка надає можливість вивчення впливу технологічних і режимних па-

раметрів спільної термічної обробки вугілля та біомаси на екологічну ефективність процесів з метою контролю кількості викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, а також планування робіт по зниженню викидів. Дана методика призначена для визначення викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря з димовими газами котлоагрегатів паропродуктивністю до 30 т/год і водогрійних котлів потужністю до 25 МВт (20 Гкал/год) розрахунковим шляхом при спалюванні твердого та газоподібного палива.

Для котлів, обладнаних топками з нерухомою, ланцюговою решіткою, з пневмомеханічним закидачем і для шахтних топок з похилими решітками сумарна кількість оксидів азоту  $\text{NO}_x$  в перерахунку на  $\text{NO}_2$ , що викидаються в атмосферу с димовими газами, визначається за формулою:

$$M_{\text{NO}_x} = V_p \cdot Q_i^r \cdot K_{\text{NO}_2}^m \cdot \beta_r \cdot k_n, \quad \text{г/с}, \quad (1)$$

де  $V_p$  – розрахункова витрата палива, кг/с;

$K_{\text{NO}_2}^m$  – питомий викид оксидів азоту при спалюванні твердого палива в шарі, г/МДж;

$\beta_r$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рециркуляції димових газів, які подаються в суміші з дуттевим повітрям під колосникові ґрати, на утворення оксидів азоту [3].

Концентрація бенз(а)пірену,  $\text{мг/м}^3$ , у сухих продуктах згоряння генераторного газу на виході з топкової зони промислових котлів малої потужності при значеннях коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha''_T = 1,08 \div 1,25$  визначається за формулою:

$$C_{\text{бп}}^r = 10^{-3} \cdot \frac{0,59 + 0,079 \cdot 10^{-3} \cdot q_v}{e^{3,8 \cdot (\alpha''_m - 1)}} \cdot K_d \cdot K_p \cdot K_{\text{ст}}, \quad (2)$$

де  $q_v$  – теплова напруга топкового об'єму, кВт/м<sup>3</sup>;

$K_d$  – коефіцієнт, що враховує вплив навантаження котла на концентрацію бенз(а)пірену у продуктах згоряння[3];

$K_p$  – коефіцієнт, що враховує вплив рециркуляції димових газів на концентрацію бенз(а)пірену у продуктах згоряння[3];

$K_{\text{ст}}$  – коефіцієнт, що враховує вплив ступеневого спалювання на концентрацію бенз(а)пірену у продуктах згоряння [3].

### Результати досліджень

Для визначення ефективного співвідношення часток біомаси та бурого вугілля при спалюванні твердопаливної суміші були розраховані значення масових часток оксидів азоту та бен(а)пірену за формулами (1) та (2), приймаючи наступні співвідношення бурого вугілля до біомаси: 75 : 25 %, 80 : 20 %, 85 : 15 %, 90 : 10 %, 95 : 5 %. Відсоткові співвідношення приймаються з точки зору теплотворної здатності складових паливної суміші. Результати розрахунків наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Значення масових викидів оксидів азоту та бенз(а)пірену в залежності від співвідношення часток біомаси та бурого вугілля

Масова частка біомаси, %	Значення масового викиду			
	Оксиди азоту		Бенз(а)пірен	
	Водогрійний котел, г/с	Паровий котел, г/с	Водогрійний котел, $\times 10^{-4}$ г/с	Паровий котел, $\times 10^{-4}$ г/с
25	3,23	5,17	1,04	1,52
20	3,21	5,14	1,02	1,5
15	3,19	5,11	1,01	1,47
10	3,17	5,08	0,98	1,45
5	3,15	5,05	0,97	1,42

Для більш детального аналізу отриманих значень представимо результати розрахунків у вигляді графічних залежностей. Значення масових викидів оксидів азоту в залежності від співвідношення часток біомаси та бурого вугілля наведені на рис. 1.

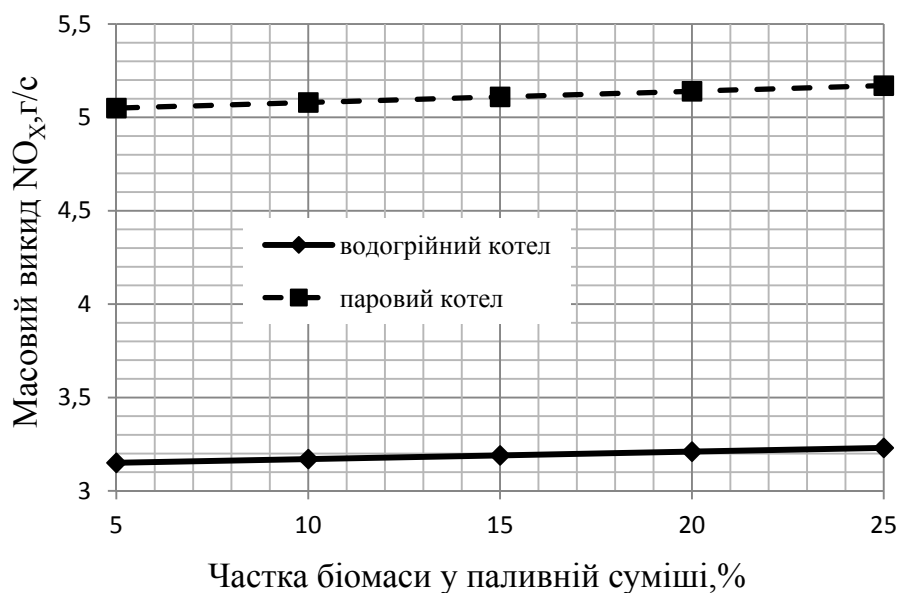


Рис. 1. Значення масового викиду оксидів азоту в залежності від співвідношення часток біомаси та бурого вугілля

Значення масових викидів оксидів азоту в залежності від співвідношення часток біомаси та бурого вугілля наведені на рис. 2.

Проаналізувавши отримані дані та прийнявши до уваги специфічні властивості біомаси, особливо її шлакуючі та корозійні властивості, можна прийти до висновків, що доцільно обмежити частку використання біомаси в суміші з вугіллям в одній установці у межах 5 – 10 % по теплу.

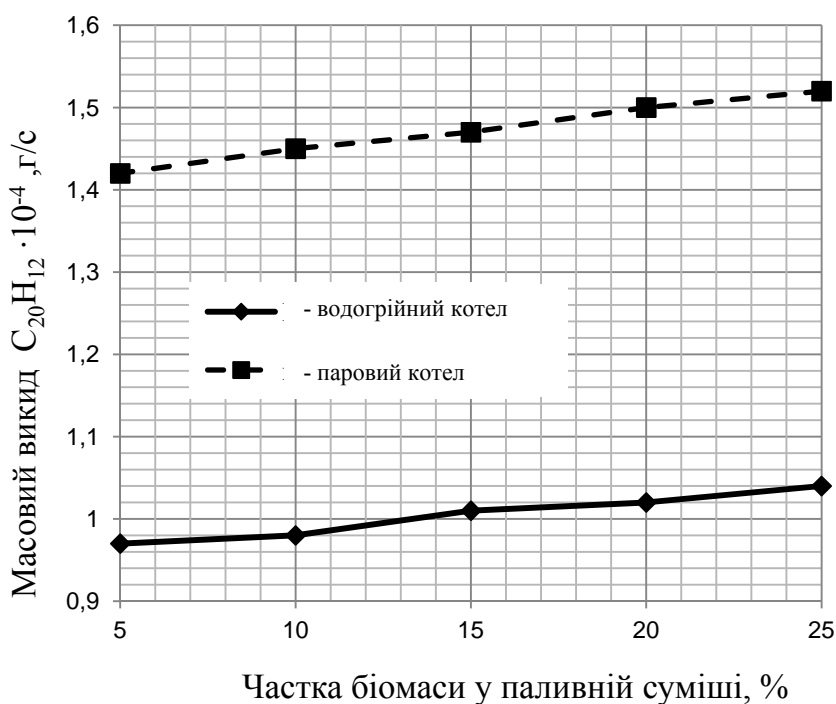


Рис. 2. Значення масового викиду бенз(а)пірену в залежності від співвідношення часток біомаси та бурого вугілля

### Висновки

Впливаючи на режимно-технологічні параметри спалювання твердопаливної суміші з біомаси та бурого вугілля, можна впливати на значення масових часток забруднюючих та токсичних речовин. Основними факторами впливу є: коефіцієнт витрати повітря, локальні температурами в камері згоряння, температура повітря на вході в камеру згоряння, частка рециркуляції димових газів в зону горіння, температура димових газів на виході з котлоагрегатів.

При спалюванні твердопаливної суміші, долю біомаси у суміші доцільно приймати близько 10 % за теплотворною здатністю.

### Список літератури

1. Кузнецов Б. Н. Некоторые актуальные направления исследований в области химической переработки древесной биомассы и бурых углей. – Химия в интересах устойчивого развития 9 (2001). – С. 443–459.
2. Лунаева О. В., Горда В. И., Матлак Е. С. Основы практической теории предотвращения образования токсичных продуктов при термической утилизации твердых бытовых отходов // Наук. Пр. Донецк. нац. техн. ун-та. Сер. Хімія і хімічна технологія. – 2005. – Т. 174, вип. 95. – С. 117–123.
3. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 т/ч пара или менее 20 Гкал/ч // Разраб. НИИ Атмосфера, ВТИ, ЭНИН и ООО "Импульс-Холдинг". Утв. 09.07.1999 г.

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА ВЫБРОСЫ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ СМЕСИ

*Шишко Ю.В.<sup>1</sup>, Усенко А.Ю.<sup>1</sup>, Китач Е.И.<sup>2</sup>*

*1 – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

*2 – Криворожский коксохимический техникум НМетАУ,  
г. Кривой Рог, Украина*

## **Аннотация**

Получена серия численных значений и графических зависимостей, характеризующих изменяющиеся значения массы загрязняющих веществ в зависимости от технологического режима при совместном использовании бурого угля и биомассы.

Ключевые слова: паровой котел, водогрейный котел, биомасса, бурый уголь, оксид азота, диоксид серы, бенз(а)пирен, диоксин.

## **Введение**

Ограниченность сырьевой базы ископаемых топлив, а также, тенденции к интенсификации процессов энергопотребления, стали причиной поиска новых альтернативных источников энергии и способов повышения эффективности их использования. Одним из перспективных направлений является частичная замена ископаемых топлив биомассой. Помимо решения экономических задач энергетики, эти мероприятия производят положительный экологический эффект – при использовании топливной смеси угля и биомассы наблюдается существенное сокращение эмиссии парникового газа, оксидов серы и азота в окружающую среду.

## **Постановка задачи**

Рассматривая возможные варианты энергетического использования биомассы, было принято во внимание, что по своим энергетическим характеристикам (несмотря на имеющиеся специфические особенности, которые необходимо учитывать при выборе технических решений по энергетическому использованию) наиболее близким, уже освоенными для эффективного использования, топливным ресурсом является бурый уголь марки Б1 ( $W_r \geq 40\%$ ).

Совместная термическая переработка угля и биомассы для производства тепловой и электрической энергии имеет ряд преимуществ: снижается использование дефицитных ископаемых топлив; достигается более высокая эффективность использования имеющегося тепла топлива; решается проблема сезонности поставок топлива; снижается эмиссия выбросов оксидов серы, азота, аэрозолей; снижается средняя стоимость производимой энергии; сокращается выброс парникового углекислого газа; осуществляется утилизация биомассы [1, 2].

Несмотря на очевидные преимущества совместной термической переработки угля и биомассы существует острая необходимость дальнейшего изучения и совершенствования уже существующих технологий переработки (прямое сжигание, газификация, пиролиз) и поиск новых. Причиной этому стало то, что эти процессы не были рассмотрены с точки зрения уменьшения образования загрязняющих веществ и нейтрализации выбросов токсичных веществ. К наиболее опасным токсичным веществам относят диоксины (полихлорированные дибензо-пара-диоксин), фураны (полихлорированные дибензофураны) и бенз(а)пирен. Мониторинг и контроль загрязняющих веществ является одной из главных задач при производстве энергии.

Наиболее эффективными в области деструкции токсичных веществ считаются термические технологии, при которых основными являются тепловое воздействие, нагрев и окисление при температурах 1100 – 1200 °С, дожигание в специальных печах, уничтожение с помощью инфракрасного нагрева, уничтожение в высокоэффективном электрическом реакторе (fluidwall destruction), окисления суперкритической водой [2].

### **Основная часть исследований**

В данной работе было проведено исследование влияния технологических и режимных параметров совместного использования угля и биомассы на экологическую эффективность процессов с целью контроля количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, а также планирование работ по снижению выбросов, с использованием методики [3]. Данная методика предназначена для определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух с дымовыми газами котлоагрегатов паропроизводительностью до 30 т/ч и водогрейных котлов мощностью до 25 МВт (20 Гкал/ч) расчетным путем при сжигании твердого и газообразного топлива.

Определение выбросов загрязняющих веществ проводилось на основе расчета массовой концентрации вещества. Метод является универсальным, так как позволяет оценить содержание в продуктах сгорания как твердых (бенз(а)пирен), так и газообразных компонентов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ). В работе было рассмотрено влияние условий и параметров работы котельных агрегатов при работе их на смеси угля и биомассы на выбросы бенз(а)пирена.

Определяющими факторами, которые влияют на количество загрязняющих веществ, выделяемых при термообработке, являются: элементный состав сжигаемого топлива, его качество и состояние, конструктивные характеристики котлоагрегатов, а также режимные параметры ведения процесса. В ходе расчета осуществлялось варьирование определяющих параметров для выявления их влияния на концентрацию бенз(а)пирена, который образуется во время процесса сжигания топлива.

За основу для расчета количества загрязняющих выбросов были взяты технологические характеристики водогрейного котла КВ-ГМ-6,5 и парогенератора ДЕ-10-14ГМ. Для определения значений массовых выбросов загрязняющих и токсичных веществ, образующихся при сжигании, были предварительно рассчитаны основные энергетические параметры топливной смеси из бурого угля и биомассы.

Согласно методике [3] масса выброса бенз(а)пирена (г/с) рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{БП}} = B \cdot V_{\text{СДГ}} \cdot c_{\text{БП}} \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где  $B$  – расход топлива, кг/с ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $c_{\text{БП}}$  – концентрация бенз(а)пирена в сухом дымовом газе, приведенная к коэффициенту избытка воздуха  $\alpha''_{\text{м}} = 1,4 \text{ мкг}/\text{м}^3$ , определяется в зависимости от вида сжигаемого топлива;  $V_{\text{СДГ}}$  – объем сухих дымовых газов при  $\alpha''_{\text{м}} = 1,4 \text{ м}^3/\text{кг}$  ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ).

В свою очередь, концентрация бенз(а)пирена в сухих дымовых газах котлов малой мощности при слоевом сжигании твердых топлив  $c_{\text{БП}}$  ( $\text{мг}/\text{нм}^3$ ), приведенная к избытку воздуха в газах  $\alpha''_{\text{м}} = 1,4 \text{ мкг}/\text{м}^3$ , определяется по зависимости [3]:

$$C_{\text{БП}}^{\text{м}} = 10^{-3} \cdot \left( \frac{A \cdot Q_i^{\text{r}}}{e^{2,5 \cdot \alpha''_{\text{т}}} + t_{\text{н}}} + \frac{R}{t_{\text{н}}} \right) \cdot K_{\text{д}} \cdot K_{\text{зу}}, \quad (2)$$

где  $A$  – коэффициент, характеризующий тип колосниковой решетки и вид топлива;  $t_{\text{н}}$  – температура насыщения при давлении в барабане паровых котлов или на выходе из котла для водогрейных котлов;  $R$  – коэффициент, характеризующий температурный уровень экранов;  $K_{\text{д}}$  – коэффициент, учитывающий нагрузки котла;  $K_{\text{зу}}$  – коэффициент, учитывающий степень улавливания бенз(а)пирена золоуловителем [3].

### Результаты исследований

Влияние относительной нагрузки котла на массовый выброс бенз(а)пирена при совместном сжигании биомассы и бурого угля для паровых и водогрейных котлоагрегатов представлено на рис. 1.

С увеличением относительного нагрузки котла имеет место уменьшение значения коэффициента  $K_{\text{д}}$ , в свою очередь, с уменьшением коэффициента  $K_{\text{д}}$  снижается массовый выброс бенз(а)пирена в продуктах сгорания котлоагрегата.

Таким образом, наиболее приемлемой нагрузкой котла при сжигании твердотопливной смеси является режим работы, близкий к номинальному.

С увеличением степени очистки газов в золоуловителях при сжигании твердых топлив в парогенераторах и водогрейных котлах имеет место уменьшение количества массового выброса бенз(а)пирена. Причем, значение массового выброса бенз(а)пирена водогрейного котла значительно ниже значения массового выброса парового котлоагрегата.

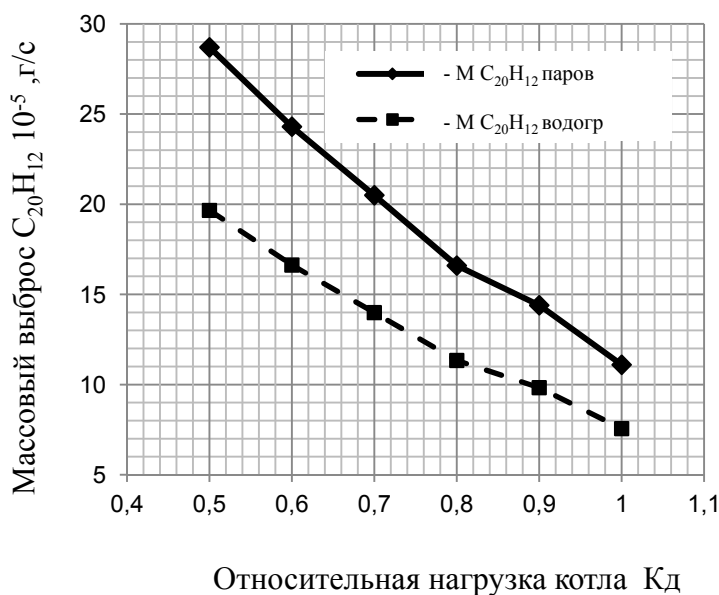


Рис. 1. Влияние относительного нагрузки котла на массовый выброс бенз (а) пирена

Влияние степени очистки газов в золоуловителе на массовый выброс бенз(а)пирена для паровых и водогрейных котлоагрегатов представлено на рис. 2.

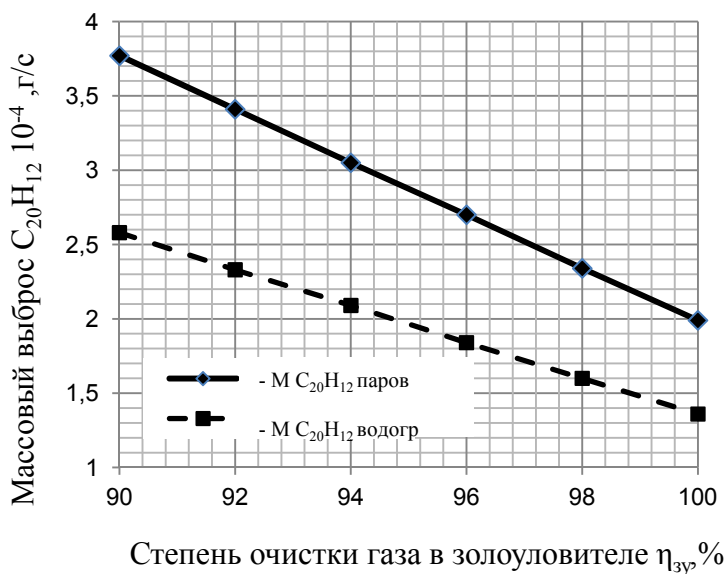


Рис. 2. Влияние степени очистки газов в золоуловителе на массовый выброс бенз (а) пирена

Влияние температуры газов перед золоуловителем на массовый выброс бенз(а)пирена для паровых и водогрейных котлоагрегатов представлено на рис. 3. Коэффициент  $z$  – параметр, учитывающий снижение способности улавливания золоуловителей бенз(а)пирена в зависимости от температуры (чем выше температура, тем больше значение  $z$ ). Из полученных данных видно, что эффективность сухого золоуловителя ниже, чем у мокрого.

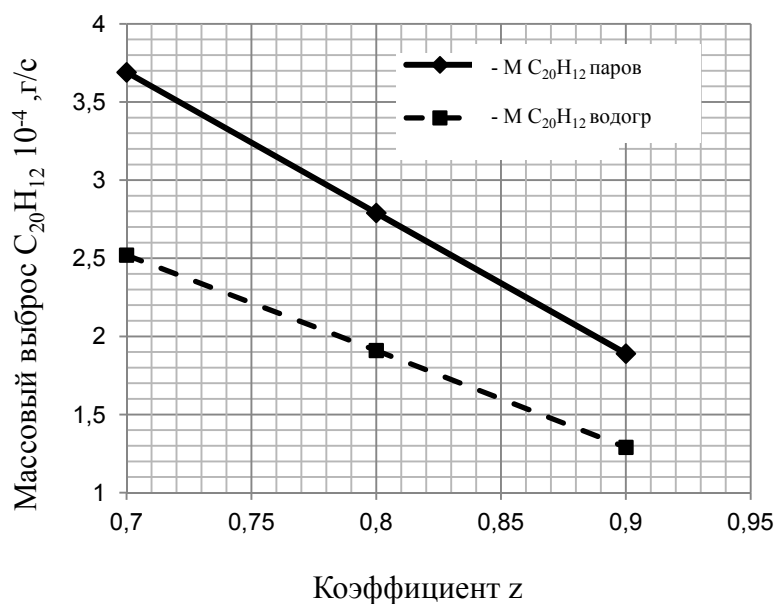


Рис. 3. Влияние температуры газов перед золоуловителей на массовый выброс бенз(а)пирена

Также на эффективность очистки газа оказывает непосредственное влияние температура газов перед золоуловителем, при значении данных температур в диапазоне от 185 °С и выше коэффициент эффективности возрастает, что почти в 2 раза уменьшает долю массового выброса бенз(а)пирена.

Влияние температуры насыщения на массовый выброс бенз(а)пирена для паровых и водогрейных котлоагрегатов представлено на рис. 4.

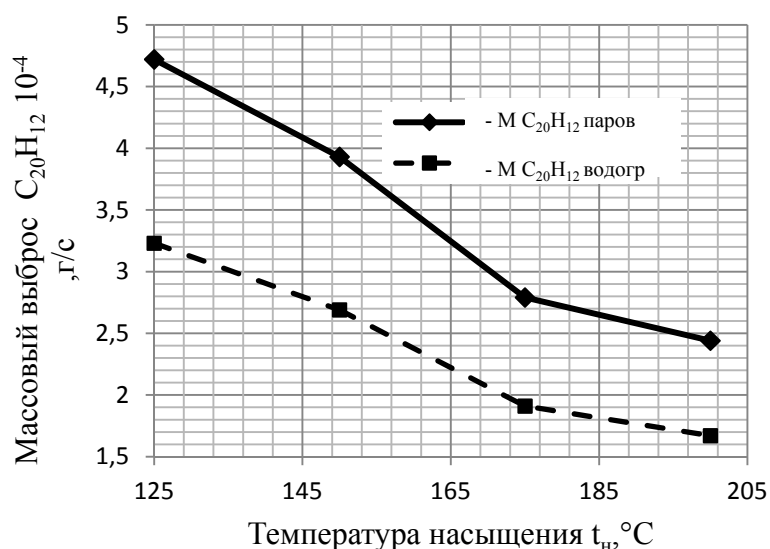


Рис. 4. Влияние температуры насыщения на массовый выброс бенз(а)пирена

С повышением температуры насыщения при давлении в барабане паровых котлов или на выходе из котла для водогрейных котлов наблюдается уменьшение массового выброса бенз(а)пирена с дымовыми газами котлоагрегата. При повышении  $t_H$  на каждые 25 °С массовый выброс бенз(а)пирена сокращается в ~ 1,3 раза: при повышении  $t_H$  от 125 до 150 °С массовый выброс сократился в 1,2 раза, от 150 до 175 °С – в 1,4 раза, от 175 до 200 °С – в 1,14 раза.

### **Выводы**

Для определения влияния режимных параметров совместного использования бурого угля и биомассы на экономическую и экологическую эффективность процессов был проведен ряд расчетных исследований. На основании проведенных расчетов рекомендуются для применения следующие параметры сжигания твердотопливной смеси: коэффициент избытка воздуха  $\alpha > 1,25$ ; относительная нагрузка котла не менее 80 %; температура газов перед золоуловителем  $\geq 185$  °С; степень очистки газов в золоуловителе  $> 95$  %; температура насыщения 150 – 200 °С; тип золоуловителя – мокрый.

Полученные результаты исследования позволяют спрогнозировать расчетным путем значения массовых выбросов загрязняющих и токсичных веществ при наличии технологических характеристик котлоагрегатов и элементного состава топлива, выявить методы воздействия на активность образования загрязнителей и оценить их целесообразность с точки зрения экономических показателей.

### **Список литературы**

1. Грачев А. Н. Разработка методов расчета технологии и оборудования пиролизной переработки древесины в жидкие продукты. Автореферат диссертации на соискание научной степени доктора технических наук, Казань, 2011.
2. Кузнецов Б. Н. Катализ химических превращений угля и биомассы. – Новосибирск : Наука, 1990. – 302 с.
3. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 т/ч пара или менее 20 Гкал/ч // Разраб. НИИ Атмосфера, ВТИ, ЭНИН и ООО "Импульс-Холдинг". Утв. 09.07.1999 г.

# ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ НЕЙТРАЛІЗАТОРІВ НА АВТОМОБІЛЯХ ЗАСТАРІЛОЇ КОНСТРУКЦІЇ

*Шмандій В.М., Харламова О.В., Ригас Т.Є., Знайко В.Ю.*

*Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського,  
м. Кременчук, Україна*

## **Анотація**

Проведено експериментальні дослідження на моторному стенді для виявлення закономірностей утворення сажі у вихлопних газах залежно від потужності двигуна та визначення її концентрацій. Встановлено, що використання каталітичного нейтралізатора на автомобілях застарілої конструкції дозволяє знизити вміст сажі на 30 %, а також зменшує викиди оксиду вуглецю. Констатовано зниження рівня екологічної небезпеки без суттєвих змін конструкції автомобіля.

Ключові слова: екологічна небезпека, каталітичний нейтралізатор, автотранспортний засіб, шкідливі речовини.

## **Вступ**

В Україні, як і в усьому світі, в останні роки спостерігається зростання кількості автомобілів. Саме відпрацьовані гази автомобілів дають на сьогодні від 80 % до 90 % забруднення атмосферного повітря у великих містах і мегаполісах [1].

## **Постановка задачі**

Проблема забруднення довкілля вихлопними газами автомобілів є глобальною. Аналіз шкідливих компонентів, що входять до складу відпрацьованих газів, а також методів їх знешкодження дозволяє обрати найбільш ефективний шлях для вирішення проблеми зниження рівня забруднення довкілля. Відпрацьовані гази являють собою складну суміш речовин, що залежить від цілої низки чинників, зокрема від конструктивних особливостей та режиму роботи автомобіля та його двигуна.

Однією із найбільш токсичних сполук, що негативно впливають на здоров'я людей, флору і фауну, є сажа. Вона може викликати незворотні зміни і навіть загибель біоти. Частинки сажі достатньо малі, щоб проникати глибоко в легені під час дихання, у той час являючи собою сорбент.

Крім сажі у відпрацьованих газах дизельного автомобіля містяться домішки паливно-масляного аерозолі, продукти зносу двигуна, мінеральні речовини, що надійшли в циліндри двигуна з паливом та повітрям, інші речовини, які можуть бути затримані фільтруючим матеріалом. Однак кількість цих речовин незначна в порівнянні з масовим вмістом сажових часток у відпрацьованих газах. Особливо гостро

стоїть питання по відношенню до автомобілів, оснащених двигунами застарілого типу.

### **Основна частина досліджень**

Нами [2] проведено аналіз складу автотранспортних засобів та вимог стандартів техногенної безпеки автомобілів, а також аналіз антропогенного впливу сажі, що міститься у вихлопних газах автомобілів, встановлення шкідливих речовин, що адсорбуються на поверхні сажових часток. Виявлено негативний вплив на людину, тварин, рослини та клімат, що обумовлює актуальність нашого дослідження. Результати дослідження автопарку у м. Кременчуці виявили невідповідність вимогам стандартів техногенної безпеки автомобілів через значний відсоток застарілих автотранспортних засобів.

Аналіз літературних джерел з проблем зниження вмісту сажі у вихлопних газах автомобілів, оснащених дизельним двигуном, показав, що раціональним методом є каталітичний. Експериментальні дослідження були проведені нами на моторному стенді для виявлення закономірностей вмісту сажі у вихлопних газах залежно від потужності двигуна та визначення концентрацій сажі у вихлопних газах. Встановлено, що використання каталітичного нейтралізатора на основі солей платини дозволяє знизити вміст сажі на 30 %, а також зменшує викиди оксиду вуглецю. Таким чином, має місце зниження рівня екологічної небезпеки без суттєвих змін конструкції автомобіля.

### **Висновки**

Отже використання каталітичного аналізатора дозволяє значно знизити викид сажі у відпрацьованих газах дизельних автомобілів, особливо під час роботи двигунів внутрішнього згорання на режимах холостого ходу та часткових навантажень без внесення суттєвих змін до конструкції двигуна, що є економічно вигідним.

### **Список літератури**

1. Гутаревич Ю. Ф., Зеркалов Д. В. та ін. Екологія автомобільного транспорту. Навчальний посібник. –Київ : Основа, 2002. – С. 122–144, 158–160.
2. Чернобривцева М. А., Магда А. С., Харламова О. В., Черненко С. М. Зменшення вмісту сажі у вихлопних газах автомобілів при застосуванні методів нейтралізації // Тези науково-практ. конф. Всеукр. студ. конкурсу з галузі «Екологія та екологічна безпека». – Полтава : ПолтНТУ, 2017. – С. 61.

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ И СОЦИАЛЬНОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

*Шматков Г.Г.*

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,  
г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

Рассмотрена проблема экологической социальной ответственности. Доказано, что обеспечение и формирование социальной ответственности возможно только на базе индивидуальной экологической ответственности каждого человека.

Ключевые слова: экологическая ответственность, социум, человек, экологическая этика, окружающая среда.

## **Введение**

Проблема индивидуальной и социальной экологической ответственности является весьма актуальной, так как именно она отражает проблемы экологической этики [1].

Индивидуальная экологическая ответственность – форма проявления экологического сознания, которое формируется в процессе образования и воспитания человека [2].

Социальная ответственность (social responsibility) – ответственность общества (организации, предприятия) за воздействие своей деятельности на человека и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое: содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества; учитывает ожидания заинтересованных сторон; соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения; интегрировано в деятельность всей организации и применяется в ее взаимоотношениях [3].

## **Постановка задачи**

Проблему социальной ответственности, на наш взгляд, нельзя рассматривать, не учитывая двойственность, дуализм, её носителя – Человека.

## **Исследование**

Дуализм заключается в том, что Человек, безусловно, продукт социума, конкретнее той его этнической и культурной формации, в котором он родился и развивался в течение всей своей индивидуальной жизни, но с другой стороны, Человек яркий представитель и продукт живой формы движения материи, точнее, её животной части. С этой стороны он носитель всех свойств, характерных для живой материи: его генетический код абсолютно идентичен генетическому коду

любого живого существа, его физиологические свойства и особенности обмена веществ ничем не отличаются от таковых у любого животного. У Человека те же базовые инстинкты поведения, что и у животных и эти особенности развивались у человека в течение сотен миллионов лет, как у представителя класса млекопитающих и более 2-х миллионов лет, как у представителя рода *Homo* – Человек.

Безусловно, что эти его животные особенности и животные инстинкты не могут не влиять и на поведение в социуме, то есть, как элемента конкретной общественной формации.

Но, кардинальным отличием Человека от животного является то, что Господь БОГ наделил его сознанием, самосознанием, способностью познавать природу и приспособлять её к своим потребностям. Здесь проявилось ещё одно важное противоречие: между человеком и природой.

Пока поведение человека в первобытных общественных формациях основывалось на животных инстинктах, то он существовал в полной гармонии с природой, используя, но не разрушая, её био- и геоценозы.

Но, общественные формации развивались и усложнялись и им потребовались новые ресурсы, и чем сложнее становился социум, тем больше ему требовалось природных ресурсов.

Для своего самосохранения, а это одно из основных свойств любого живого организма, общество стало формировать свои требования к поведению её членов, то, что мы называем законами. Безусловно, что эти требования, зачастую противоречат животным инстинктам Человека. Именно поэтому общество сформировало понятие социальной ответственности, то есть ответственности отдельного Человека перед обществом.

Эти противоречия: интересы общества и интересы отдельной особи, основываются на чувстве социальной ответственности, присущему только Человеку: ответственность каждого отдельного Человека перед всеми (обществом) и ответственность общества перед каждым отдельным человеком.

Но, мы не можем не говорить ещё об одном противоречии: противоречии между естественной природной (неживой и живой) средой и социумом.

И здесь мы видим полную дисгармонию. Всё возрастающие потребности отдельного человека и естественно, социума в целом, приводят к деградации и разрушению естественных биогеоценозов. За последние 300 лет технического прогресса исчезли тысячи видов растений и животных. Техногенный пресс, в местах своего наиболее сильного давления (горно-металлургический комплекс) изменил и разрушил земные недра, уничтожил тысячи малых рек, разрушил плодородный слой почв, изменил рельеф.

О гармоничной ноосфере, в понимании В.И Вернадского [4], приходится только мечтать.

Это противоречие между природой и социальной средой, на наш взгляд требует так же ответа об ответственности самого социума перед его членами, ведь такая деятельность социума ухудшает условия существования его членов – загрязнение атмосферы и поверхностных вод, почв, что ведёт к снижению рождаемости, увеличению смертности, росту врождённых и генетических заболеваний, ведь разрушение природной среды ставит под угрозу существование самого социума.

Одной из причин этого является то, что Человек придумал и вбил себе в голову понятие «окружающая среда», что совершенно не отражает истинной ситуации. В этом понятии, Человек и среда присутствуют как бы независимо друг от друга, а значит, Человек не несёт ответственности за её состояние. На самом деле Человек это элемент природной среды, он полностью зависит от неё, её качества и её ресурсов. Воздух, вода, вещества природы формируют человека, определяют его иммунитет, здоровье, условия жизнедеятельности. Природа прекрасно существовала без Человека и прекрасно будет существовать без Человека.

Именно условия природной среды формируют социум. Поэтому безответственное отношение к природной среде является по существу, безответственным отношением к обществу.

Деятельность социума складывается из деятельности отдельных её членов, то есть сложившееся противоречие «Общество – природная среда» определяется деятельностью каждого члена общества.

И здесь мы можем наблюдать, как животные инстинкты Человека, такие как инстинкт сохранения рода, инстинкт самосохранения, инстинкт заботы о потомстве и т.д. прекрасно работают на уровне семьи, самой нижней ячейки (подсистемы) такой сложной суперсистемы, как социум и в тоже время эти инстинкты совершенно не работают на более высоких уровнях организации социума.

Вот простые примеры: человек в своей квартире, в своём доме, в своей частной ойкумене, поддерживает порядок и чистоту, заботится о питании и здоровье членов семьи. Здесь работают его животные инстинкты, хотя человек думает, что он действует совершенно сознательно. Но, вот Человек выходит из своего дома и выбрасывает мусор в скверах, посадках и т.д. Сколько раз мы видели, как владельцы автомобилей моют свои автомобили на берегу рек, выбрасывают аккумуляторы на свалки и т.д. В таких случаях уже работают не инстинкты, а сознание, и человек, отравляя и разрушая природную среду, действует совершенно сознательно, но без понимания трагичных последствий его деятельности.

Но, ведь не даром, Барри Коммонер [5], сформулировав основные законы экологии, чётко показал, что всё связано со всем и что всё выброшенное, токсичное и опасное, не остаётся на месте и перемещается в круговороте веществ в природе и, в конечном итоге, наносит непоправимый вред всем членам социума, в том числе и членам семьи этого человека.

Когда Человек приходит на производство, где работает на благо семьи и социума, он, к сожалению, совершенно забывает, что его деятельность может иметь крайне негативное воздействие не только на окружающую среду, но и на него самого, его детей и на благополучие всего общества.

Ещё одна особенность, на которую хотелось бы обратить внимание, чем выше стоит человек в иерархии социума, тем больший его личный вклад во взаимоотношение общества и природной среды. Поясним это на примерах: электросварщик выбрасывает огарки электродов в бытовой мусор. Он не знает, не понимает или не придаёт значение тому факту, что рано или поздно токсичные вещества, содержащиеся в этих огарках, попадут в организм.

Осознаёт ли этот рабочий свою ответственность перед обществом? Понятно, что нет. Когда начальник цеха или главный энергетик даёт задание отключить очистку пыли и газов, ради экономии электроресурсов, он думает, что получит за это премию, что это будет на благо его семьи, но, то, что его действия приведут к загрязнению воздуха, которым дышат его дети, он по большому счёту понимает, но не придаёт этому значение.

Когда директор завода вводит досрочно в эксплуатацию предприятие без пылегазоочисток, без соблюдения экологических норм, он рассчитывает на благодарность общества, так как дал рабочие места, зарплаты, новую продукцию и т.д., но то, что его действия приведут к негативному влиянию на население целого города, он понимает, но не чувствует своей ответственности перед социумом, а тот и не ставит такой задачи.

Можно подниматься по этой лесенке вверх, вплоть до Верховной Рады и Президента, которые не принимают новые, щадящие природную среду и Человека Законы и нормативы, тем самым ставя под угрозу существование самого социума.

### **Выводы**

Настало время ввести такое понятие, как социальная безответственность. Исходя из внутреннего смысла этого понятия, любой Человек должен быть наказан за безответственность перед обществом. Но, к сожалению, пока в обществе существует снисходительное отношение к тем, кто разрушает природную среду и самые основы существования человека.

Где же выход из сложившейся и продолжающейся усиливаться негативной ситуации? На наш взгляд он кроется прежде всего в нравственной сфере. Если Человек будет получать с раннего детства знания о природной среде и своей роли и миссии на Земле, если он будет воспитан в духе гармоничного, высоконравственного отношения к природной среде, то тогда у человечества есть будущее.

Именно тогда безудержное стремление к гедонизму, роскоши, неограниченному, всё возрастающему удельному потреблению природных ресурсов, их безвозвратному расходованию и уничтожению, сменится разумным аскетизмом, когда Человек сознательно научится ограничивать свои личные и общественные потребности в природных ресурсах и будет стремиться к гармоничному взаимоотношению с природной средой.

Другого пути у человечества нет.

#### **Список литературы**

1. Educational Frameworks for Environmental Ethics [Электронный документ]. – Режим доступа: [http://www.unescobkk.org/fileadmin/user\\_upload/shs/Energyethics/ECCAPWG11rpt.pdf](http://www.unescobkk.org/fileadmin/user_upload/shs/Energyethics/ECCAPWG11rpt.pdf)
2. Судова Т. Л. Индивидуальная социальная ответственность [Электронный документ]. – Режим доступа: <http://vectoreconomy.ru/images/publications/2017/2/economic-theory/Sudova.pdf>
3. Международный стандарт IC CSR-08260008000 «Социальная ответственность организации. Требования» [Электронный документ]. – Режим доступа: <http://www.ksovok.com/standarts.php>
4. Вернадский В. И. Биосфера и ноосфера. – М. : Айрис-Пресс, 2004. – 576 с.
5. Коммонер Барри. Замыкающийся круг. – М. : Гидрометеиздат, 1974. – 280 с.

**Раздел 7.**  
**Энергоэффективные технологии  
и оборудование обработки металлов  
давлением**

**Редактор раздела** – профессор, д.т.н.,  
заведующий кафедрой технологического проектирования  
им. В.М. Друяна Национальной металлургической  
академии Украины  
**Балакин В.Ф.**

**Рецензент** – prof. dr hab. inż. **Henryk Dyja**,  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów,  
Politechnika Częstochowska

# OKREŚLENIE WARUNKÓW ODKSZTAŁCALNOŚCI STOPÓW ALUMINIUM SERII 7xxx

*Bajor T., Laber K., Dya H.*

*Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa,  
Wydział Inżynierii Produkcji I Technologii Materiałów, Politechnika Częstochowska,  
Częstochowa, Polska*

## Wprowadzenie

Zapotrzebowanie na lekkie materiały konstrukcyjne jest powodem ciągle rosnącego zainteresowania stopami aluminium. Stopy serii 7xxx ze względu na swoje wysokie właściwości mechaniczne są często stosowane w lotnictwie (skrzydła, kadłuby samolotów) oraz do produkcji elementów nośnych mostów, pojazdów ciężarowych, przyczep, naczep autobusów, statków, dźwigów czy wagonów kolejowych. Znajdują również zastosowanie w produkcji zbiorników, urządzeń górniczych, układów hydraulicznych oraz w przemyśle stoczniowym. Zaletą stopów serii 7xxx jest bardzo dobra przewodność cieplna, średnia odporność na korozję oraz dobra skrawalność. [1 – 3]

Istotny wpływ na własności otrzymanego wyrobu gotowego ma sposób przeróbki plastycznej. W przypadku procesów przeróbki plastycznej podstawową cechą charakteryzującą podatność materiału do kształtowania plastycznego jest naprężenie uplastyczniające  $\sigma_p$ , które w warunkach jednoosiowego stanu naprężenia jest funkcją odkształcenia ( $\varepsilon$ ), prędkości odkształcenia ( $\dot{\varepsilon}$ ), temperatury (T) oraz historii przebiegu odkształcenia [4 – 6]. Istnieje wiele metod badawczych służących do wyznaczenia wartości naprężenia uplastyczniającego, do których należą: próba rozciągania, ściskania oraz próba skręcania. [6]. Mogą one służyć pośrednio do określenia wybranych parametrów procesu przeróbki plastycznej. Wykorzystanie próby skręcania w podwyższonych temperaturach pozwala na wyznaczenie naprężenia uplastyczniającego w sposób pośredni, korzystając z hipotezy wyteżenia materiału. Do głównych zalet tej metody zalicza się: brak tarcia, niezmienny w czasie stan naprężenia oraz możliwość osiągnięcia znacznie większych odkształceń niż w pozostałych dwóch metodach [5, 6].

Określenie warunków odkształcalności w celu uzyskania wymaganych własności mechanicznych wytwarzanych wyrobów jest procesem złożonym, wymagającym między innymi wiedzy na temat zachowania się materiału w konkretnych warunkach podczas prowadzonego procesu odkształcenia.

Do przeprowadzenia badań prętów ze stopów aluminium serii 7xxx zastosowano plastomer skrętny STD 812. Na podstawie otrzymanych wyników badań określono wartość naprężenia uplastyczniającego oraz

odkształcalność graniczną odkształcanego materiału dla różnych schematów oraz warunków odkształcenia.

### Material i procedura badawcza

Materiałem wykorzystanym do badań był stop aluminium serii 7xxx. Skład chemiczny stopu przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1

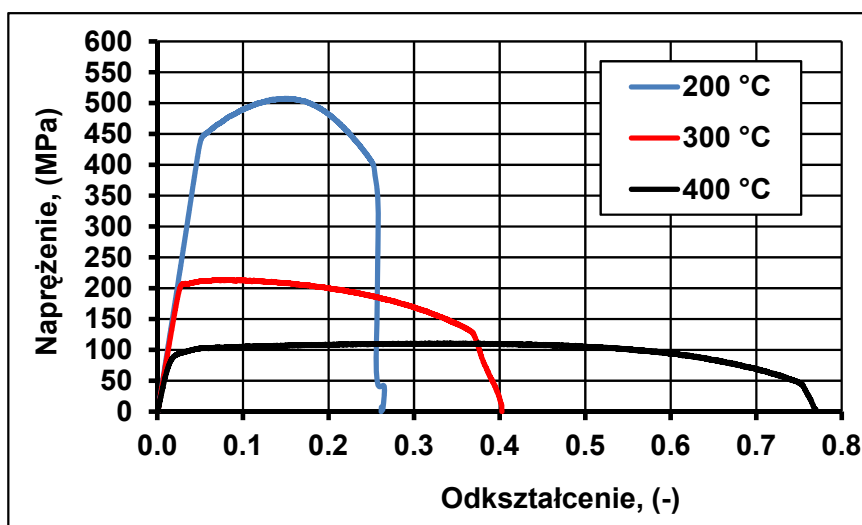
Skład chemiczny stopu 7075 [%]:

Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Zr	Ti	Inne
Reszta	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2,0	max 0,50	max 0,40	max 0,30	0,18- 0,28	max 0,25	max 0,20	max 0,05

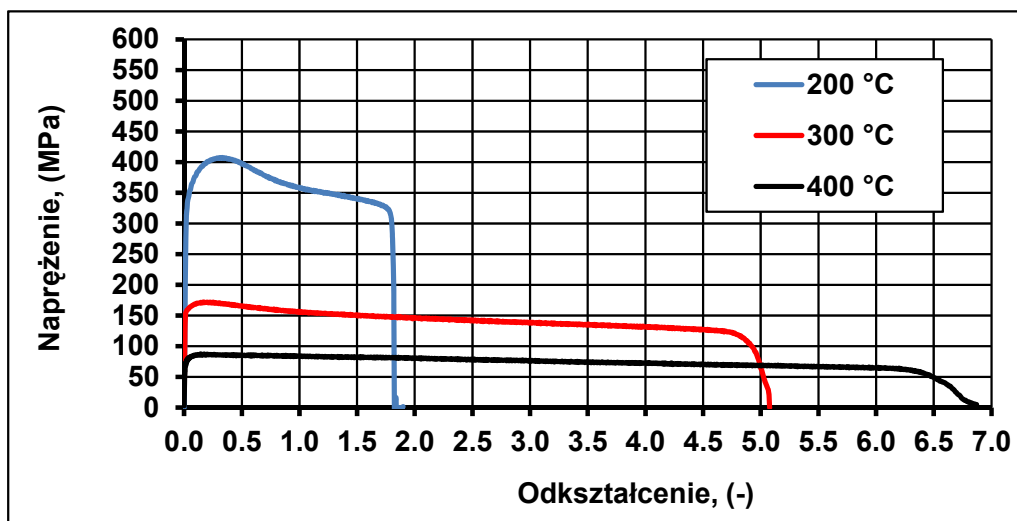
Zaproponowana metodyka badawcza dotyczyła przeprowadzenia prób rozciągania, skręcania oraz równoczesnego rozciągania ze skręcaniem. Do przeprowadzenia badań prętów ze stopów aluminium serii 7xxx zastosowano plastomer skrętny STD 812. Próby prowadzono przy temperaturach: 200 °C, 300 °C i 400 °C przy prędkości odkształcenia równej 1s<sup>-1</sup>. W każdym wariancie temperaturowo-prędkościowym przeprowadzono próbę rozciągania, skręcania oraz rozciągania ze skręcaniem. Przeprowadzono również analizę struktury materiału na mikroskopie skaningowym wykorzystując technikę EBSD oraz EDX.

### Wyniki badań

Po przeprowadzeniu badań doświadczalnych (prób rozciągania, skręcania oraz równoczesnego rozciągania ze skręcaniem) zebrane dane poddano analizie. Na rysunku 1 przedstawiono krzywe umocnienia badanego stopu aluminium uzyskane podczas próby rozciągania przy różnych temperaturach, natomiast na rysunku 2 krzywe umocnienia uzyskane w próbie skręcania.



Rysunek 1. Zależności naprężenie-odkształcenie otrzymane w próbie rozciągania z prędkością odkształcenia 1s<sup>-1</sup> przy temperaturze 200 °C, 300 °C i 400 °C



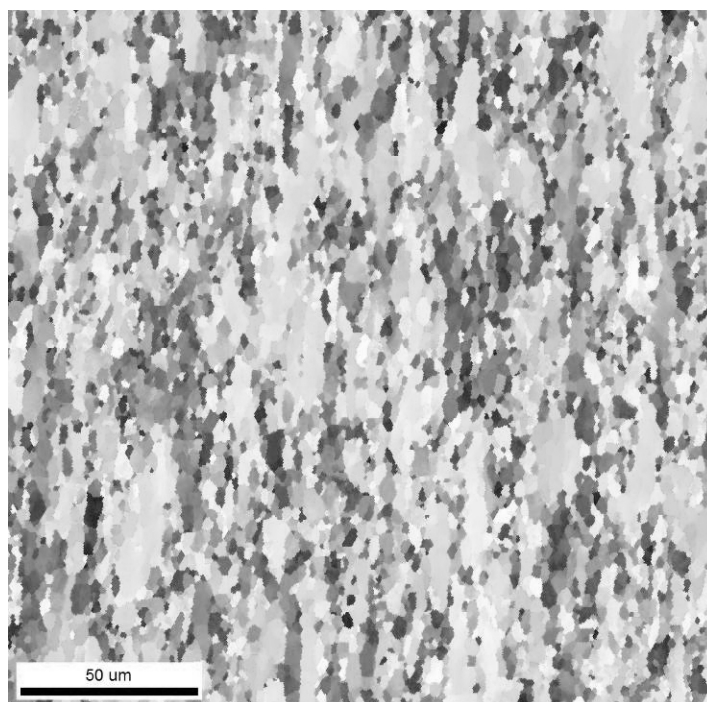
Rysunek 2. Zależności naprężenie-odkształcenie otrzymane w próbie skręcania z prędkością odkształcenia 1s-1 przy temperaturze 200 °C, 300 °C i 400 °C

Na podstawie danych przedstawionych na rys. 1 stwierdzono, że podczas rozciągania stopu największe wartości naprężenia uplastyczniającego wyznaczono podczas próby rozciągania prowadzonej przy temperaturze 200 °C natomiast najmniejsze wartości podczas rozciągania próbki przy temperaturze 400 °C. Podczas odkształcania przy temperaturze 200°C badany stop posiadał najmniejszą plastycznością. Odkształcenie graniczne badanego stopu wyniosło 0,25. Analizując zmiany naprężenia uplastyczniającego dla próbki rozciąganej przy temperaturze 300 °C stwierdzono istotny wpływ temperatury na obniżenie poziomu naprężenia uplastyczniającego w porównaniu do wartości naprężenia uplastyczniającego podczas rozciągania próbki przy temperaturze 200 °C. Naprężenie to obniżyło się o około 300 Mpa i wpłynęło to na poprawę plastyczności badanego stopu. Odkształcenie graniczne wyniosło ok. 0.37.

Wzrost temperatury badania do poziomu 400 °C spowodował wzrost plastyczności materiału. Odkształcenie graniczne wzrosło do około 0,75. W tym przypadku największa wartość naprężenia uplastyczniającego osiągnięta została przy odkształceniu rzeczywistym wynoszącym około 0.3.

Odmienny aniżeli podczas próby rozciągania przebieg krzywych zaobserwowano podczas próby skręcania (rys. 2). Analizując odkształcalność graniczną badanego stopu w tych warunkach stwierdzono korzystny wpływ zmiany schematu odkształcenia na odkształcenie graniczne badanego stopu, które wyniosło odpowiednio: 1.7 (przy temperaturze 200 °C), 4.75 (przy temperaturze 300 °C) oraz 6.3 (przy temperaturze 400 °C).

Prowadzenie procesu skręcania analizowanego przy temperaturze 400 °C pozwala na otrzymanie drobnoziarnistej struktury o wielkości ziarna w zakresie 1– 8 mikrometrów, a obserwowany rozkład ziaren jest jednorodny, co pokazano na rysunku 3.



Rysunek 3. Obraz mikrostruktury podczas obserwacji na mikroskopie skaningowym przy wykorzystaniu techniki EBSD dla stopu aluminium odkształcanego w próbie skręcania przy temperaturze 400 °C z prędkością odkształcenia wynoszącą 1s<sup>-1</sup>

### **Wnioski**

Po przeprowadzeniu badań plastyczności stopu aluminium serii 7xxx oraz po analizie otrzymanych wyników można stwierdzić, że w badanym zakresie parametrów odkształcenia największą odkształcalność graniczną wykazał stop odkształcany w próbie skręcania, co potwierdziły również przeprowadzone badania analizy struktury materiału.

### **Literatura**

1. Liu J.: Advanced Aluminum and Hybrid Aerostructures for Future Aircraft; Materials Science Forum, 2006, vol. 519-521, pp. 1233-1238.
2. Polmear I.J.: Aluminum Alloys – A Century of age hardening, Materials Forum, 2004, vol.28, pp.1-14.
3. Polmear I.J., COUPER M. J.: Design and development of an external wrought aluminum alloy for use at elevated temperatures, Metallurgical Transactions A, 1988, vol. 19A, pp. 1027-1034.
4. Hadasik E., Tkocz M., Kawalla R., Mandziej S.T.: Comparison of the results of hot torsion and hot compression tests, 2013, [http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_00/papers/206.pdf](http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_00/papers/206.pdf).
5. Kwapisz M., Knapiński M., Dyja H., Laber K.: Analysis of the effect of the tool shape on the stress and strain distribution in the alternate extrusion and multiaxial compression process, Archives of Metallurgy and Materials, 2011, vol. 56, issue. 2, pp. 487-493.
6. Grosman F., Hadasik E.: Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne, Gliwice Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2005, pp.95 - 99.

# ANALIZA ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ W ASYMETRYCZNEJ KOTLINIE WALCOWNICZEJ

*Kawalek A., Dyja H., Koczurkiewicz B., Magiera M., Laber K.*

*Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa, Politechnika Częstochowska  
Częstochowa, Polska*

## Wprowadzenie

W wyniku odkrycia w Polsce i na świecie nowych złóż gazu łupkowego wzrosło zapotrzebowanie na blachy rurociągowy. Stale przeznaczone na rurociągi muszą charakteryzować się wysoką granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie oraz dobrą spawalnością. Dobrą spawalność w tych stalach osiąga się poprzez obniżenie zawartości węgla. Spadek własności wytrzymałościowych wynikający z obniżenia zawartości węgla kompensowany jest poprzez wprowadzenia do tych stali mikrododatki takich jak: Ti, Mo, Nb, V. Znane są ogólne wytyczne do opracowania składów chemicznych tych stali, jednak wiele ośrodków badawczych prowadzi badania nad modyfikacją tych składów chemicznych [1]. Dla każdego składu chemicznego niezbędne jest zaprojektowanie indywidualnej technologii wytwarzania. Jedną z takich technologii może być wprowadzenie do procesu walcowania dwóch rodzajów asymetrii (geometrycznej i kinetycznej) [2]. Asymetria geometryczna polega na różnicowaniu średnic walców roboczych, zaś kinetyczna na różnicowaniu prędkości obrotowych walców roboczych. Wprowadzenie do procesu walcowania asymetrycznych warunków odkształcenia po stronie górnego i dolnego walca powoduje wystąpienie w metalu stref o przeciwnie skierowanych naprężeniach stycznych [3]. Proces walcowania z dwoma rodzajami asymetrii można zaliczyć do procesów intensywnej przeróbki plastycznej. Na skutek zaburzenia symetrii procesu walcowania powstają zróżnicowane warunki kinetyczne lub geometryczne w odkształcanym paśmie w warstwach metalu po stronie górnego i dolnego walca. Następuje przesunięcie powierzchni neutralnych po stronie górnego i dolnego walca. Strefy wyprzedzenia i opóźnienia posiadają różną długość, (w granicznym przypadku po stronie górnego lub dolnego walca może wystąpić tylko strefa opóźnienia) na powierzchniach styku metalu z walcami. W strefach tych naprężenia styczne działają w przeciwnych kierunkach, a ich działanie można porównać do występowania w kotlinie walcowniczej sił naciągu i przeciwnociągu, co jest korzystne dla procesu walcowania, ponieważ wpływa na obniżenie wartości parametrów siłowo-energetycznych [4 ÷ 6]. Na skutek obniżenie się siły nacisku metalu na walce zmniejsza się sprężyste ugięcie klatki walcowniczej i dlatego można uzyskać gotowe blachy o mniejszych odchyłkach wymiarowych oraz rozszerzyć asortyment produkowanych blach o wyroby cieńsze i o większej szerokości.

## Cel, zakres i metodyka badań

Celem przeprowadzonych badań była analiza stanu naprężeń i odkształceń w asymetrycznej kotlinie walcowniczej.

W pracy do numerycznego modelowania procesu walcowania z dwoma rodzajami asymetrii wykorzystano program FORGE® oparty na metodzie elementów skończonych. Badania prowadzono na próbkach z eksperymentalnej stali niskowęglowej z mikrododatkami o składzie chemicznym opracowanym w Politechnice Częstochowskiej w Instytucie Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa. W tabeli 1 przedstawiono eksperymentalny skład chemiczny stali użyty do badań.

Tabela 1

Eksperymentalny skład chemiczny badanej stali [%]

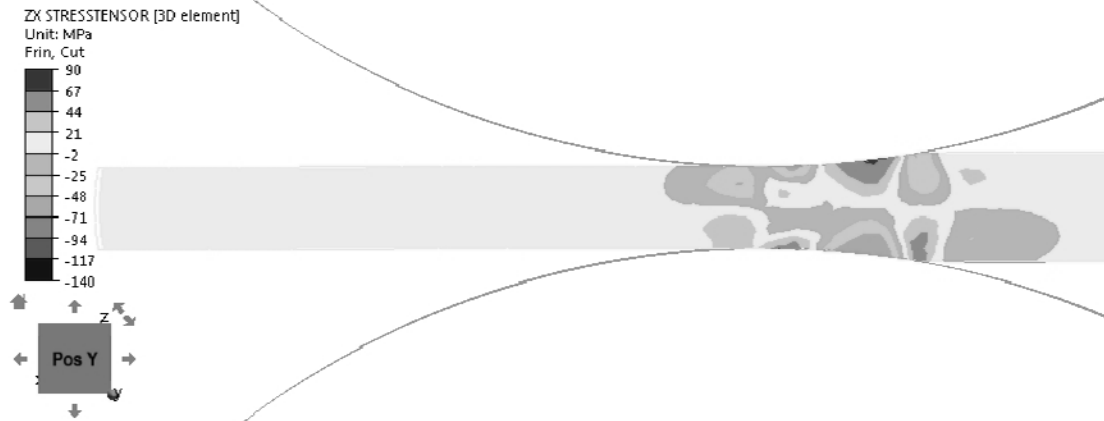
Skład chemiczny, %												
C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Cu	Cr	Nb	Al	Ti	N
0,095	1,95	0,35	0,010	0,010	0,11	0,20	0,12	0,13	0,055	0,032	0,043	36 ppm

Do modelowania numerycznego przyjęto walce robocze o średnicy 150 mm. W procesie walcowania zastosowano dwa rodzaje asymetrii. Pierwszy rodzaj asymetrii (kinetycznej) wprowadzono poprzez zróżnicowanie prędkości obrotowych walców roboczych, przy czym walec dolny miał stałą prędkość obrotową, która wynosiła  $n = 78$  obr/min, natomiast zmniejszono prędkość górnego walca. Drugi rodzaj asymetrii (geometrycznej) wprowadzono poprzez zróżnicowanie średnic walców roboczych (walec górny miał stałą średnicę, a zmniejszono średnicę walca dolnego). Współczynniki asymetrii zarówno dla asymetrii kinetycznej jak i geometrycznej były takie same i wynosiły  $a_v = a_d = 1,10 \div 1,30$ . Temperatura walcowanego pasma wynosiła  $t = 880$  °C. Przedział stosowanych gniotów wynosił  $\varepsilon_w = 0,1 \div 0,5$ . Symulacje numeryczne przeprowadzono dla pasma o wysokości początkowej  $h_0 = 10$  mm (współczynnik średnicy walca  $h_0/D = 0,067$ ). Do symulacji przyjęto następujące dane: temperaturę otoczenia – 20 °C; temperaturę narzędzi – 60 °C ; czynnika tarcia – 0,7; współczynnik tarcia – 0,3; współczynnik wymiany ciepła między materiałem a powietrzem  $\alpha_{pow} = 10$  [W/Km<sup>2</sup>]; współczynnik wymiany ciepła między materiałem a narzędziem  $\alpha_{narz} = 3000$  [W/Km<sup>2</sup>].

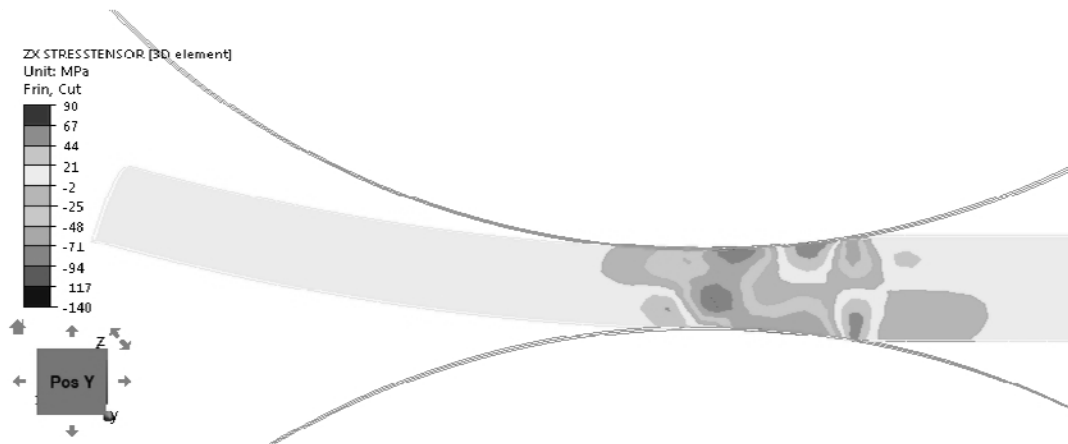
## Wyniki badań i ich analiza

Na rysunkach 1 ÷ 5 przedstawiono rozkład składowej intenswności naprężenia  $\sigma_{zx}$  dla procesu walcowania symetrycznego oraz z jednym i dwoma rodzajami asymetrii wsadu o wysokości początkowej  $h_0 = 10$  mm z gniotem  $\varepsilon_w = 0,25$  walcowanych w temperaturze  $T = 880$  °C. Z danych przedstawionych na rysunkach 1, 3, 5 wynika, że rozkłady składowej  $\sigma_{zx}$  uzyskane podczas walcowania symetrycznego i z dwoma rodzajami

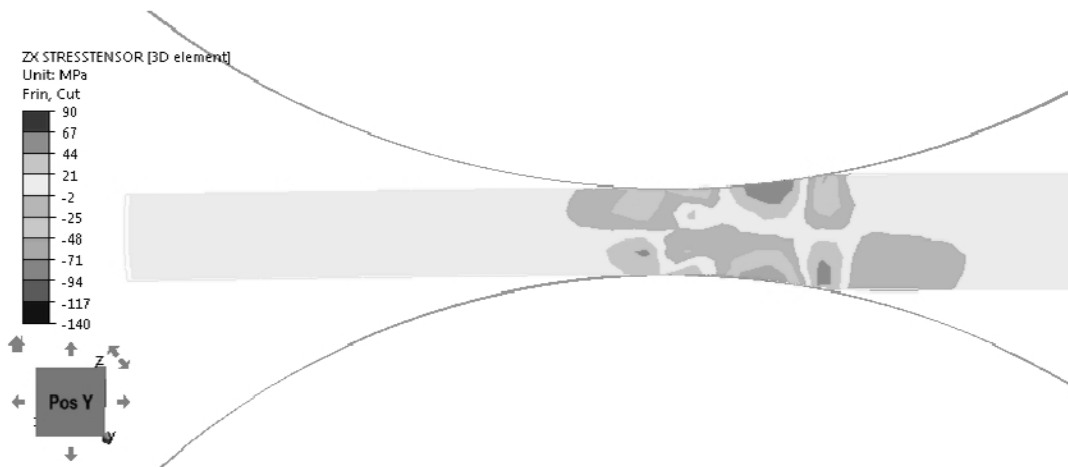
asymetrii różnią się nieznacznie. W kotlinie walcowniczej w warstwach metalu stykających się z górnym i dolnym walcem znajdują się obszary o podobnych wartościach składowej  $\sigma_{zx}$  lecz o przeciwnych znakach.



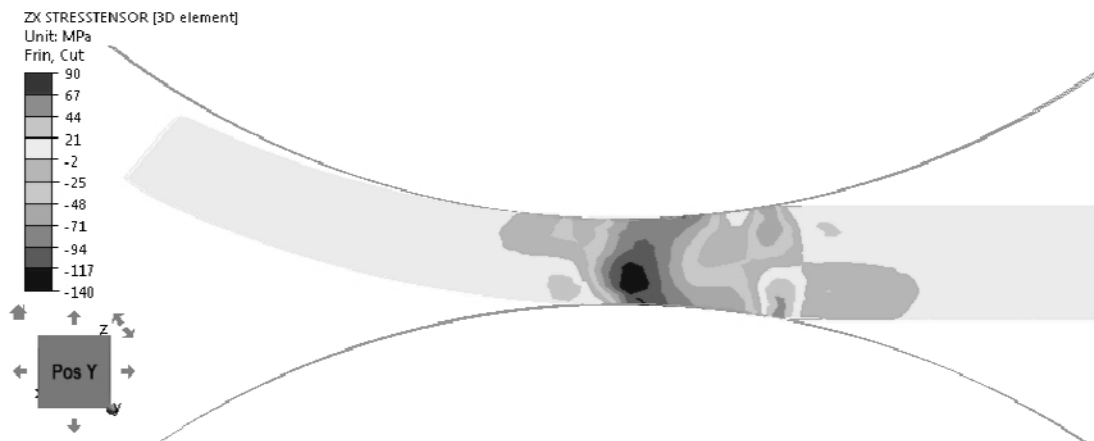
Rys. 1. Rozkład tensora naprężenia dla walcowania symetrycznego wsadu o wysokości początkowej = 10 mm;  $\varepsilon_w = 0,25$



Rys. 2. Rozkład tensora naprężenia dla walcowania z jednym rodzajem asymetrii wsadu o wysokości początkowej = 10 mm;  $\varepsilon_w = 0,25$ ;  $a_v=1,1$



Rys. 3. Rozkład tensora naprężenia dla walcowania z dwoma rodzajami asymetrii wsadu o wysokości początkowej = 10 mm;  $\varepsilon_w = 0,25$ ;  $a_v=1,1$ ;  $a_g=1,1$



Rys. 4. Rozkład tensora naprężenia dla walcowania z jednym rodzajem asymetrii wsadu o wysokości początkowej  $h_0 = 10$  mm;  $\varepsilon_w = 0,25$ ;  $a_v = 1,3$

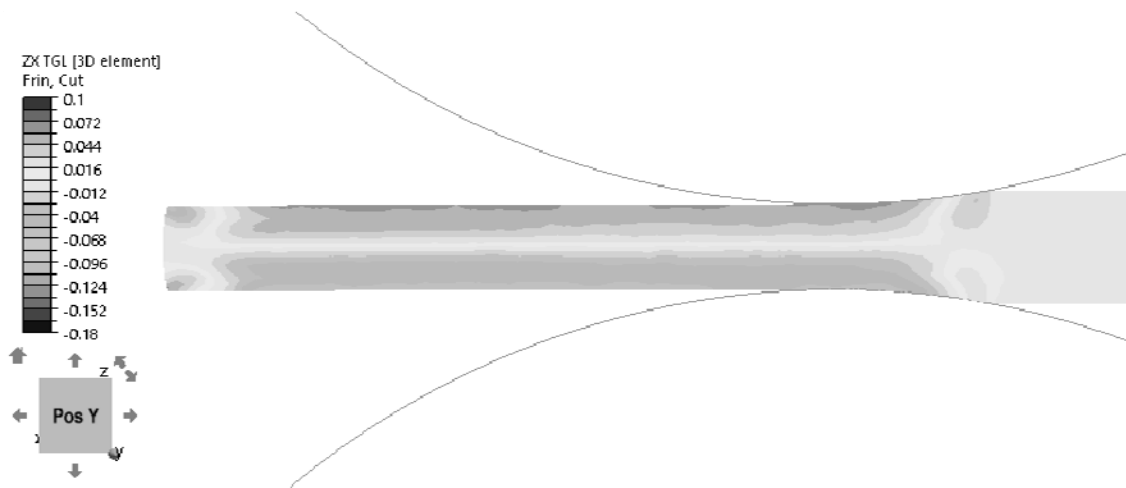


Rys. 5. Rozkład tensora naprężenia dla walcowania z dwoma rodzajami asymetrii wsadu o wysokości początkowej  $h_0 = 10$  mm;  $\varepsilon_w = 0,25$ ;  $a_v = 1,3$ ;  $a_g = 1,3$

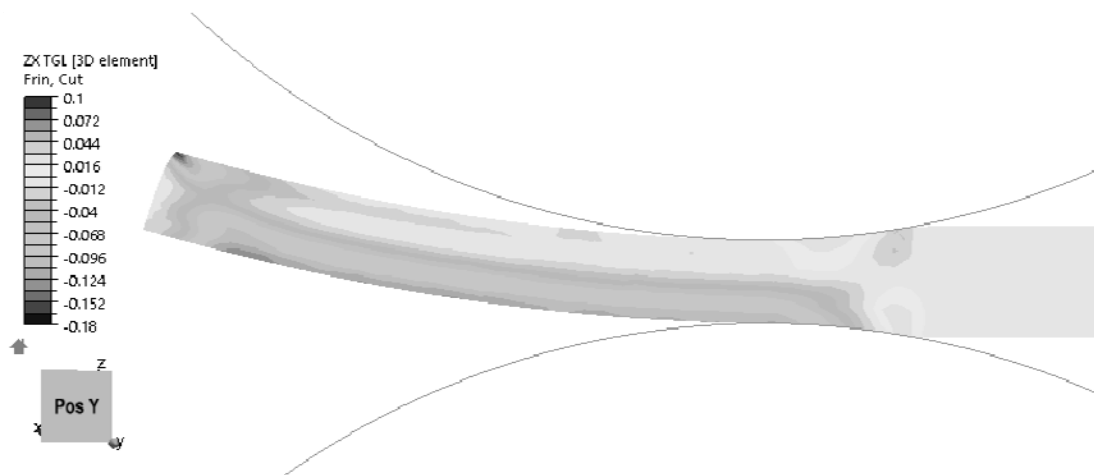
Wprowadzenie do procesu walcowania jednego rodzaju asymetrii powoduje, że w kotlinie odkształcenia występuje nierównomierny rozkład naprężeń w stosunku do osi obojętnej walcowanego pasma (rys. 2 i 4). Największy obszar zajmuje składowa  $\sigma_{zx}$  o znaku ujemnym. Obszar ten zwiększa się wraz ze wzrostem zastosowanego współczynnika asymetrii. W warstwach metalu stykających się z dolnym walcem w płaszczyznach wejścia metalu do kotliny walcowniczej i wyjścia metalu z kotliny walcowniczej występują obszary o dodatniej wartości składowej  $\sigma_{zx}$ . Natomiast w warstwach metalu leżących w pobliżu górnego walca obszary o dodatniej wartości składowej  $\sigma_{zx}$  występują w pobliżu płaszczyzny wejścia metalu do kotliny walcowniczej.

Na rysunkach 6 ÷ 10 przedstawiono rozkład odkształceń postaciowych  $\varepsilon_{zx}$  w kotlinie walcowniczej w procesie walcowania symetrycznego oraz z jednym i dwoma rodzajami asymetrii wsadu o

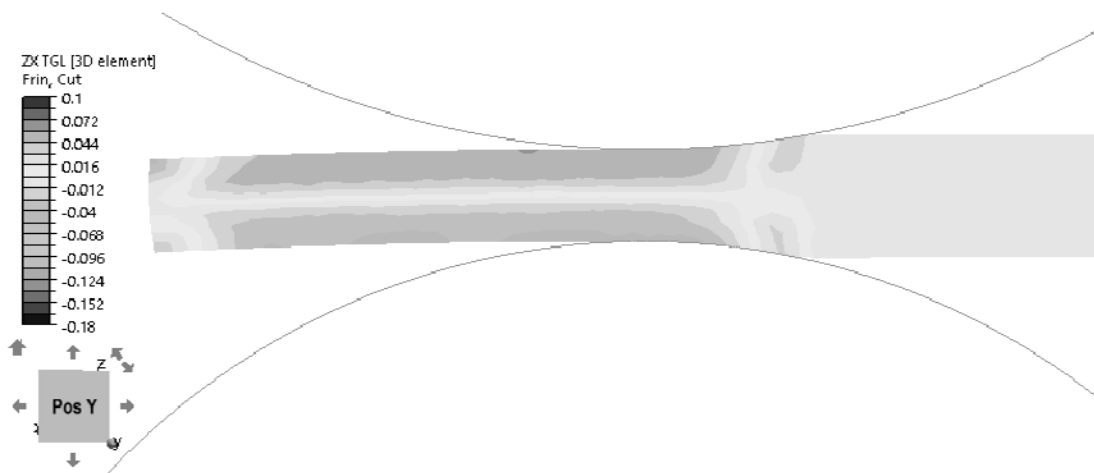
wysokości początkowej  $h_0 = 10$  mm z gniotem  $\varepsilon_w = 0,25$  walcowanych w temperaturze  $T = 880$  °C.



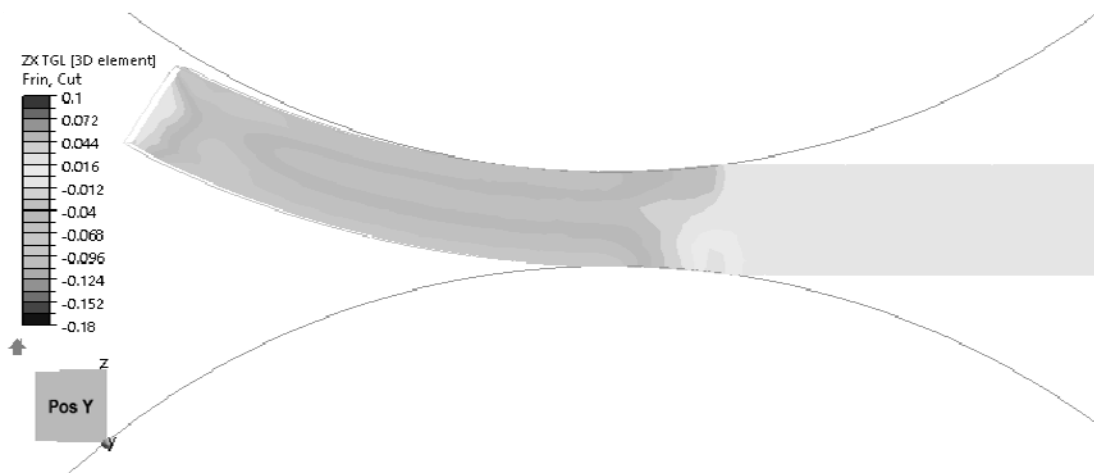
Rys. 6. Rozkład składowej odkształcenia  $\varepsilon_{zx}$  dla walcowania symetrycznego wsadu o wysokości początkowej  $h_0 = 10$  mm;  $\varepsilon_w = 0,25$



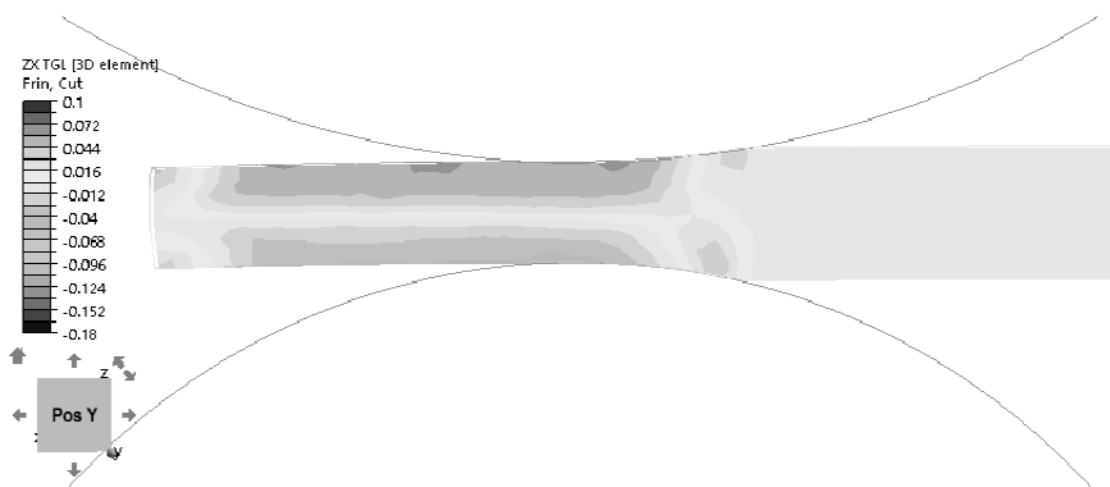
Rys. 7. Rozkład składowej odkształcenia  $\varepsilon_{zx}$  dla walcowania z jednym rodzajem asymetrii wsadu o wysokości początkowej  $h_0 = 10$  mm;  $\varepsilon_w = 0,25$ ;  $a_v = 1,1$



Rys. 8. Rozkład składowej odkształcenia  $\varepsilon_{zx}$  dla walcowania z dwoma rodzajami asymetrii wsadu o wysokości początkowej  $h_0 = 10$  mm;  $\varepsilon_w = 0,25$ ;  $a_v = 1,1$ ;  $a_g = 1,10$



Rys. 9. Rozkład składowej odkształcenia  $\varepsilon_{zx}$  dla walcowania z jednym rodzajem asymetrii wsadu o wysokości początkowej  $h_0 = 10$  mm;  $\varepsilon_w = 0,25$ ;  $a_v = 1,3$



Rys. 10. Rozkład składowej odkształcenia  $\varepsilon_{zx}$  dla walcowania z dwoma rodzajami asymetrii wsadu o wysokości początkowej  $h_0 = 10$  mm;  $\varepsilon_w = 0,25$ ;  $a_v = 1,3$ ;  $a_g = 1,3$

Na podstawie analizy rozkładu składowej odkształcenia  $\varepsilon_{zx}$  podczas walcowania z gniosem  $\varepsilon_w = 0,25$  stwierdzono, że zastosowanie dwóch rodzajów asymetrii powoduje wzrost wartości składowej  $\varepsilon_{zx}$  w warstwach środkowych pasma w porównaniu z wynikami otrzymanymi po walcowaniu symetrycznym (rys. 6, 8, 10). Wzrost wartości odkształcenia postaciowego  $\varepsilon_{zx}$  w warstwach środkowych pasma wpływa na rozdrobienie struktury walcowanej blachy.

Wprowadzenie tylko jednego rodzaju asymetrii podczas walcowania wsadu z gniosem  $\varepsilon_w = 0,25$  (rys. 7, 9) wpływa na nierównomierny rozkład składowej  $\varepsilon_{zx}$  w stosunku do osi obojętnej walcowanego pasma. Zastosowanie współczynnika asymetrii  $a_v = 1,1$  powoduje, że w pasmach znajdujących się w pobliżu walca o mniejszej prędkości obrotowej wartość tej składowej jest dodatnia, natomiast w warstwach metalu stykających się z dolnym walcem składowa ta przyjmuje wartości ujemne. Podczas walcowania ze współczynnikiem  $a_v = 1,3$  wartości tej składowej mają ten

sam znak w całej kotlinie odkształcenia, za wyjątkiem obszaru znajdującego się w pobliżu płaszczyzny wejścia metalu do kotliny odkształcenia leżącego po stronie walca o większej prędkości obrotowej. Wartości bezwzględne tej składowej  $\varepsilon_{zx}$  są większe w warstwach metalu znajdujących się w pobliżu walców roboczych w porównaniu do środkowych warstw metalu.

### **Wnioski**

Na podstawie wyników numerycznego modelowania asymetrycznego procesu walcowania blach grubych ze stali nisko węglowych z mikrododatkami sformułowano następujące wnioski:

- wprowadzenie do procesu walcowania tylko asymetrii kinetycznej wpływa na wyginanie się pasma w stronę górnego walca, dla całego badanego zakresu parametrów procesu walcowania;
- poprzez zastosowanie w procesie walcowania asymetrii kinetycznej i geometrycznej można uzyskać proste pasmo dla wszystkich badanych przypadków;
- wprowadzenie do procesu walcowania asymetrii kinetycznej wpływa na wystąpienie nierównomiernego rozkładu odkształceń w kotlinie walcowniczej w stosunku do osi obojętnej walcowanego pasma;
- po wprowadzeniu do procesu walcowania drugiego rodzaju asymetrii przywracane zostają symetryczne warunki płynięcia plastycznego warstw metalu po stronie górnego i dolnego walca.

### **Literatura**

1. Koczurkiewicz B.: Podstawy technologii wytwarzania blach grubych ze stali niskowęglowych z mikrododatkami przeznaczonych na rury przewodowe. Monografia nr 55, Częstochowa 2016 r.
2. Pesin A. M., Kawalek A., Szyński P., Pustovojtov D. O.: Ispolzovanie dvuh faktorom asimmetrii pri tolstolistovoj prokatke. Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tehniceskogo Universiteta im. G. I. Nosova, nr 4 (44), Magnitogorsk 2013, s. 50-51.
3. Kawalek A.: Teoria i technologia asymetrycznego procesu walcowania wyrobów płaskich. Monografia nr 54, Częstochowa 2016 r.
4. Szyński P., Laber K., Wąsek S.: Wpływ współczynnika asymetrii na wartość nacisków i wyginanie się pasma w klatce wykańczającej. Hutnik-Wiadomości Hutnicze nr 5, maj 2012, s.382-385.
5. Nikolaev V. A.: Silovye parametry v nesimmetrichnykh uslovijach prokatki. Izvestija vuzov Chernaja metallurgija, nr 3, 2007, s. 20-23.
6. Kawalek A.: The effect of relative deformation on the energy-force parameters in the asymmetrical plate rolling process, Metalurgija Metallurgy, 2016, t.55, nr 4, s.639-642.

# МЕТОДЫ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

*Балакин В.Ф., Байрымов А.А.*

*Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

Большой интерес представляет производство материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, так как их механические, физические и функциональные свойства значительно превосходят крупнозернистые аналоги. Производство УМЗ материалов возможно двумя путями: компактированием масс уже полученных обособленных частиц материала соответственного размера, либо методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Первый способ осуществляется путем управляемой конденсации кристаллов из газовой фазы, либо путем размола материала в шаровых мельницах до состояния ультрадисперсного порошка, а затем его компактирования в готовую деталь [1 – 3]. Однако этот способ имеет ряд недостатков, среди которых: остаточная пористость материала, ограничения по геометрическим размерам готового изделия, примеси и загрязнения в порошке.

Интенсивная пластическая деформация – способ получения беспористых материалов с размером зерна около 100 нм, заключающейся в формировании сильно фрагментированной и разориентированной структуры за счет больших степеней деформации. Метод интенсивной пластической деформации лишен перечисленных недостатков, и возможен при следующих условиях [4]:

1. высокие степени деформации для измельчения зерна ( $\epsilon > 6 - 8$ );
2. достижения высокого давления для предотвращения разрушения материала ( $P > 1$  Гпа);
3. деформация при температуре 0,4 Тпл и ниже для избегания рекристаллизации;
4. немонотонность деформации для формирования высокоугловых границ.

Традиционные методы ИПД, такие как кручение под высоким гидростатическим давлением (КГД), равноканальное угловое прессование (РКУП), винтовая и другие виды экструзии, и т.п. показывают высокую эффективность. Прочность материала с наноструктурой в 1,5 – 2,5 раза выше, чем у обычных сталей, а твердость – в 4 – 5 раз [5]. Так, в работе [6] была исследована структура и механические свойства сталей 20 и 45 после интенсивной пластической деформации методом КГТ при температурах 20 и 400 °С. В обоих случаях при 20° формируется однородная структура с размером кристаллитов 100 – 200 нм. При 400° деформация более неоднородная и преобладает на

периферии образца, однако микротвердость образцов, обработанных при повышенной температуре оказалась выше в 2,5 раза. Однако перечисленные методы не позволяют обрабатывать длинномерные изделия, и не могут быть применены в промышленности для массового производства.

Существуют методы ИПД подходящие для промышленного использования, позволяющие производить длинномерные изделия с измельченной структурой. Одним из таких методов является процесс Конформ.

Технология Конформ – это процесс формирования длинномерных изделий методом непрерывной экструзии с реализацией механизмов по ИПД. Технология Конформ была разработана в Великобритании в 1971 г. Комитетом по Ядерной Энергетике (УКАЕА). Принцип непрерывной экструзии Конформ базируется на использовании активных сил трения, на рис. 1 изображена схема непрерывного прессования методом Конформ.

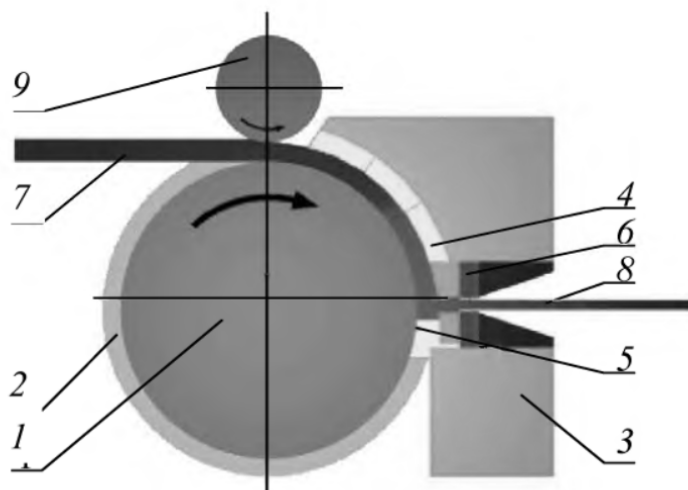


Рис. 1. Схема непрерывного прессования методом Конформ [7]:  
 1 – рабочее колесо, 2 – канавка, 3 – башмак, 4 – вставка  
 в форме кольца, 5 – вставка, 6 – матрица, 7 – заготовка,  
 8 – изделие, 9 – валок

Устройство состоит из подвижного колеса, которое также несет функцию контейнера, и недвижимого инструмента, называемого башмаком. Башмак и колесо образуют закрытый канал по которому продвигается заготовка. Способ Конформ (рис. 1) базируется на применении подвижного инструмента в виде колеса с врезанной канавкой и недвижимого башмака, прилегающего к колесу, причем на торце башмака установлена матрица, перекрывающая канавку колеса. В качестве заготовки используют прутки 7, который подается в ручей 2, выполненный на рабочем колесе 1 в виде кольцевой канавки с внешней стороны закрыт нажимным башмаком 3, на внутренней по-

верхности которого выполнен выступ 4, охватывающее заготовку 7. В башмаке 3 закреплено блок инструмента с прессовой матрицей 5.

Метод Конформ широко используется для производства цветных металлов и сплавов, однако существуют проблемы в виде высокого давления прессования и быстрого износа инструмента, ограничивающие применения данного метода для более прочных материалов.

Преодоление указанных недостатков возможно при прессовании заготовок в роликовой матрице (рис. 2). Роликовая матрица известна из работы [8] позволяет получать УМЗ структуру при значительно меньших усилиях, но требует большого количества проходов. Тем не менее, сравнительно небольшие усилия позволяют рекомендовать подобные конструкции для осуществления совмещенных установок. Особенно полезным такое решение при обработке стальных изделий, где указанные выше проблемы стоят особенно остро.

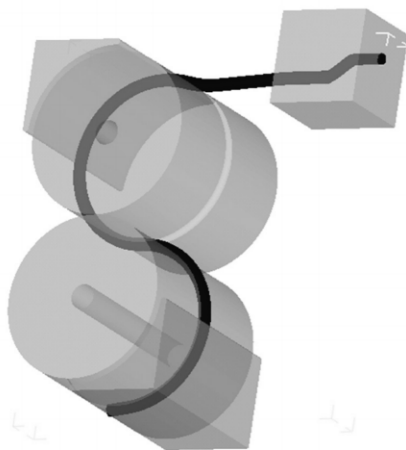


Рис. 2. Роликовая матрица [8]

Так же известен способ получения длинномерных заготовок круглого поперечного сечения с ультрамелкозернистой структурой [9]. Способ включает размотку заготовки, обработку заготовки и смотку заготовки. Обработку заготовки осуществляют путем протяжки через ряд последовательно расположенных деформирующих инструментов. В качестве деформирующих инструментов используют равноканальные угловые матрицы (рис. 3).

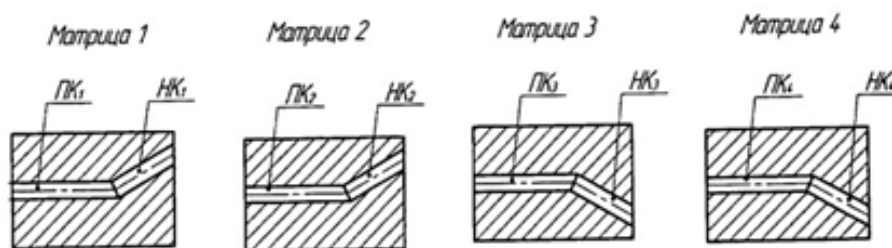


Рис. 3. Ряд последовательно расположенных деформирующих инструментов [9]

Протяжку заготовки осуществляют за 4 – 8 проходов. Диаметр заготовки при протяжке выбирают равным 60 – 90 % диаметра приемного канала матрицы. Направление изгиба заготовки в наклонном канале матрицы меняют путем поворота каждой следующей по ходу движения заготовки матрицы на прямой угол относительно предыдущей матрицы. В результате обеспечивается повышение прочностных свойств заготовок. В качестве заготовки круглого поперечного сечения использовали катанку из стали марки 20 в отожженном состоянии. Испытания проводили в лабораторных условиях с использованием однократной барабанной волочильной машины ВМ-1/550. С использованием вращающейся фигурки разматывали моток проволоки, на острильном станке заостряли передний конец заготовки, после чего однократно протягивали заготовку через деформирующий инструмент и сматывали заготовку. Процесс деформирования повторяли необходимое количество раз, изменяя направление изгиба заготовки в наклонном канале матрицы путем поворота матрицы на прямой угол относительно вертикальной плоскости. В качестве смазочного материала использовали состав на основе натриевого мыльного порошка. Результаты показали, что по сравнению с прототипом заявляемый способ обеспечивает увеличение прочностных свойств заготовки на 25 – 45 %.

В патенте [10] авторами предложен метод непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки из высокоуглеродистых марок стали, основанного на совмещении волочения с другими методами деформационного воздействия. Поскольку для формирования УМЗ структуры металлов и сплавов необходимо воздействие деформаций сдвига, был предложен вариант протяжки заготовки через две волокна, между которыми установлено устройство, обеспечивающее кручение. Была разработана соответствующая установка и проведена серия экспериментов по изучению эффективности получения УМЗ структуры в проволоке в ходе данного метода обработки. В качестве объекта исследования была выбрана проволока из стали марки 75 с исходным диаметром 3,05 мм, которая востребована на рынке металлопродукции. Относительное обжатие в первой и второй волокнах 12,68 и 8,24 % соответственно. В ходе проведения металлографического анализа микроструктуры проволоки после предложенного метода обработки выявлено измельчение основных структурных составляющих (дробление цементитных пластин, уменьшение межпластинного расстояния в перлите) что свидетельствует о развитии процессов измельчения структурных составляющих стали с увеличением степени деформации кручением и формированием ультрамелкозернистой структуры.

Повторяющейся рифление – выпрямление (ПРВ) (рис. 4) [11] – это схема ИПД, которая заключается в том, что заготовку прокатыва-

ют в валках специальной формы, осуществляя ее многократное изгибания по всей длине, после чего заготовка поступает в круглые валки, которые возвращают ей круглую форму. Особенность этого способа в том, что он позволяет обрабатывать длинномерные изделия, среди которых могут быть листы или проволока, а для получения требуемой структуры достаточно определить необходимое число проходов.

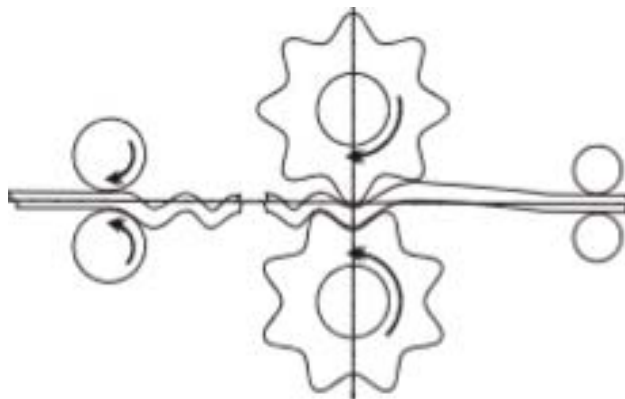


Рис. 4. Схема повторяющегося рифления – выпрямления (ПРВ) [11]

### Выводы

Методы обработки длинномерных изделий с применением ИПД – перспективное направление, позволяющее повышать механические, физические и функциональные свойства конечного продукта. Особенно актуально данное направление в современных условиях постоянного ужесточения требований к металлопрокату. Существуют перспективные разработки в области получения УМЗ структуры в процессе изготовления длинномерных изделий, однако остается широкое поле для разработки новых, более совершенных методов обработки.

### Список литературы

1. The Hall-Petch relationship in nanocrystalline iron produced by ball milling. Jang, J.S.C., Koch, C.C. *Scripta Metallurgica et Materia*. 24(8), 1990. – pp. 1599–1604.
2. Koch, C.C. Synthesis of nanostructured materials by mechanical milling: Problems and opportunities. *Nanostructured Materials Volume 9, Issue 1-8, 1997.* – pp. 13–22.
3. Microstructures and properties of nanocomposites obtained through SPTS consolidation of powders. Alexandrov, I.V., Zhu, Y.T., Lowe, T.C., Islamgaliev, R.K., Valiev, R.Z., *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. Volume 29, Issue 9, 1998. – pp. 2253-2260.
- 4 Valiev R.Z., Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*. Volume 45, Issue 2, 2000. – pp. 103-189.
5. Маврина Т.В. Наука «уходит» в наномир»// Вестник Российской академии наук 2002. –Т. 72. – № 10. – С. 905–909

6. Закирова А.А., Зарипова Р.Г., Семенов В.И. Структура и механические свойства углеродистых сталей, подвергнутых интенсивной пластической деформации кручением // Вестник УГАТУ. – Т. 11. – № 2, 2008. С. 123–130.
7. Green, D. Conform a new method for the continuous forming of metals / D.Green //Brit.Ind. – 1969. – 10. – № 6. – P. 18–19.
8. Ashkeev Zh.A, Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Toleuova A.R. Billet deformation in uniform-channel stepped die (2005) Steel in Translation, 35 (2). – pp. 37–39.
9. Пат. 2446027 Российская Федерация, МПК В21С1/00 Способ получения длинномерных заготовок круглого поперечного сечения с ультрамелкозернистой структурой. Емалеева Динара Гумаровна, Полякова Марина Андреевна, Барышников Михаил Павлович, Чукин Михаил Витальевич №2010122148/02; заявл. 31.05.2010.
10. Пат. 2467816 Российская Федерация, МПК В21С 1/04. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением с кручением / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Э.М. Голубчик [и др.] №2011107637/02; заявл. 28.02.2011; опубл. 27.11.2012. Бюл. №33
11. Properties and nanostructures of materials processed by SPD techniques // Ultrafine Grained Materials II; Ed. By Y.T. Zhu, T.G. Langdon, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, M.J. Saran, T.C. Lowe. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society). – 2002. – P.331–340.

# РАЗВИТИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ РАЗНОСТЕННОСТИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

*Балакин В.Ф.<sup>1</sup>, Henryk Dujak<sup>2</sup>, Григоренко В.У.<sup>1</sup>, Мищенко А.В.<sup>1</sup>*

*1 – Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

*2 – Czestochowa University of Technology Faculty of Production Engineering and Materials Technology, Czestochowa, Poland*

## Аннотация

Большинство продукции из дорогостоящих сплавов на основе титана производят с жесткими требованиями по точности их геометрических параметров. Наиболее трудновыполнимыми являются требования по поперечной разностенности труб.

Проанализировано с использованием расчетного анализа на базе конечно-элементного моделирования влияние уровня исходной разнотолщинности на характер ее изменения из сплавов на основе титана. Результаты показывают, что для больших значений исходной разнотолщинности, уменьшение ее происходит больше.

Полученные экспериментальные результаты изменения абсолютной разностенности по длине зоны обжатия стенки при прокатке на стане ХПТ-55 показали, что зависимости, полученные при расчетном анализе и при эксперименте по прокатке на промышленном стане ХПТ, демонстрируют свою схожесть. Использование развитого метода прогнозирования поперечной разностенности при многопроходной прокатке труб из сплавов на основе титана позволяет оперативно анализировать маршруты на стадии их разработки и разрабатывать эффективные технологии.

Ключевые слова: холодная прокатка, труба, титан, конус деформации, расчетный анализ, холодная деформация, прогнозирование разностенности, разностенность, моделирование, технология.

## Введение

В последние годы большинство продукции из дорогостоящих сплавов на основе титана производят с более жесткими требованиями по точности их геометрических параметров. Наиболее трудновыполнимыми являются требования по поперечной разностенности труб.

Для получения высокоточных труб используют станы холодной прокатки труб (ХПТ). В качестве труб – заготовок используют в основном гильзы с прошивного стана. Характерной особенностью гильз является большая (до 20 %) поперечная эксцентричная разностенность. Для получения холодно деформируемых труб надлежащего качества используются многопроходные маршруты [1] и проводят дополнительную операцию обточки труб-заготовок. При проектировании новых маршрутов, обеспечивающих высокий уровень точности труб, необходимо уметь прогнозировать поперечную конечную их разностенность.

### **Анализ исследований**

Особенностью прокатки труб из сплавов на основе титана является использование минимально возможной зоны редуцирования и выполнение деформации по диаметру и стенке на оправке.

Известны исследования по механизму изменению поперечной разностенности труб, выполненные для процессов холодной прокатки в зоне редуцирования [2, 3] и для горячей прокатки на оправке [4, 5].

Авторами данной статьи выполнен ряд работ по изучению механизма уменьшения поперечной разностенности при холодной прокатке сплавов на основе титана на оправке и по развитию на их основе метода прогнозирования поперечной разностенности [6]. Основой данной работы является учет разной интенсивности упрочнения металла тонкой и толстой стенок.

### **Цель работы**

Для понимания процесса изменения эксцентричной разностенности при холодной прокатке труб на оправке из сплавов на основе титана необходимы аналитические зависимости изменения поперечной разностенности от деформаций для конкретных марок сплавов. Это позволит выполнять расчеты по прогнозированию разностенности при многопроходной холодной прокатке с большей точностью.

### **Результаты исследования**

Ранее была выдвинута теория механизма изменения эксцентричной разностенности [6] при холодной прокатке на оправке, проведен расчетный анализ процесса деформации образцов разной толщины между тремя плитами (подобно очагу деформации стана ХПТ) и проведен эксперимент по его апробации. Это позволило разработать методику для расчета поперечной разностенности в зоне обжатия стенки. Вместе с тем, не было проведено исследование о влиянии исходной величины разностенности на её изменение, что необходимо для выбора труб-заготовок.

Исходя из этого, было проведено дополнительное исследование по влиянию величины исходной разнотолщинности образцов на процесс изменения разнотолщинности. Так, в программе конечно-элементного моделирования, согласно ранее представленной методике, разработанной авторами данной работы, провели расчетный анализ для образцов с разнотолщинностью в 20 %, 15 %, 10 % и 5 %. (Рис. 1).

Размеры образцов до расчетного анализа составили:

для 20 % – 9,35 мм и 7,65 мм;	для 15 % – 9,14 мм и 7,86 мм;
для 10 % – 8,93 мм и 8,08 мм;	для 5 % – 8,71 мм и 8,29 мм.

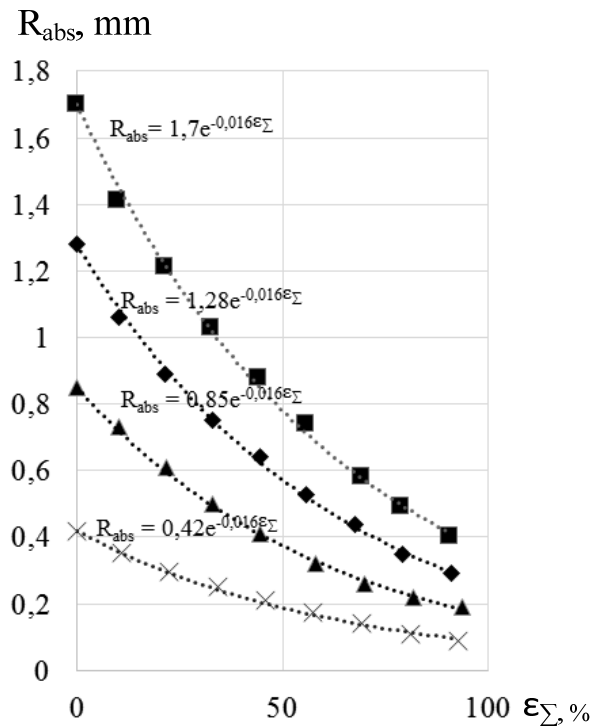


Рис. 1. Изменение абсолютной разнотолщинности образцов с начальной разнотолщинностью в 20 %, 15 %, 10 % та 5 % при расчетном анализе, выполненном при помощи программы конечно-элементного моделирования:  
 ■ – значения для исходной разнотолщинности 20 %;  
 ◆ – значения для исходной разнотолщинности 15 %;  
 ▲ – значения для исходной разнотолщинности 10 %;  
 × – значения для исходной разнотолщинности 5 %;  
 пунктирная линия – аппроксимация

В результате аппроксимации данных расчетного анализа построены описывающие их функции. Эти формулы описывают значение поперечной разнотолщинности и имеют вид:

$$\Delta R_{abs,fc} = \Delta R_{abs,beg} e^{-\alpha \epsilon_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где  $\Delta R_{abs,beg}$  – начальная абсолютная разностенность заготовки;  $e$  – фундаментальная математическая константа;  $\alpha$  – коэффициент интенсивности изменения абсолютной поперечной разностенности;  $\beta$  – коэффициент интенсивности изменения относительной поперечной разностенности;  $\epsilon_{\Sigma}$  – суммарная относительная деформация по стенке трубы.

Графики демонстрируют, что для больших значений исходной разнотолщинности уменьшение происходит больше, но при этом функции описывающие интенсивность изменения разнотолщинности являются одинаковыми.

Для получения дополнительных сведений об изменении разностенности и сравнительной оценки с промышленным процессом про-

вели эксперимент по оценке изменения абсолютной разностенности вдоль конуса деформации при прокатке на стане ХПТ-55 по маршруту  $38 \times 4,5 \rightarrow 25,4 \times 2,25$  мм (Рис. 2).

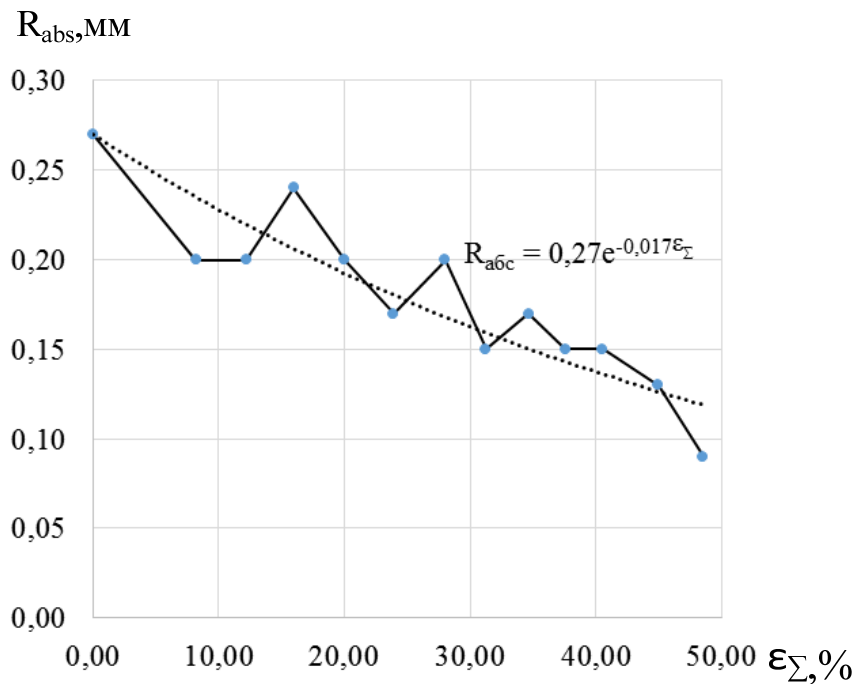


Рис. 2. График изменения разностенности в зоне обжатия стенки при прокатке на стане ХПТ-55 по маршруту  $38 \times 4,5 \rightarrow 25,4 \times 2,25$  мм

Зависимости, полученные при расчетном анализе и из экспериментальных данных по прокатке на промышленном стане ХПТ, демонстрируют свою схожесть.

Описанная формулой конечная разностенность ( $\Delta R_{tot.fc}$ ), при многопроходной прокатке основывается на использовании зависимости (1), учете наведенной станами разностенности и расчете значения коэффициента интенсивности уменьшения поперечной разностенности с применением конечно-элементной программы.

В таком случае формула принимает вид:

$$\Delta R_{tot.fc} = (\Delta R_{abs.beg} \cdot e^{-\alpha \epsilon_{\Sigma 1}} \cdot e^{-\alpha \epsilon_{\Sigma 2}} \cdot \dots \cdot e^{-\alpha \epsilon_{\Sigma n}}) + n \cdot R_{нав} \quad (2)$$

где  $\Delta S_{abs.beg}$  – исходная разностенность заготовки;  $\alpha$  – коэффициент уменьшения абсолютной поперечной разностенности;  $\epsilon_{\Sigma}$  – суммарная деформация по толщине стенки трубы, %;  $e^{-\alpha \epsilon_{\Sigma 1}}$  – снижение разностенности при первой прокатке;  $e^{-\alpha \epsilon_{\Sigma 2}}$  – снижение разностенности при второй прокатке;  $e^{-\alpha \epsilon_{\Sigma n}}$  – снижение разностенности при n-ной прокатке;  $R$  – наведенная разностенность.

Использование развитого метода прогнозирования поперечной разностенности позволяет определять поперечную конечную раз-

стенность трубы на этапе разработки маршрута в промышленных условиях современного предприятия.

### **Выводы**

Проанализировано влияние уровня исходной разностенности на характер ее изменения в процессе расчетного анализа деформирования разнотолщинных образцов из сплавов на основе титана. Результаты показывают, что для больших значений исходной разностенности уменьшение происходит больше, но при этом значение коэффициента интенсивности изменения разнотолщинности является одинаковым.

Полученные зависимости изменения абсолютной разностенности по длине зоны обжатия стенки при прокатке на стане ХПТ-55, показали, что зависимости, полученные при расчетном анализе и при эксперименте по прокатке на промышленном стане ХПТ, демонстрируют свою схожесть.

Использование развитого метода прогнозирования поперечной разностенности при многопроходной прокатке труб из сплавов на основе титана позволяет оперативно анализировать производственные процессы и рассчитывать технологические операции с целью уменьшения расходов при производстве.

### **Список литературы**

1. Фролов В. Ф. Холодная пыльгерная прокатка труб / В. Ф. Фролов, В. Н. Данченко, Я. В. Фролов; Гос. предпр. "Научно-исследовательский трубный институт им. Я.Е. Осады, Нац. металлург. акад. Украины. – Днепропетровск : Пороги, 2005. – 255 с.
2. Хаустов Г. И. Разработка и внедрение новых способов и технологий для повышения эффективности производства холоднодеформированных труб высокого качества : Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.05 / ВНИТИ. – Днепропетровск, 1989. – 30 с.
3. Григоренко В. У., Данченко В. Н., Миленин А. А. Исследование снижения поперечной разностенности труб при редуцировании в условиях непрерывной периодической роликовой прокатки труб // Системные технологии. – 2003. – № 6 (29). – С. 140–148.
4. Данченко В. Н., Чус А. В. Продольная прокатка труб. – М. : Металлургия, 1984. – 136 с.
5. Данченко В. Н., Скоромный С. А. Определение наведенной эксцентрической разностенности труб при прокатке в непрерывном оправочном стане // Обработка металлов давлением. – М. : Металлургия, 1976. – № 59. – С. 274–279.
6. Мищенко А. В., Григоренко В. У. Развитие метода прогнозирования изменения поперечной разностенности при многопроходной прокатке труб из сплавов на основе титана на станах холодной прокатки // Обработка материалов давлением : сборник. – 2016. – №1(42). – С. 199–202.

# **ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ВАЛКОВ И МЕЖКЛЕТЬЕВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛОСЫ ПРОКАТНОГО СТАНА**

*Ботштейн В.А., Каневский А.Л., Мантула В.Д.,  
Минко А.Н., Костомаров А.С.*

*ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», г. Харьков, Украина*

## **Аннотация**

Реконструкция системы охлаждения действующих прокатных станов позволит увеличить производство проката, расширить сортамент и повысить эффективность использования охлаждающей воды. В данной работе проведено обследование систем охлаждения валков и межклетьевого охлаждения полосы прокатного стана. С использованием математической модели выполнены теоретические расчеты для выявления возможностей повышения стабильности и эффективности охлаждения с целью увеличения скорости прокатки и улучшения качества готовой продукции.

Ключевые слова: горячая листовая прокатка, система охлаждения валков, система межклетьевого охлаждения полосы.

## **Введение**

В настоящее время основными агрегатами по производству горячекатаного листа и подката для станов холодной прокатки являются непрерывные широкополосные станы горячей прокатки. Реконструкция действующих прокатных станов позволит увеличить объем производства проката, расширить сортамент и повысить качество продукции.

Одним из наиболее эффективных решений является реконструкция систем охлаждения прокатного стана, в которые входят межклетьевого охлаждения (МКО) и система охлаждения валков (СОВ).

Повышение эффективности СОВ продлевает срок службы прокатных валков и позволяет снижать расходы воды на охлаждение, а повышение эффективности МКО дает возможность увеличивать скорость прокатки и прокатывать больший сортамент толстых полос. Поэтому модернизация СОВ и МКО является приоритетным направлением в прокатном производстве горячекатаного листа.

## **Постановка задачи**

Задача работы – дать общую оценку модернизации МКО и СОВ. Для реализации этой задачи разработаны мероприятия, направленные на повышение эффективности СОВ, и рассчитаны рациональные параметры системы «антишелушения», обеспечивающие повышение качества продукции при прокатке полос минимальной и максимальной толщины, а также предложены варианты модернизации МКО, предусматривающие более интенсивное охлаждение полосы в меж-

клетьевых промежутках и, как следствие, повышение производительности чистовой группы клетей.

### **Основная часть исследований**

Изучен стан горячей прокатки производительностью до 6 млн т/год. Он оснащен системой охлаждения оборудования, которая обеспечивает подачу более 5300 м<sup>3</sup>/ч воды для охлаждения валков чистовой группы клетей и до 980 м<sup>3</sup>/ч – для межклетьевого охлаждения полосы. Давление воды в насосной станции, подающей воду на СОВ, составляет 1,5 МПа, а на МКО – 0,65 МПа.

Согласно балансной схеме прокатного стана СОВ и питающая ее насосная станция рассчитаны на расход охладителя по клетям чистовой группы на уровне ~ 5330 м<sup>3</sup>/ч. В клетях установлены коллекторы СОВ общей производительностью 6283 м<sup>3</sup>/ч. Эксплуатация таких коллекторов приводит к падению давления от насосной станции до входа в коллектор на 25 %. С учетом этих потерь установлено, что исследуемая СОВ работает при давлении на коллекторах около 0,6 МПа.

Систему межклетьевого охлаждения полосы питает насосная станция МКО. Коллекторы МКО обеспечивают небольшую зону охлаждения полосы, что служит причиной невысокой эффективности охлаждения. Суммарный расход воды на МКО почти вдвое превышает возможности насосной станции. Это обуславливает существенное падение давления на коллекторах.

Исходя из результатов проведенного обследования и выполненных на их основе теоретических расчетов можно сделать следующие выводы:

- насосы обеспечивают достаточное количество воды для охлаждения рабочих валков чистовой группы клетей;
- насосная станция с рабочим давлением 15 бар обеспечивает условия для эффективного охлаждения валков;
- в клетях чистовой группы установлено достаточное количество коллекторов;
- большинство форсунок, применяемых для охлаждения валков, имеют малые выходные отверстия и не могут надежно работать на воде оборотного цикла;
- небольшие размеры зон охлаждения валков обуславливают недостаточный теплоотвод и, соответственно, низкую эффективность использования воды в системе СОВ;
- скоростные возможности чистовой группы клетей при прокатке полос используются не в полной мере (основная причина этого – низкая эффективность охлаждения в системе МКО);
- увеличение расхода воды, подаваемой на валки, при неизменных размерах зон охлаждения является малоэффективным приемом.

На основе этих заключений были разработаны следующие технические решения для повышения эффективности СОВ и МКО:

1. Применение системы «антишелушения» совместно с увеличенной зоной охлаждения валка. Этот вариант является оптимальным, поскольку при снижении температуры валка в очаге деформации с  $563,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $486\text{ }^{\circ}\text{C}$  среднемассовая температура валка снижается с  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $76\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В результате стабильность температурного режима эксплуатации валка существенно повышается, благодаря чему решается проблема «вкатанной» окалины.

2. Малозатратный вариант модернизации МКО – использование существующих коллекторов и увеличение расстояния между крайними рядами отверстий до 170 мм (расход воды на МКО полосы остается тем же). Данный вариант модернизации несколько увеличивает неравномерность охлаждения по ширине полосы, но расположение отверстий в коллекторе в шахматном порядке уменьшает эту неравномерность.

Установлено, что реализация такого МКО позволит увеличить эффективность охлаждения полосы в межклетьевом промежутке с  $23,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $25,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (при этом скорость охлаждения возрастет с  $7,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $7,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ).

3. Применение коллекторов с плоскофакельными форсунками. Рассмотрена возможность размещения двух коллекторов с выходной стороны клетки и одного – с входной. Расстояние между коллекторами и полосой увеличивали до 0,25 – 0,3 м. Установлено, что понижение температуры полосы в межклетьевом промежутке составляет  $27,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а скорость охлаждения –  $8,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

Этот вариант охлаждения предпочтительнее предыдущего, так как в случае его реализации увеличится скорость прокатки в чистовой группе клетей.

4. Реконструкция охлаждающих коллекторов и проводковой арматуры. В данном варианте зона охлаждения полосы со стороны выхода из валков увеличена до 0,5 м, а со стороны входа – до 0,45 м. Расход воды на охлаждение полосы уменьшен более чем на 20 % по сравнению с существующим (до  $250\text{ м}^3/\text{ч}$ ).

Установлено, что в случае реализации такого варианта реконструкции температура полосы в межклетьевом промежутке понизится на  $30,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а под коллекторами МКО – на  $23,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом эффективность охлаждения полосы повысится на 27 %, а скорость охлаждения возрастет с  $7,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

Выполнен расчет температурных условий прокатки полосы  $7,91 \times 1500\text{ мм СтЗсп}$  при скорости в клетях  $6,6\text{ м}/\text{с}$ . Установлено, что модернизированная МКО при расходе воды  $\sim 1150\text{ м}^3/\text{ч}$  (это 2/3 существующего расхода) позволяет осуществлять прокатку полосы в том же температурном диапазоне при увеличенной скорости валков. Ско-

рость охлаждения полосы в межклетевых промежутках возрастает на 25 %. Установлено, что применение модернизированной МКО в последнем промежутке обеспечивает скорость охлаждения на уровне 27,8 °C/с.

### **Выводы**

1. Применение коллекторов с плоскофакельными форсунками дает возможность существенно повысить эффективность СОВ, МКО и системы «антишелушения».

2. Использование системы «антишелушения» совместно с увеличением зоны охлаждения валков позволяет снизить среднемассовую температуру валков на 18–20 °C и решить проблему «вкатанной» окалины.

3. Выявлен вариант модернизации СОВ, МКО и системы «антишелушения», позволяющий повысить стойкость валков, увеличить производительность стана и расширить сортамент прокатываемых полос.

### **Список литературы**

1. Каневский А. Л. Усовершенствование охлаждения валков и полос на станах горячей прокатки / А. Л. Каневский, В. А. Ботштейн, Ю. Н. Белобров и др. // Сталь. – 2006. – № 4. – С. 50–52.

2. Каневский А.Л. Основные факторы высокоэффективного охлаждения валков / А. Л. Каневский, Д. В. Сталинский, В. А. Ботштейн // Сталь. – 2006. – № 12. – С. 37–39.

3. Гарбер Э. А. Повышение эффективности охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки с использованием адаптивных математических моделей теплового баланса / Э. А. Гарбер, М. В. Хлопотин, Е. С. Попов, А. Ф. Савиных и др. // Производство проката. – 2009. – № 4. – С. 12–24.

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ISD HCSZ

*Гоцуляк А.А., Малыгин М.С, Матыящчик К.*

*ISD Huta Czestochowa, Czestochowa, Poland*

К энергоэффективным технологиям производства толстых листов, предназначенных для ответственных металлоконструкций можно отнести, в первую очередь, следующие виды прокаток:

- контролируемая (нормализационная) прокатка;
- термомеханическая обработка;
- закалка с прокатного нагрева.

Энергоэффективность всех указанных видов прокаток и обработок заключается в возможности существенной экономии ресурсов за счет замены таких энергоемких операций термической обработки как улучшение (закалка + отпуск) и нормализация регламентированными режимами прокатки и охлаждения листов непосредственно после завершения деформации в чистовой клетке.

По современной классификации контролируемой (нормализационной) прокаткой - CR называют процесс, при котором последние проходы при прокатке выполняются в области температур нормализации последующим охлаждением на воздухе, в результате чего обеспечивается получение металла, свойства которого в основном соответствуют свойствам после нормализации.

Термомеханическая обработка – ТМ – процесс, предполагающий регламентацию температурно-деформационных параметров прокатки. При этом, как правило, деформация металла заканчивается при температуре близких к температуре  $Ar_3$  или в двухфазной области. После завершения деформации может применяться ускоренное охлаждение (АСС).

Ускоренное охлаждение (АСС) – процесс принудительного охлаждения проката со скоростями, превышающими скорость охлаждения на воздухе и выполняется, непосредственно, после завершения деформации на специальном оборудовании.

Закалка с прокатного нагрева – процесс, при котором прокатка стали, завершается при температурах выше температуры  $Ar_3$  с последующим ускоренным охлаждением со скоростями, обеспечивающими формирование требуемой структуры. При этом возможны варианты как полной, так и прерванной закалки.

Под полной закалкой подразумевают охлаждение листов со скоростями и до температур, обеспечивающих получение мартенситной структуры по всей толщине листа. Для конструкционных сталей в

большинстве случаев после полной заковки требуется дополнительный отпуск.

При прерванной заковке интенсивное охлаждение проводят до определенных температур и, затем, на воздухе. Это обеспечивает формирование закалочных структур в поверхностных слоях и их самоотпуск за счет внутреннего тепла охлаждаемого листа.

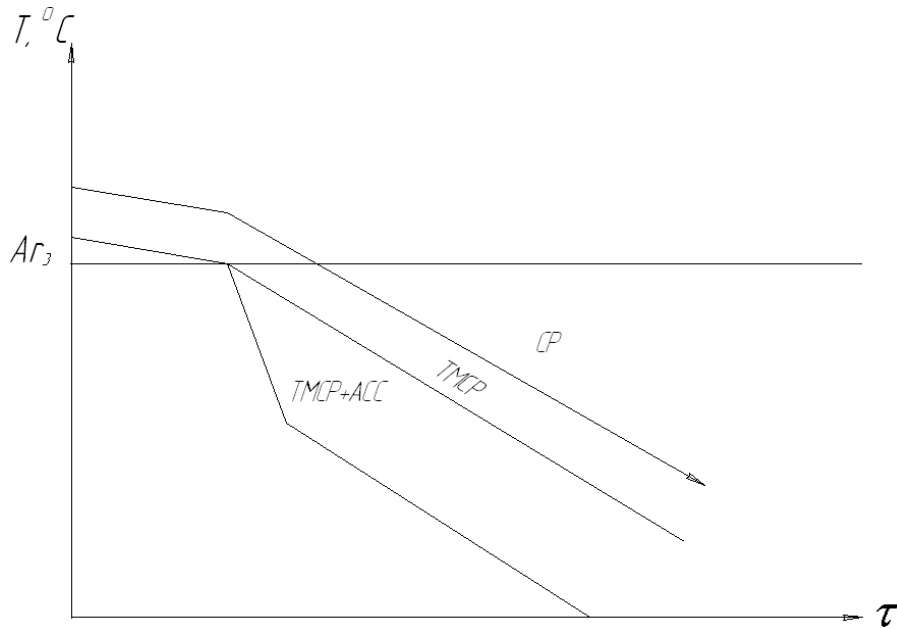


Рис. 1. Схема технологических процессов – CP, ТМСП и ТМСП + АСС

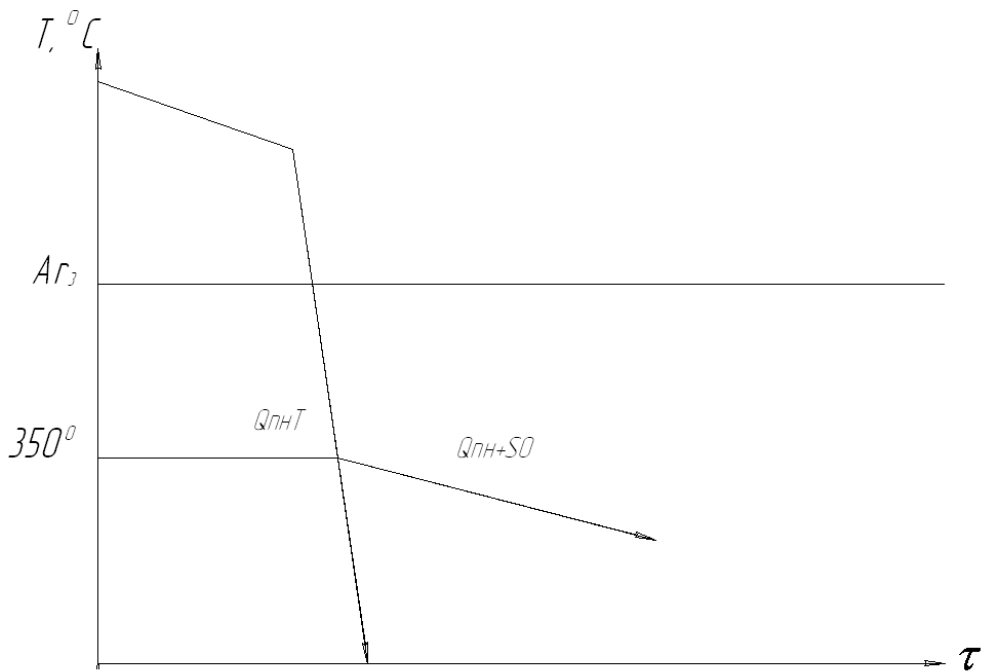


Рис. 2. Схема технологического процесса – заковка и прерванная заковка

В условиях металлургического завода ISD HCZ успешно применяются все вышеуказанные технологии. По режимам контролируемой (нормализационной) прокатки производится толстолистовой прокат марок S235, S275, S355, S420, S460 и их модификаций в толщинах до 80мм, поставляемых по стандарту EN 10025 -2, котельных сталей марок P235GH, P265GH, P295GH, P355GH по EN 10028- 2, судосталей категорий A, B, D, E, A32-40, D32-40, E32-40 и др.

Применение технологии контролируемой (нормализационной) прокатки взамен нормализации обеспечивает экономию до 12 \$ на тонну проката.

Термомеханическая обработка, в т. ч. и с ускоренным охлаждением, применяется при производстве сталей марок S355M, S420M, S460M в толщинах до 60 мм включительно, поставляемых по стандартам EN10025-4, EN 10225:2009, EN 10149-2, техническим условиям CATERPILLAR. По технологии термомеханической обработки производится также листовая прокатка для производства труб магистральных нефтегазопроводов категорий K46- K65 для российских потребителей, X42- X80 по стандартам API и L245M-L485M по стандарту EN 10208-2. Технология термомеханической обработки не только обеспечивает экономию энергоресурсов за счет исключения энергозатратной термической обработки, но позволяет получать прокат с уникальным сочетанием свойств. Так одновременно с повышенными прочностными свойствами обеспечиваются высочайшие энергоемкость разрушения и сопротивления развитию трещин при испытаниях CTOD DWTT, что не достигается другими видами обработки.

Закалка с прокатного нагрева применима для высокопрочных марок стали типа S690QL по стандарту EN 10025-4, судостали марок A500, D500, E500, F500, листов из износостойкой стали HARTPLAST 400, 450 и 500.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИАМЕТРА ВАЛКОВ И НАЧАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ВЕДУЩИХ ШЕСТЕРЕН СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ВАЛКОВОЙ ПРОКАТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ОСЕВЫХ УСИЛИЙ

*Григоренко В.У., Пилипенко С.В.*

*Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

В работе приведены результаты аналитических исследований влияния соотношений начального диаметра ведущих шестерен и диаметра ручья калибра на величину осевых усилий при холодной прокатке труб на станах типа ХПТ и КРВ.

Результаты аналитического моделирования процесса показали, что небольшие изменение бочки калибра приводят к изменениям величины осевых усилий в относительно больших пределах, что позволяет создавать условия прокатки с очень близкими значениями естественного и принудительного катающих радиусов. При этом диаметр бочки вала можно изменять в столь угодно малых диапазонах, тогда, как парк размеров ведущих шестерён ограничен.

Ключевые слова: холодная прокатка, диаметр ведущей шестерни, диаметр бочки калибра, оптимизация величины осевых усилий.

## **Введение**

В действующих станах холодной пильгерной прокатки (ХПТ и КРВ) кинематические условия деформации создаются искусственно подбором отношения величины начального радиуса ведущей шестерни (рис. 1) (далее – принудительный катающий радиус) к естественному катающему радиусу. Естественный катающий радиус определяют для случая свободной прокатки. Чем больше разница между величиной естественного и принудительного катающих радиусов, тем большие осевые силы действуют на конус деформации и оправку. Это негативным образом влияет на качество труб, увеличивает расход инструмента и повышает температуру металла в мгновенном очаге деформации [1 – 2]. В определённых случаях процесс ХПТ вообще становится невозможным.

## **Анализ исследований**

Как видно из рисунка (1 а), обратно поступательное движение клетки относительно конуса деформации одновременно с вращательным движением валков с калибрами в станах холодной прокатки труб задается движением ведущей шестерни по шестеренной рейке. При этом величина принудительного катающего радиуса во всех сечениях конуса деформации равна величине начального радиуса ведущей шестерни ( $c_{ш}$ ). Естественный катающий радиус по сечениям рабочего конуса деформации является величиной переменной (рис. 1 б,  $c_{к.е.}$ ).



Влияние на осевые усилия оказывает степень заполнения ручья калибра, которая, в свою очередь, зависит от развалки калибра, условий трения и др. Эти параметры меняются в зависимости от величин подачи, поворота и др.

Предложено определять естественный катающий радиус по упрощенным зависимостям типа [1]:

$$D_k \approx D_i - 0.75 \cdot D_p; \quad R_k \approx R_i - 0.7 \frac{D_p}{2}; \quad (1 - 2)$$

$$D_k = D_i - 0.75 \cdot D_p; \quad R_k \approx R_0 - \frac{3}{4} H, \quad (3 - 4)$$

где  $R_i$  и  $D_i$  – идеальные радиус и диаметр валка;  $D_p$  – диаметр калибра;  $H$  – глубина ручья калибра.

В практике прокатки подбор диаметров шестерен тоже производится по подобным формулам:

$$D_{ш} = D_0 - k \cdot (D_3 + D_T) \cdot 0.45; \quad D_{ш} = D_0 - (D_3 + D_T) \cdot 0.35. \quad (5 - 6)$$

где  $D_3$  и  $D_m$  – диаметры заготовки и трубы;  $D_0$  – диаметр бочки калибра;  $k = 0,7 - 0,9$  – поправочный эмпирический коэффициент.

Для рационального выбора соотношения естественного и принудительного катающего радиуса (начальный диаметр шестерни) авторы данной работы создали и рекомендуют аналитический метод [3, 4, 5].

### Основной материал

Для анализа влияния диаметра шестерен и валков на величины осевых усилий на базе аналитических зависимостей Ю.Ф. Шевакина [1] была создана программа, позволяющая рассчитывать осевые усилия для конкретных параметров процесса [4, 5]. С использованием данной программы проанализировано влияние величины диаметра ведущей шестерни (коим задается положение принудительного катающего радиуса относительно неизменного по величине для каждого типа станов ХПТ диаметра бочки калибра) на величину осевых усилий (стан ХПТ 75, маршрут – 85 x 14,5 – 60 x 7, сплав Gr2,  $m = 6$  мм).

Изменение величины диаметра ведущей шестерни в диапазоне от 350 до 400 мм приводит к значительному изменению не только величины, но и знака осевой силы (рис. 2).

В настоящее время новым нашедшим применением способом оптимизации величины осевых усилий является заложенная в конструкцию клетки (например, стан КРВ-25) возможность изменять не только диаметр ведущей шестерни, но и диаметр бочки калибра (рис. 3).

Такое простое решение позволяет более рационально создавать необходимые кинематические условия процесса холодной прокатки труб.

Для анализа влияния диаметра бочки калибра на величину осевых усилий выбран на стане КРВ 25. Диаметр валка на этом стане

изменяется в пределах 196,5 – 212 мм (при этом, в комплекте стана предусмотрено 2 типоразмера диаметров ведущей шестерни). Для расчетного анализа выбран маршрут (31,75 x 5,08 – 15,88 x 2,59 мм, сплав Gr-2,  $D_{ш} = 189$  мм, оптимальная величина  $D_{бв} = 205,5$  мм). Для моделирования выбран диапазон диаметров бочки калибра от 204 до 208 мм. Результаты расчетов приведены на графике (рис. 4).

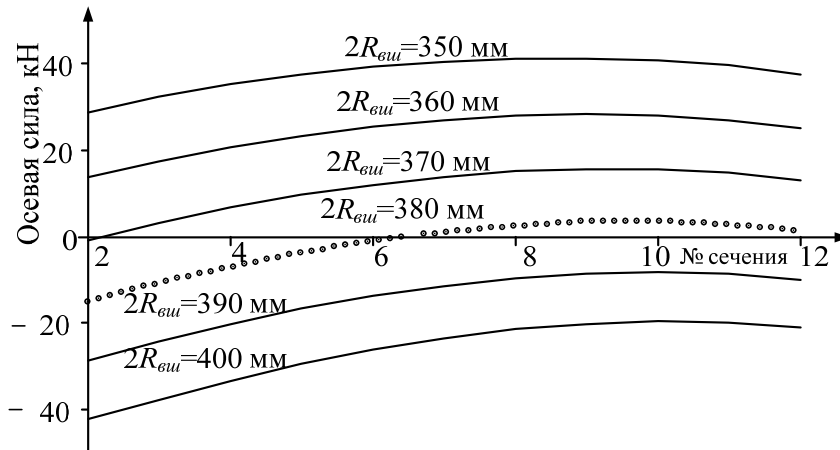


Рис. 2. Влияние величины радиуса ведущей шестерни на интенсивность распределения величины осевых сил в МОД вдоль конуса деформации (ХПТ-75, маршрут – 85 x 14,5 – 60 x 7, сплав Gr2,  $m = 6$  мм)

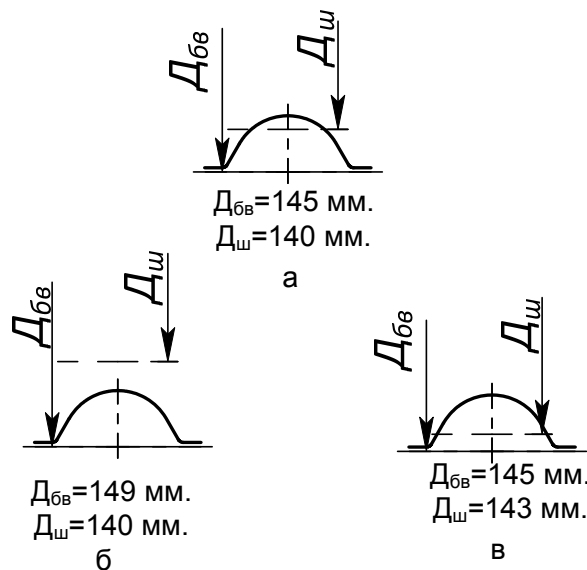


Рис. 3. Изменение места прохождения катающего диаметра (равного  $D_{ш}$ ) относительно произвольного поперечного сечения ручья калибра при изменении диаметра бочки калибра ( $D_{бв}$ ) и диаметра ведущей шестерни ( $D_{ш}$ ) (сечение зоны калибровки калибра стана КРВ-25, маршрут 8,9 x 0,75 – 6,35 x 0,44 мм):

- а) положение согласно калибровке;
- б) увеличение диаметра бочки калибра на 4 мм;
- в) увеличение диаметра ведущей шестерни на 3 мм

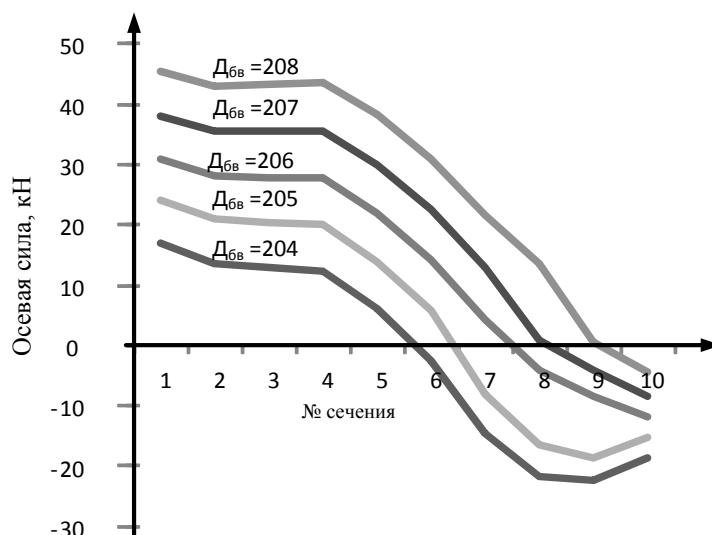


Рис. 4. Влияние величины диаметра бочки калибра на распределение величины осевых сил в МОД вдоль конуса деформации (КРВ 25, маршрут – 31,75 x 5,08 – 15,88 x 2,59, сплав Gr 2,  $m = 2,5$  мм)

### Выводы

Кинематические условия деформации в современных станах холодной пильгерной валковой прокатки можно изменять как при помощи подбора начального диаметра ведущей шестерни, так и с помощью изменения диаметра бочки калибра. Одна из целей этого – оптимизация величины осевых усилий. Результаты моделирования показали, что небольшие изменения бочки валка позволяют изменять величину осевых усилий в относительно больших пределах, что позволяет создавать условия прокатки при очень близких значениях естественного и принудительного катающих радиусов. При этом диаметр бочки валка можно изменять в сколь угодно малых диапазонах, тогда как парк размеров ведущих шестерен ограничен.

### Список литературы

1. Шевакин Ю. Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю. Ф. Шевакин. – М. : Металлургиздат, 1963. – 269 с.
2. Тетерин П. К. Теория периодической прокатки / П. К. Тетерин. – М. : Металлургия, 1978. – 256 с.
3. Григоренко В. У. Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пильгерної прокатки труб і калібровки інструмента : [Монографія] / Григоренко В. У., Пилипенко С. В., Головченко А. П. – Дніпропетровськ : Пороги. – 2015. – 120 с.
4. Григоренко В. У. Расчет оптимального соотношения радиусов калибра и валка станов холодной прокатки труб / В. У. Григоренко, С. В. Пилипенко // Сталь. – 2012. – №8. – С. 37–39.
5. Пилипенко С. В. Развитие метода расчета рационального соотношения величин принудительного и естественного катающего радиусов калибра станов холодной прокатки труб / С. В. Пилипенко / Обработка материалов давлением. – № 4 (37) : 36 науч. праць. – Краматорськ, 2013. – С. 165–167.

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДЕФОРМАЦИИ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК В МЕТАЛЛУРГИИ

*Лазоркин А.В., Лазоркин Д.В.*

*ООО «Лазоркин - Инжиниринг», г. Запорожье, Украина*

## Аннотация

В данном докладе представлены некоторые результаты работы компании ООО «Лазоркин- Инжиниринг» по созданию энергоэффективных технологий и оборудования для деформации слитков и заготовок. Основой для всех этих технологий являются технологии четырехстороннего обжатия заготовок в специальных четырехбойковых ковочных устройствах (FDFD), которые устанавливаются на действующие гидравлические ковочные пресса, либо на их основе создаются новые радиально-ковочные машины (РКМ) или специальные установки.

Ключевые слова: слиток, заготовка, деформация, энергоэффективность, технологии и оборудование.

## Введение

При традиционной ковке на прессе двумя бойками металл под бойками течет не только в направлении продольной оси заготовки, но и, в значительной степени, перпендикулярно к направлению продольной оси заготовки (так называемое уширение заготовки). Для того, чтобы убрать это уширение заготовку поворачивают на угол  $90^\circ$  и опять обжимают ее по всей длине. На это расходуется дополнительная энергия и время.

При ковке по технологии FDFD уширения заготовки практически нет и весь металл в процессе деформации течет в направлении продольной оси заготовки (рис. 1). За счет этого повышается производительность процесса и уменьшаются затраты энергии на пластическую деформации заготовки. Кроме того, за счет более высокой производительности процесса, заготовка не успевает остыть и поэтому сокращаются дополнительные подогревы заготовки. За счет этого также уменьшается расход энергии на производство поковок.

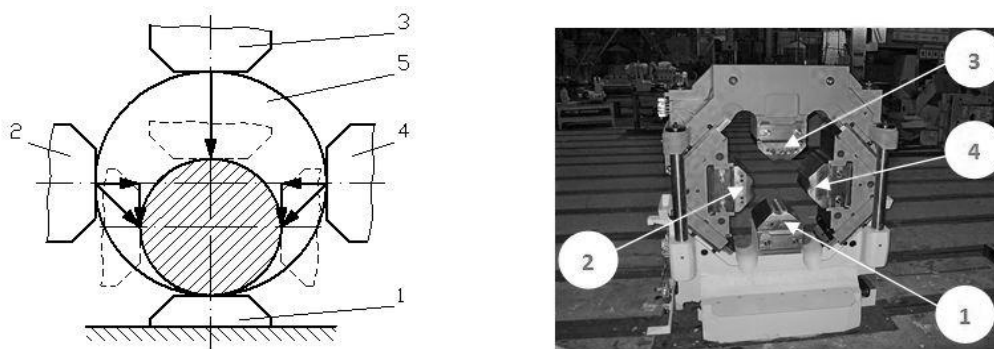


Рис. 1. Четырехбойковое ковочное устройство и схема обжатия

## Энергоэффективные технологии

Разработка технологииковки обычно начинается с изучения существующей у заказчика технологии изготовления поковок и разработки оптимальной схемы их производства с использованием FDFD, включающей нагрев слитков, черновую и калибрующую ковку, дополнительные подогревы заготовок, рубку или резку поковок, правку поковок (при необходимости), термообработку поковок. Однако, главным звеном всей технологии является технологияковки четырьмя бойками в FDFD. В результате этой работы заказчик иногда существенно меняет всю технологическую схему производства поковок, а именно: использует дляковки слитки с другими размерами и формами, меняет технологию нагрева иковки слитков, а иногда проводит и существенную модернизацию ковочного пресса.

Выполнив расчеты методом конечных элементов нами было установлено, что при ковке в FDFD можно в несколько раз увеличить степень деформации при каждом единичном обжатии, по сравнению с традиционной ковкой двумя бойками. При этом заготовка не разрушится в процессе деформации и на ней не будет трещин. Кроме того, за счет особой схемы движения бойков и обжатий с большими степенями деформации всегда обеспечивается высокое качество металла, которое невозможно получить с помощью других технологийковки (рис. 2).

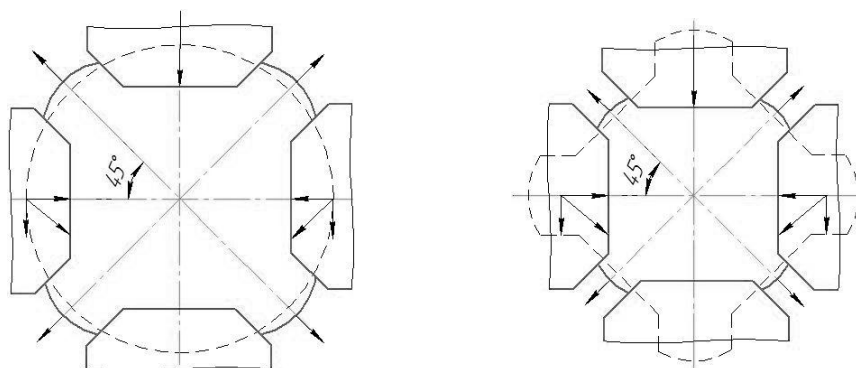


Рис. 2. Схема обжатия заготовки круглого сечения с вытеснением металла между бойками

В таблице 1 приведены примеры получения поковок по традиционной технологии (ковка двумя бойками, № 1) и по технологииковки в FDFD, № 2.

По известной технологии ковку на ковочном прессе осуществляют вначале двумя плоскими бойками, затем плоские бойки убирают из рабочего пространства пресса, устанавливают два вырезных бойка и калибруют в них поковку (технология № 1). В процессековки слитка двумя плоскими бойками заготовка быстро остывает ниже допустимого интервала ковочных температур и поэтому ее после 9-го прохода

отправляют на дополнительный подогрев (табл. 1). Ковка слитка массой 4300 кг выполняется за 23 прохода, а время ковки слитка по традиционной технологии (без учета времени на дополнительный подогрев и смену бойков) составляет 1195 секунд.

Таблица 1

Примеры технологий получения поковок двумя бойками (№ 1)  
и четырьмя бойками в FDFD (№ 2)

№	Этап ковки	Тип инструмента (бойков)	Движение манипулятора	Диаметр исходной заготовки, мм	Диаметр готового изделия, мм	Шаг подачи манипулятора, мм	Поворот манипулятора после каждого прохода, грд.	Поворот манипулятора после каждого обжатия, грд.	Дополнительный подогрев	Температура, °С	Время, сек.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	Плоские	Прям-ное	600	530	200	0	0	-	1240	15
	2	Плоские	Прям-ное	530	530	200	90	0	-		18
	3	Плоские	Прям-ное	550	470	240	90	0	-		17
	4	Плоские	Прям-ное	550	470	240	90	0	-		20
	5	Плоские	Прям-ное	490	400	240	90	0	-		25
	6	Плоские	Прям-ное	490	400	240	90	0	-		30
	7	Плоские	Прям-ное	420	350	240	90	0	-		34
	8	Плоские	Прям-ное	420	350	240	90	0	-		41
	9	Плоские	Прям-ное	370	300	240	90	0	-		44
	10	Плоские	Прям-ное	370	300	240	90	0	Да		47
	11	Плоские	Прям-ное	320	278	240	90	0	-		51
	12	Плоские	Прям-ное	320	278	240	90	0	-		53
	13	Плоские	Прям-ное +Поворот	305	278	260	90	0	-		48
	14	Плоские	Прям-ное	395	335	260	0	0	-		52
	15	Плоские	Прям-ное	395	335	260	90	0	-		56
	16	Плоские	Прям-ное	345	278	260	90	0	-		58
	17	Плоские	Прям-ное	345	278	260	90	0	-		60
	18	Плоские	Прям-ное +Поворот	300	278	260	90	0	-		45
	19	Плоские	Прям-ное +Поворот	300	278	260	45	0	-		46
	20	Плоские	Прям-ное +Поворот	300	278	260	90	0	-		46
	21	Вырезные 290	Прям-ное +Поворот, Калибровка	300	278	50	0	45	-		114
	22	Вырезные 290	Прям-ное +Поворот, Калибровка	283	278	50	0	40	-		114
	23	Вырезные 290	Прям-ное +Поворот, Калибровка	283	278	35	0	35	-	890	160
<b>Всего</b>										<b>Σ 1195</b>	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	1	FDFD	Прям-ное	600	560	330	0	0	-	1240	18
	2	FDFD	Прям-ное	560	520	380	45	0	-		18
	3	FDFD	Прям-ное	520	490	290	45	0	-		23
	4	FDFD	Прям-ное	490	450	300	45	0	-		27
	5	FDFD	Прям-ное	450	420	280	45	0	-		32
	6	FDFD	Прям-ное	420	360	250	45	0	-		44
	7	FDFD	Прям-ное	360	340	300	45	0	-		42
	8	FDFD	Прям-ное	340	285	260	45	0	-		66
	9	FDFD	Прям-ное	340	285	370	45	0	-		44
	10	FDFD	Прям-ное +Поворот, Калибровка	285	275	50	0	45	-		114
	11	FDFD	Прям-ное +Поворот, Калибровка	285	275	35	0	35	-	900	159
<b>Всего</b>										<b>Σ 587</b>	

При ковке в FDFD (технология № 2, табл. 1) количество проходов составляет 11, а время ковки – 587 секунд, что в два раза меньше, чем при ковке двумя бойками. При этом не требуется дополнительный подогрев заготовки и не требуется замена бойков при калибровке, так как и при черновой ковке (проходы 1 – 9) и при калибрующей ковке (проходы 10, 11) используют один комплект бойков с вогнутыми рабочими поверхностями. Потребление электроэнергии ковочным прессом при ковке по технологии № 2 примерно в 1,5 – 1,6 раза меньше, чем при ковке по технологии № 1. Кроме того, уменьшается расход газа на нагрев заготовок примерно на 20 – 30 %.

Для разных заказчиков нами были разработаны энергосберегающие технологии получения поковок из конструкционных, инструментальных, нержавеющей, жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов. Специальные технологии и конструкции FDFD были разработаны, изготовлены и внедрены для ковки слитков из никелевых, титановых, циркониевых, ниобиевых и платиновых сплавов для химической, электронной, авиационной, космической и атомной промышленности.

Разработаны и внедрены технологии для получения поковок сложной формы, используемые для изготовления следующих изделий:

- оси железнодорожных вагонов и локомотивов;
- утяжеленные бурильные трубы;
- валы электродвигателей и судовые валы;
- корпуса шаровых кранов больших размеров;
- корпуса атомных реакторов;
- полые поковки больших размеров круглого, квадратного и прямоугольного сечения для специзделий и др.

## **Энергоэффективное оборудование для деформации слитков и заготовок на базе устройства FDFD**

Главными составляющими энергосберегающих технологий являются запатентованные нами в Украине, России, США, Бразилии, в странах Евросоюза, Китае, Кореи и других странах мира изобретения на четырехбойковые ковочные устройства (FDFD), технологииковки, ковочные комплексы и РКМ [1 – 3]. В зависимости от решаемой технологической задачи были разработаны либо только конструкция FDFD для существующего у заказчика ковочного пресса (рис. 3), либо конструкция FDFD с модернизацией ковочного пресса, либо РКМ с механическим приводом, или специальная установка с индивидуальным механическим или гидравлическим приводом.

Во всех этих вариантах использовались FDFD разной конструкции. За счет использования этих устройств достигалась экономия энергии как в процессе деформации заготовок, так и при их нагреве.

По нашим патентам и нашей документации изготовлено и установлено на промышленных предприятиях Украины, России, Китая, Испании, Германии, Италии и Бразилии более 20 энергоэффективных FDFD и специальных установок на их основе.



Рис. 3. Фото ковочного блока в Бразилии

### **Заключение**

1. Разработаны и освоены энергосберегающие технологииковки в FDFD. Для сравнения даны две реальные технологииковки: традиционная технологияковки двумя бойками и технологияковки в FDFD.

2. Разработаны и внедрены энергоэффективные устройства FDFD, ковочные комплексы, РКМ и специальные установки.

3. Представлена информация о всех изготовленных промышленных четырехбойковых ковочных устройствах, установках и РКМ по нашим патентам.

### **Список литературы**

1. Lazorkin V. Four-peen forging device for forging presses. Европейский патент № 2540411 B1 от 17.08.2016.
2. Viktor Lazorkin, Dmitriy Lazorkin / Proc. 19<sup>th</sup> IFM 2014, Sept. 29 – Oct. 3, Tokyo Bay Area, Japan.
3. Viktor Lazorkin, Dmitriy Lazorkin. Four-die forging devices in primary metal production. “Kovarenstui”, rijen 2015/55, p. 26-30.

# ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА НА СТАНЕ ISD HCZ

*Малыгин М.С., Матыящик К.*

*ISD Huta Czestochowa, Czestochowa, Poland*

Традиционными способами повышения комплекса механических свойств стали, являются различные виды термообработки – нормализация, отпуск, закалка + высокий отпуск. Все они предполагают значительные затраты связанные с нагревом листов в печах.

В последнее время все больше используются оборудование и технологии с использованием тепла прокатного нагрева и последующего ускоренное охлаждение проката непосредственно после завершения деформации.

Для этого в линии стана «3600» ISD HCZ было установлено специальное оборудование – MULPIC (Multi Purpose Interrupted Cooling).

MULPIC – обеспечивает регулируемое, в широком диапазоне температур и скоростей, принудительное охлаждение проката.

В основном реализуются следующие варианты:

- ускоренное охлаждение с различными скоростями охлаждения – процесс ACC;
- закалка (интенсивное охлаждение) с прокатного нагрева (процесс DQ). В этом случае, как правило, требуется дополнительный отпуск;
- прерванная закалка (интенсивное охлаждение до определённых температур и последующий самоотпуск за счёт внутреннего тепла проката).

Установка MULPIC расположена в прокатной линии стана между чистовой клетью и роликотправильной машиной горячей правки НЛ. Установка состоит из 4 групп душирующих устройств в зонах А, В, С, D. Каждая зона имеет верхние и нижние душирующие коллектора, которые обеспечивают оптимальное динамическое охлаждение материала.

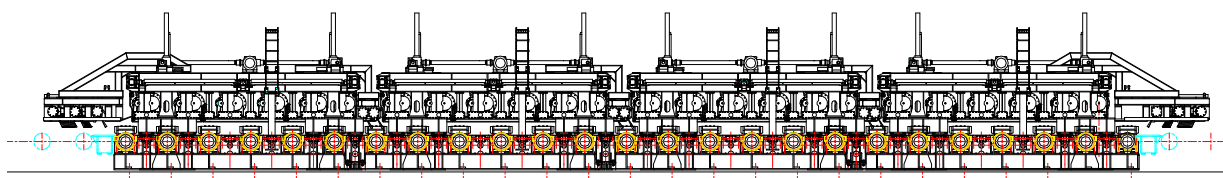


Рис. 1. Общий вид установки MULPIC

MULPIC – обеспечивает охлаждение проката толщиной 5 – 100 мм и шириной до 3450 мм, со скоростями от 1,55 л/с/м<sup>2</sup> до 33 л/с/м<sup>2</sup>.

Наибольшее применение получил при производстве листов для магистральных газонефтепроводных труб. За последние годы были выполнены крупные заказы на поставку штрипсов категории K65, K60, X70 для ЧТПЗ и Волжского Трубного Завода.

Листовой прокат категории X70 для ЧТПЗ был поставлен в толщинах 25,0 – 28,5 мм, с комплексом механических свойств, не достигаемых другими технологиями.

Успешно опробовано применение MULPIC для производства конструкционных сталей типа S355, S460M по EN10025 – 3 судовых сталей повышенной и высокой прочности, конструкционных высокопрочных сталей типа S690 по стандартам EN 10025 – 4.

Применение MULPIC обеспечивает значительную экономическую эффективность за счёт исключения печного нагрева проката и освоения новых высокоэффективных видов проката.

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ НА ТЕПЛОЙ ЭФФЕКТ В СПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ 7075

*Кулаковская А.В., Дыя Х., Лабер К.*

*Ченстоховский Технологический Университет, Ченстохова, Польша*

## Введение

Тепловой эффект пластической деформации – как прирост температуры образца оказывает существенное влияние на распределение кривых течения в условиях динамического нагружения в процессе разного рода пластометрических испытаний (сжатие, растяжение и кручение) [1].

Тепловой эффект пластической деформации особенно важен при динамических исследованиях холодной пластической деформации при температурах, в которых значение прироста температуры  $\Delta T$  находится в диапазоне значений  $150 \div 200$  °С и более [2].

На основании опытных данных можно сделать вывод о зависимости реальной температуры от сопротивления деформации, скорости и степени деформации. В результате прироста температуры деформируемого материала, полученное сопротивление деформации для реальной температуры будет ниже значений сопротивления деформации для заданной температуры. Эффект влияния прироста температуры может быть настолько существенен что возникает необходимость в корректировке параметров учитывающей изменение температуры в процессе горячей пластической деформации [1, 2].

## Материал и методика исследований

В качестве материала для исследований были выбраны образцы алюминиевого сплава 7075 с химсоставом, соответствующим требованиям стандарта PN-EN 573-1:2006 Алюминий и сплавы алюминия – Химический состав и виды изделий, изготовленных методами ОМД – Часть 1: Система обозначений., приведенном в таблице 1.

Таблица 1 – Химсостав исследуемого алюминиевого сплава 7075, % мас.

Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Ti	Mn	Si	Al
5,72	2,44	4,63	0,2	0,28	0,08	0,13	0,14	ост.

В качестве схемы деформации было выбрано кручение, так как в этом процессе нет трения на контактных поверхностях, поэтому тепловой эффект возникает только за счет работы пластической деформации [1 ÷ 3].

Из алюминиевых прутков диаметром 20 мм были изготовлены образцы для пластометрических исследований с диаметром рабочей части 6 мм и длиной 10 мм, как на рисунке 1.

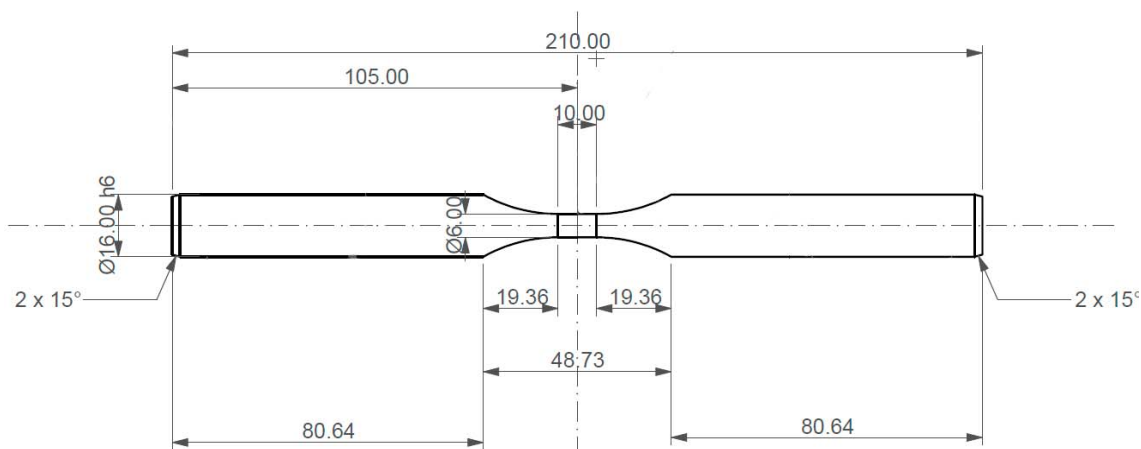


Рис. 1. Чертеж образцов для пластометрических исследований

Изучение влияния параметров деформации на тепловой эффект в алюминиевом сплаве 7075 проводили на скручивающем пластометре STD 812 фирмы Thermoanalyse GmbH.

Образцы для испытаний нагревали до температур  $150 \div 350$  °С и деформировали по схеме кручения со скоростью деформации 0,1; 1,0 и  $10,0 \text{ с}^{-1}$  до разрушения.

Тепловой эффект при деформации регистрировали с помощью термовизорной камеры ThermoCAM SC640 производства FLIR Systems. При исследованиях учитывалась максимальная температура разогрева исследуемых образцов. При обработке результатов главным фактором было достижение температуры солидуса исследуемого материала ( $477$  °С [4]).

### Результаты исследований

По результатам исследований влияния параметров деформации на тепловой эффект в алюминиевом сплаве 7075 построены гистограммы изменения прироста температуры в зависимости от температуры и скорости деформации, представленные на рисунке 2.

На основании данных, представленных на рисунке 2 можно сделать вывод о том, что для образцов, деформируемых в диапазоне температур  $150 \div 250$  °С при увеличении скорости деформации наблюдается увеличение теплового эффекта пластической деформации.

При деформации образцов при 300 и 350 °С наименьший прирост температуры наблюдается при скорости деформации  $1,0 \text{ с}^{-1}$ , а наибольший – при скорости деформации  $0,1 \text{ с}^{-1}$ . Стоит отметить, что при скорости деформации 0,1 и  $1,0 \text{ с}^{-1}$  наибольший тепловой эффект на-

блюдается при деформации образцов при температуре 300 °С, а для скорости деформации 10,0 с<sup>-1</sup> наибольший прирост температуры деформируемого материала наблюдается для образцов, деформируемых при температуре 250 °С.

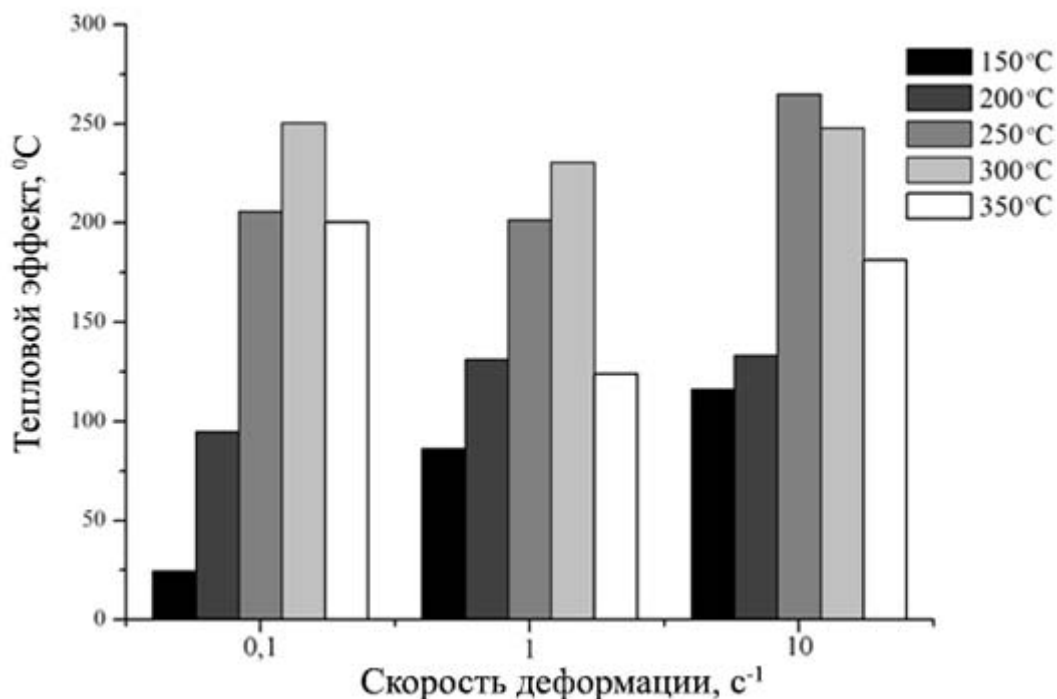


Рис. 2. Тепловой эффект в алюминиевом сплаве 7075 в зависимости от температуры и скорости деформации

Исследования показали, что в процессе деформации до температуры солидуса разогреваются образцы, с исходной температурой деформации 300 и 350 °С. Образцы, с исходной температурой деформации 250 °С разогреваются до двухфазной области только при деформации со скоростью 10 с<sup>-1</sup>.

### Выводы

Из анализа результатов исследования степени влияния параметров деформации на тепловой эффект в алюминиевом сплаве 7075 следует, что при температуре деформации 350 °С тепловой эффект существенно снижается, что свидетельствует о протекании в исследуемом материале фазовых превращений (растворение интерметаллидных включений), т.к. температура солидуса в равновесном состоянии для исследуемого алюминиевого сплава составляет 475 °С.

Так как деформация образцов из алюминиевого сплава 7075 с исходной температурой выше 300 °С приводит к разогреву материала до температур выше температуры солидуса, то для деформации в однофазной области рекомендуется проводить процесс деформации

при исходной температуре не выше 250 °С. При этом следует помнить, что при скорости деформации  $10 \text{ с}^{-1}$  при исходной температуре 250 °С также наблюдается превышение температуры солидуса исследуемого сплава.

### Список литературы

1. Галкин А.В., Дья Х., Зиновьев А.В. Пластометрические исследования реологии деформируемых материалов. Прогрессивные технологии ОМД. Учебно-методическое пособие. – М. : ИРИАС, 2009. – С. 274–292.
2. Dyja H., Gałkin A., Knapiński M.: Reologia metali odkształcanych plastycznie. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010.
3. Gałkin A. Badania plastometryczne metali i stopów. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1990.
4. ASM Handbook. Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA, pp. 17–460.

**Раздел 8.**  
**Энергоэффективный операционный  
менеджмент и инженерия  
производства**

**Редактор раздела** – доцент, к.э.н.,  
заведующий кафедрой менеджмента  
Национальной металлургической академии Украины  
**Козенков Д.Е.**

**Рецензент** – профессор, д.э.н.,  
декан факультета экономики и менеджмента  
Национальной металлургической академии Украины  
**Ковальчук К.Ф.**

# РЕІНЖИНІРИНГ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ УКРАЇНИ

*Альошина Т.В.*

*Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

## **Анотація**

Стаття присвячена питанням реорганізації бізнес-процесів на промислових підприємствах України. Описані типові етапи здійснення реінжинірингу бізнес-процесів. Наведені відмінності реалізації реінжинірингу на українських промислових підприємствах.

Ключові слова: бізнес-процеси, алгоритм, етапи, реінжиніринг

## **Вступ**

Сучасні тенденції розвитку держави свідчать про зростаючий інтерес до шляхів вдосконалення управління організаціями, пошук нових шляхів покращення процесів функціонування, особливо у виробничій сфері. Провідні економісти світу висвітлюють радикальну концепцію зміни бізнесу, а саме реінжиніринг бізнес-процесів, який активно витісняє всі інші підходи. Саме за допомогою концепції реінжинірингу суб'єкти господарювання мають можливість, не тільки ефективно функціонувати в сучасних умовах ринку, а й протистояти кризовим явищами економіки.

## **Постановка задачі**

Метою даного дослідження є визначення сутності поняття реінжинірингу бізнес-процесів, перелік та опис типового алгоритму здійснення реорганізації бізнес-процесів, а також визначення відмінностей здійснення реінжинірингу для промислових підприємств України.

## **Основна частина дослідження**

Ідеологами реінжинірингу є М. Хаммер та Дж. Чампі, які трактують сутність реінжинірингу у своїх працях наступним чином: «Це фундаментальне переосмислення та радикальне перепроектування бізнес-процесів компанії для досягнення корінних покращень в основних актуальних показниках їх діяльності – вартості, послугах, якості, темпах» [1, с. 35].

Зазвичай вчені виділяють наступні етапи реінжинірингу бізнес-процесів:

- аналіз структури та ефективності існуючих бізнес-процесів підприємства;
- розробка проекту реорганізації системи бізнес-процесів;
- документація та моделювання майбутніх бізнес-процесів;

- проведення порівняльного аналізу структури процесів;
- впровадження нових бізнес-процесів та технологій;
- оцінка результативності реінжинірингу.

На першому етапі проводиться якісний і кількісний аналіз системи існуючих процесів підприємства. Якісний аналіз полягає у виявленні системності, зручності та функціональності процесів, тобто з'ясуванні поведінкових характеристики бізнес-процесів у взаємодії із внутрішнім та зовнішнім середовищем.

Кількісний аналіз показує загальну прибутковість підприємства у період функціонування існуючої системи бізнес-процесів та допомагає оцінити ступінь економічної ефективності діяльності підприємства.

На другому етапі визначаються цілі і завдання проекту реорганізації бізнес-процесів, а також визначається концепція реінжинірингу. На даному етапі, як правило, формується команда по реінжинірингу, яка може складатися як із співробітників компанії, так із запрошених спеціалістів.

На наступному етапі виконується побудова графічних моделей бізнес-процесів на основі запропонованої методики їх документування, хронометруються складові операції бізнес-процесів.

На четвертому етапі проводиться аналіз бізнес-процесів з метою порівняння їх з бізнес-процесами лідируючих структурних підрозділів підприємства або підприємств-конкурентів.

Метою п'ятого етапу є впровадження реорганізованих процесів на практиці. При цьому реорганізація може проводитися не тільки для всього підприємства, а й для окремого процесу чи підрозділу.

На шостому етапі необхідно співставити результати ефективності функціонування бізнес-процесів із запланованими на початку реінжинірингу критеріями з урахуванням витрат за видами функціональної діяльності.

Реінжиніринг бізнес-процесів на промислових підприємствах має на меті підвищення адаптації виробництва до мінливих умов ринкового середовища та ґрунтується на усвідомленні невідповідності існуючої моделі виробництва нестабільним зовнішнім умовам бізнесу. Завдання реінжинірингу полягає не в створенні моделі виробництва, що відповідає вимогам конкретного ринку, а в створенні архітектури виробничої системи підприємства, здатної взаємодіяти з динамічно змінюваними властивостями ринку[3].

Реінжиніринг бізнес-процесів на промисловому підприємстві має певні відмінності у етапах здійснення, що викликано особливостями функціонування виробничої сфери.

Відповідно до міжнародного досвіду, реструктуризація виробничого процесу складається з наступних етапів:

- розробка проекту реорганізації системи виробничих та невиробничих бізнес-процесів;
- документація кадрових бізнес-процесів та моделювання архітектури виробничих процесів;
- проведення порівняльного аналізу структури виробничих та невиробничих процесів підприємства з процесною бізнес-структурою аналогічних підприємств-конкурентів;
- впровадження нових бізнес-процесів та технологій;
- оцінка результативності реінжинірингу бізнес-процесів промислового підприємства.

Слід зауважити, що реінжиніринг для українських промислових підприємств є можливістю суттєво покращити їх позиції на ринкову та подолати кризові явища. З урахуванням специфіки української економіки стратегічним завданням підприємств є провадження комплексної програми реінжинірингу, що включає якісне вдосконалення основних бізнес-процесів з одночасним застосуванням новітніх інформаційних технологій та підтримки з боку держави.

### **Висновки**

Таким чином, реінжиніринг бізнес-процесів на промислових підприємствах є постійною перебудовою функціональності виробничої системи, яка має здійснюватися одночасно з реструктуризацією невиробничої структури підприємства. Реінжиніринг є результативним якщо нова структура бізнес-процесів підприємства відрізняється від попередніх та дає змогу підприємству вийти на рівень аналогічних підприємств, які успішно функціонують на ринку.

### **Список літератури**

1. Хаммер М. Реинжиниринг корпорации: манифест революции в бизнесе / Хаммер М., Чампи Дж.; пер. с англ. – С. Пб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 1997. – 332 с.
2. Ойхман Е. Г., Попов Э. М. Реинжиниринг бизнеса: реинжиниринг организаций и информационные технологии. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 333 с.
3. Гончарова О. М. Реінжиніринг бізнес-процесів як спосіб підвищення ефективності управління // Ефективна економіка. – 2012. – № 2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.economy.nauka.com.ua/?op=1&z=943>

# ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЯК КЛЮЧОВИЙ ЧИННИК ПЕРЕХОДУ НА КОНЦЕПЦІЮ ОЩАДЛИВОГО ВИРОБНИЦТВА В УМОВАХ ПАТ «ПОЛТАВАОБЛЕНЕРГО»

*Миرونенко М.А., Алексеєнко І.А., Воронко Т.М.*

*Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

## **Анотація**

Дослідження ключового чинника економічної безпеки держави – енергоефективності існуючих у ній економічно активних бізнес-одиниць є актуальною задачею менеджменту, так як вона є інтегральним показником стану економіки в цілому. У роботі зроблено акцент на виробничих концепціях, зокрема концепції ощадливого виробництва (англ. Lean Production), як на ефективному організаційному інструменті перебудови бізнес-процесів в галузі енергетики. На підтвердження цієї тези у статті наведено успішні приклади з практики ПАТ «Полтаваобленерго».

Ключові слова: енергоефективність, концепція, ощадливе виробництво, менеджмент.

## **Вступ**

Східна мудрість говорить: «Шлях у тисячу лі починається з першого кроку». Тож головним чинником є вибір правильного напрямку руху та кінцевої мети такої мандрівки. На сучасному етапі розвитку суспільно-економічних відносин в Україні саме чітке визначення стратегічних цілей є тим ключовим фактором, який у майбутньому визначатиме нашу спроможність виходу із того глухого кута, у якому нині перебуває національна економіка. Енергоефективність цілком відповідає такій глобальній меті. А забезпечити таку амбітну цільову функцію можливо за допомогою такого інструменту ефективного менеджменту, як перехід на концепцію ощадливого виробництва продукції чи надання послуг споживачам.

Накопичений у світі досвід підтверджує правильність такої думки, адже всі успішні нині державні економічні моделі розбудови суспільних відносин тією чи іншою мірою використовують принципи управління, характерні для концепції ощадливого виробництва. Наочним прикладом цього в Україні може бути енергетична галузь економіки.

Таким чином, розробка загального методологічного підходу до вирішення поставленого завдання є актуальною для розвитку науки в галузях як ефективного менеджменту так і енергетики в цілому.

## **Постановка задачі**

Енергоефективність є доволі загальним поняттям, своєрідним інтегрованим показником економічної доцільності існування тієї чи іншої моделі розвитку суспільних відносин та конкурентоздатності

країни в цілому. Тому досить важко до кінця усвідомити це поняття. Тож у статті запропоновано поглянути на енергоефективність через призму конкретних кроків, спрямованих на подолання тих негативних складових, які не забезпечують конкурентних переваг. З цією метою розглянемо особливості існуючих на даний час виробничих концепцій.

Питання розвитку виробничих концепцій та їхнього впливу на розвиток суспільно-економічних відносин перебували в полі зору таких вчених як Джеймс Вумек, Джеффри Лайкер, Таїті Оно та ін. [1 – 4].

Як наголошується у роботі [5] всередині будь-якого виробничого процесу існують лише втрати. Їхня оптимізація – головне завдання управління. Прибуток – це лише похідна від якісно виконаної управлінської роботи. Те саме можна сказати і з приводу енергоефективності як про процес налагоджений із мінімальними втратами.

У подальшому розглянемо основні структурні елементи подібного алгоритму запобігання можливим втратам.

### **Основна частина досліджень**

Нові ідеї не виникають на порожньому місці. Частіше за все вони з'являються, коли старі ідеї вже не можуть принести жодної користі [1].

На сьогоднішній день у світовій практиці промислового виробництва продукції існують чотири принципово різних концептуальних підходи до виробничого процесу, як об'єкта управління.

Концепція ощадливого виробництва (англ. Lean Production) – одна з чотирьох створених людством концепцій управління виробництвом. У ній вдало поєднано позитивні риси кустарного і масового виробництва продукції. Робота ж за системою "Саме-Вчасно" (англ. Just-in-Time) перетворює ощадливе виробництво на передвісника адитивної виробничої концепції. Це, в свою чергу, дозволяє у стислі терміни змінити парадигму економічного розвитку суспільних відносин у державі.

Концепція ощадливого виробництва полягає у дотриманні декількох чинників:

- виявленні та усуненні трьох видів втрат, дій чи затрат, які не додають цінності при виготовленні продукції чи наданні послуг (яп. muda, muri, mura);
- створенні потоку одиничних виробів;
- вбудовуванні якості у виробничий процес (яп. jidoka);
- активній пропаганді філософії безперервного вдосконалення виробничого процесу та міжособистісних відносин (яп. kaizen);

- створенні передумов для переходу суспільства від рівня високотехнологічного розвитку (англ. technology) до економіки знань (англ. knowledge) [6, 7].

Розглянемо, як відбувається процес переходу на концепцію ощадливого виробництва в умовах ПАТ «Полтаваобленерго». Це підприємство здійснює виробництво, передачу та постачання електричної та теплової енергії в Полтавському регіоні. Компанія обслуговує 43628 км електромереж, 10137 підстанцій. ПАТ «Полтаваобленерго» забезпечує енергопостачання 746 тис. споживачів [8]. Нині підприємство – це мережа з 28 філій у кожному адміністративному районі області з центральним офісом у Полтаві.

Єдиним енергогенеруючим підприємством у складі ПАТ «Полтаваобленерго» є Кременчуцька ТЕЦ. Побудована у період 1965 – 1972 рр. вона забезпечує 1/4 частину потреб області в електроенергії, а також забезпечує тепловою енергією споживачів майже всієї лівобережної частини м. Кременчука та здійснює виробництво теплової енергії в вигляді пари 10 – 16 ата, 43 ата для технологічних потреб Кременчуцького нафтопереробного заводу [9].

На ТЕЦ стрімко розвивається програма переозброєння і модернізації обладнання, впровадження новітніх технологій та автоматизації виробництва, спрямована на збільшення надійності роботи основного та допоміжного устаткування [9].

Від початку 2017 року на Кременчуцькій ТЕЦ відбувається поступовий перехід на концепцію ощадливого виробництва при організації будь-яких бізнес-процесів під девізом «Малі кроки до великих поліпшень». Така стратегія дрібних кроків дозволяє чітко виміряти ефективність від запровадження тих чи інших організаційних кроків з одночасним оперативним корегуванням з метою усунення виявлених недоліків.

При переході на концепцію ощадливого виробництва в умовах Кременчуцької ТЕЦ використовується проектний підхід в управлінні, який має назву «Система безперервного вдосконалення Лідер», метою якого є підвищення ефективності діяльності компанії шляхом впровадження операційних поліпшень.

Керівництво компанії чітко усвідомлює, що запорука успіху цього проекту перебуває у площині трансформації менталітету працівників та керівників підприємства, які мають навчитися виявляти втрати, розуміти, які дії або процеси є втратами, і безперервно працювати над їх усуненням.

Пілотним майданчиком в умовах Кременчуцької ТЕЦ було обрано цех спеціалізованого ремонту (ЦСР), у якому проводяться роботи з організації робочого простору по системі 5S. Ця система передбачає послідовне виконання алгоритму з п'яти кроків [6].

В рамках першого кроку насамперед було проведено сортування: на робочих місцях розділили інструменти і матеріали за частотою їхнього використання у виробничому процесі.

Наступним кроком стало наведення порядку, тобто визначення максимально раціонального розміщення необхідних предметів в робочій зоні.

Завершує формування нового, ефективного вигляду робочого простору третій етап системи 5S – перманентна підтримка робочої зони в чистоті (рис. 1).



Рис. 1. Дільниця забезпечення ремонтів ЦСР

Для того, аби успіх від перших трьох кроків набув незворотного характеру, варто стандартизувати кращі практики. Тому нині на підприємстві триває кампанія з написання організаційних стандартів, які у лаконічній і максимально візуалізованій формі мають закріпити наведений у робочій зоні цеху порядок.

Як нами вже зазначалося вище – головною передумовою успіху в запровадженні концепції ощадливого виробництва є злам свідомості працівників підприємства. Тож останній крок системи 5S спрямовано саме на це, адже не можливо чітко виміряти ефект від вдосконалення, хоча мова може йти про підвищення продуктивності праці до 30 % [6].

Крім того, поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці сприяє зменшенню захворюваності та зводить нанівець травматизм, що є одним з головних завдань ефективного менеджменту в цілому.

### **Висновки**

Підвищення рівня енергоефективності перш за все перебуває у площині зміни парадигми мислення споживача. Перш за все варто зрозуміти, що всередині будь-якої виробничої діяльності є втрати. Їх не виявлення та усунення – головне завдання ефективного менеджменту. Прибуток – це лише похідна від вдалих кроків із запобігання втратам. Тому методика незначних, але чітко зрозумілих кроків для підвищення ефективності бізнес-процесів є вкрай затребуваною.

Перехід активних бізнес-одиниць на рейки концепції ощадливого виробництва продукції має на меті досягнення саме таких результатів.

В умовах ПАТ «Полтаваобленерго», зокрема на Кременчуцькій ТЕЦ від початку 2017 року розпочато проект «Система безперервного вдосконалення Лідер», метою якого є підвищення ефективності діяльності компанії шляхом впровадження низки операційних поліпшень.

### Список літератури

1. Вумек Дж., Джонс Д., Рус Д. Машина, которая изменила мир / Джеймс Вумек, Дэниел Джонс, Дэниел Рус; [пер. с англ. С. Э. Борич]. – Минск : Попурри, 2007. – 384 с.

2. Лайкер Дж. Дао Toyota : 14 принципов менеджмента ведущей компании мира / Джеффри Лайкер; [пер. с англ. Т. Гутман]. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2008. – 402 с.

3. Оно Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства / Тайити Оно; [пер. с англ. А. Грязновой, А. Тягловой] / 4-е изд. – М. : Институт комплексных стратегических исследований, 2012. – 208 с.

4. Гринин А. Ю. Управление заводом в стиле кайдзен: Как снизить затраты и повысить прибыль / Алексей Юрьевич Гринин. – М. : Альпина Паблишер, 2012. – 189 с.

5. Радкявичус Д., Станюлис Т. Бог, квантовая физика, организационная структура и стиль управления / Дарюс Радкявичус, Томас Станюлис; [пер. с англ. Анны Стативки]. – К. : Companion Group, 2010. – 236 с.

6. Мироненко М. А. Менеджмент ощадливого виробництва : навч. посіб. / Микола Андрійович Мироненко. – 3-тє вид., виправлене. – Дніпропетровськ : Пороги, 2015. – 512 с.

7. Мироненко Н. Управление предприятием на основе концепции бережливого производства / Николай Мироненко. – Дніпропетровськ: Журфонд, 2016. – 146 с.

8. Електронний ресурс. – Режим доступу: [uk.wikipedia.org/wiki/Полтаваобленерго](http://uk.wikipedia.org/wiki/Полтаваобленерго)

9. Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.poe.pl.ua/index.php?r=units/branch&id=tec>

# ВИКОРИСТАННЯ ДОТАЦІЙНОГО ЕФЕКТУ ПРИ ОЦІНЮВАННІ ВИТРАТ РЕСУРСІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ

*Хлестова О.А.*

*Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна*

## **Анотація**

Традиційно транспортно-технологічна схема (ТТС) обслуговує основне виробництво. Для оцінки ролі транспортно-технологічної схеми в підвищенні ефективності основного виробництва необхідно: вибрати та обґрунтувати методи економічної оцінки зміни рівня конкурентної спроможності транспортно-технологічної схеми при модернізації або вдосконаленні основного виробництва; провести оцінку того, як впливають ті чи інші рішення в сфері транспорту на економіку виробництва в цілому. В роботі розглянуто принципи формування та методичні підходи до оцінки економічної ефективності ТТС.

Ключові слова: дотаційний ефект; транспортно-технологічна схема; доменне виробництво; природно-енергетичні ресурсів.

## **Вступ**

Вдосконалення технології доменного виробництва потребує збільшення витрат транспортно-технологічної схеми, що знижує ефективність самого промислового транспорту заради досягнення більш високої загальної ефективності основного виробництва. У такому разі певну частину загальної ефективності основного виробництва слід віднести на промисловий транспорт цього виробництва. Цьому сприяє відповідний облік і оцінка витрати природно-енергетичних ресурсів на транспорті.

## **Постановка задачі**

Для підвищення ефективності роботи доменної печі потрібні певні режими подання сировинних матеріалів. Так, при зміні послідовності циклу подання шихтових матеріалів під час переходу на так звану "частково осьову систему подання шихти", в якій кокс обов'язково подається в останньому завантаженні, фактична витрата коксу знижується з 723 до 626 (тобто на 97) кг/тонну чавуну (що складає 12 %), а добове виробництво чавуну збільшується з 1699 до 2054 (тобто на 355) тонн чавуну (або на 20 %), що становить середньогодинний додатковий приріст випуску чавуну близько 15 кг. Загальна економічна ефективність основного виробництва за рік складає при цьому 48,8 тис. ум. од. ціни [1]. Позатранспортний ефект від переходу з традиційного способу подання шихти на вдосконалену має враховувати витрати на капітальне будівництво(за потреби), вартість змінених вантажувально-розвантажувальних робіт, витрати на експлуатацію, амортизацію вантажувально-розвантажувальних механізмів у розрахунку на 1 т шихти по всьому циклу транспортування [2].

## Основна частина досліджень

Перехід на новий режим роботи транспортно-технологічної схеми доменного виробництва вимагає відповідного ритмічного і стабільного подання сировини до доменної печі. Забезпечення промисловим транспортом певної ритмічності і безперервності основного виробництва при збільшенні об'ємів його роботи досягається за рахунок суміщення певних його операцій, що призводить до збільшення витрат природно-енергетичних ресурсів на самому транспорті.

Зокрема, описане в цьому випадку, суміщення операцій на промисловому транспорті призводить до збільшення витрат природно-енергетичних ресурсів протягом 15 годин на 36,7 ум. од. ціни (на 16,2 %), що складає 2,4 ум. од. ціни/годину. На рис. 1 показано формування витрат природно-енергетичних ресурсів протягом певних етапів транспортного циклу до та після реалізації інновацій на основному виробництві.

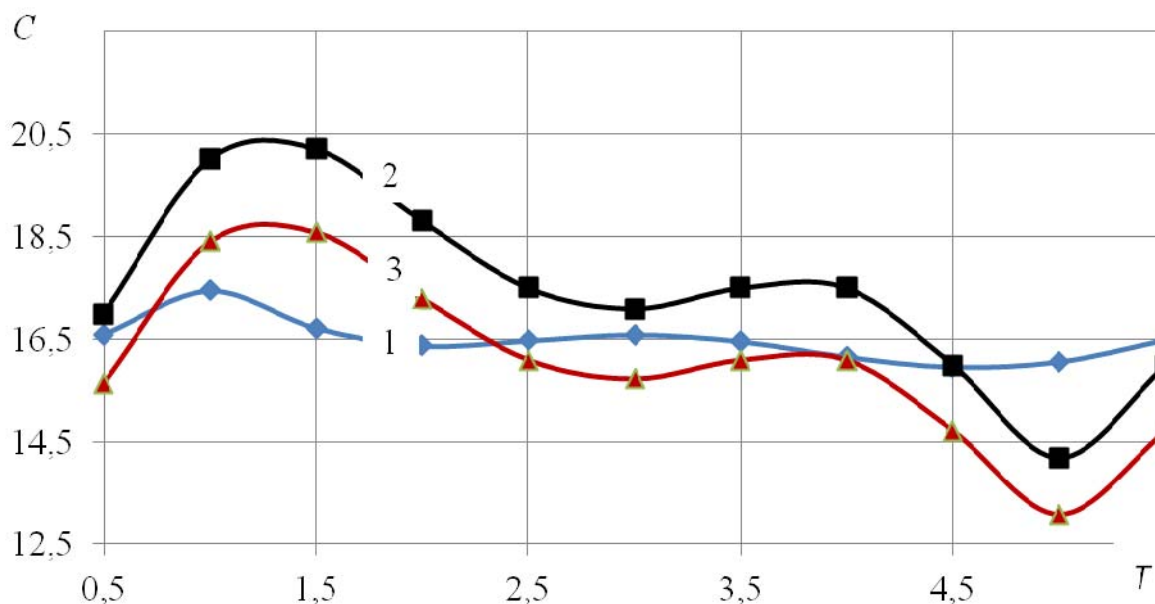


Рис. 1. Дотаційний ефект на етапах промислового транспорту при підвищенні ефективності основного виробництва:  
1 – витрати ресурсів на етапах транспорту до реалізації інновацій на основному виробництві; 2 – витрати ресурсів після реалізації інновацій; 3 – витрати на промтранспорті з урахуванням дотаційного ефекту

Отриманий в результаті удосконалення технології завантаження доменної печі приріст випуску чавуну 15 кг/годину (при вартості чавуну 4 ум. од. ціни/кг) не вимагає зміни витрати шихтових матеріалів, але супроводжується додатковими витратами природно-енергетичних ресурсів в транспортно-технологічній схемі.

Якщо прийняти долю транспортної складової в собівартості чавуну 6 %, економічний ефект, який можна назвати дотаційним, відне-

сений на промисловий транспорт доменного виробництва, може скласти 1,2 ум. од. ціни/кг чавуну [3].

Підвищення загальної ефективності доменного виробництва супроводжується збільшенням витрат природно-енергетичних і сировинних ресурсів на промисловому транспорті, то запропонована методика визначення дотаційного ефекту дозволяє оцінити долю ефективності, що доводиться на промисловий транспорт.

### **Висновки**

Проблеми формування та регулювання собівартості процесів транспортування в ТТС потребують наукового обґрунтування та вдосконалення, мають базуватися на розвитку та взаємодії ТТС з основним виробництвом з урахуванням продуктивності, технічної оснащеності, пропускної здібності, собівартості та якості транспортування при обслуговуванні та забезпеченні ритмічної та безперебійної роботи об'єктів основної виробничої технології.

### **Список літератури**

1. Тарасов В. П. Теория и технология доменной плавки / В. П. Тарасов, П. В. Тарасов. – М. : Интернет Инжиниринг, 2007. – 384 с.
2. Федотова Ю. И. Принципы оценки эффективности логистических транспортно-технологических систем / Ю. И. Федотова. – Транспортное дело России. – М. : Морские вести России, 2012. – № 4. – С. 63–65.
3. Дмитриев В. А. Экономика промышленного железнодорожного транспорта / Дмитриев В. А. – М. : Транспорт, 1981. – 293 с.

***Раздел 9.***  
***Энергоэффективные материалы и  
технологии их получения***

***Редактор раздела*** – профессор, д.т.н.,  
заведующая кафедрой материаловедения  
им. Ю.Н. Тарана-Жовнира  
Национальной металлургической академии Украины  
***Куцова В.З.***

***Рецензент*** – Prof. Dr.-Ing.,  
Head of Institute of Iron and Steel Technology  
***Olena Volkova***

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Волчок И.П.<sup>1</sup>, Митяев А.А.<sup>1</sup>, Фролов Р.А.<sup>1</sup>, Сахно А.С.<sup>2</sup>*

*1 – Запорожский национальный технический университет,  
г. Запорожье, Украина*

*2 –АО “Мотор Сич”, г. Запорожье, Украина*

## Аннотация

В настоящее время поиск эффективных технологий переработки отходов алюминиевых сплавов остается актуальной задачей. Применение двойной обработки расплава модификатором и мелкокристаллической шихтой позволило повысить механические и литейные свойства вторичного сплава АК7ч до уровня первичного. Приведенные результаты экспериментальных исследований показывают возможность получения качественных отливок из отходов производства.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, модификатор, интерметаллидные фазы, электролиз, глинозем.

## Введение

В настоящее время находят применение два промышленных способа получения алюминия и его сплавов: 1) путем электролиза глинозема  $Al_2O_3$  в расплавленном криолите  $Na_3AlF_6$  при температуре 930...950 °С; 2) путем использования в качестве шихты лома и отходов производства (литники, брак, стружка алюминия и его сплавов). К достоинствам первого метода относится высокая чистота алюминия по вредным примесям, к недостаткам – высокочрезвычайно высокие технологии получения глинозема, криолита, угольных материалов и проведения электролиза. Для получения 1 т алюминия расходуется около 2 т глинозема, 25 кг криолита, 500...600 кг анодной (угольной) массы. Расход электроэнергии только на электролиз 1 т алюминия составляет 14000...16000 кВт·ч. В себестоимости электролизного получения алюминия затраты на исходные материалы составляют около 50 %, на электроэнергию 30 % [1]. Нельзя не обратить внимание также на серьезные экологические проблемы, имеющие место при производстве алюминия методом электролиза. Достаточно вспомнить о имевшем место разрушении плотины, резервуара с токсичными отходами, и загрязнении больших территорий щелочными продуктами в Венгрии 4 октября 2010 г.

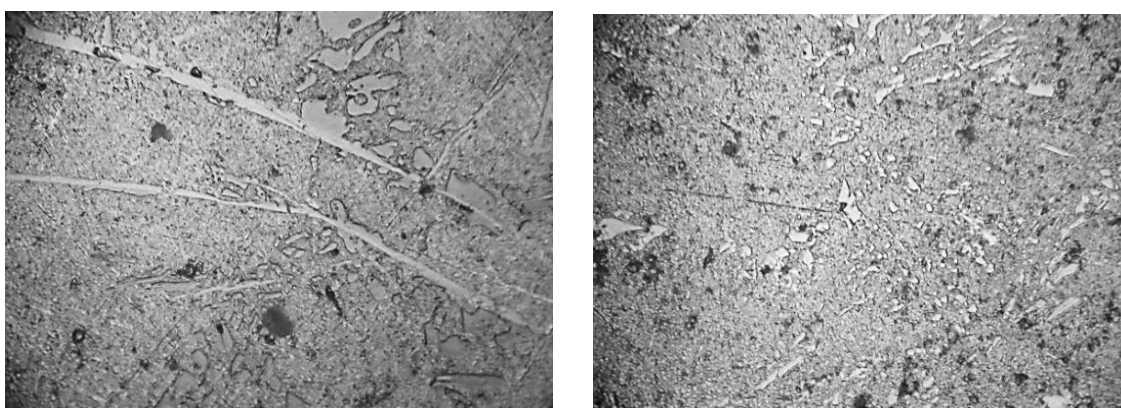
Достоинством второго метода является низкая стоимость исходной шихты, сокращение удельных энергозатрат и опасных выбросов в атмосферу до 20 раз, недостатком – ее загрязнение неметаллическими материалами, маслами, и прочими примесями, вызывающими повышенную пористость металла, а также формирование грубой структуры с крупными интерметаллидными включениями пластинчатой формы и, как следствие, низкие технологические и механические свойства [2].

## Постановка задачи

Целью данной работы является разработка энергоэффективной технологии переработки вторичных алюминиевых сплавов с сохранением механических и литейных свойств на уровне первичных.

## Решение поставленной задачи

С целью снижения в алюминиевых сплавах содержания водорода, придания интерметаллидам компактной формы и получения благоприятной структуры и, собственно, повышения технологических свойств был разработан комплексный модификатор МК [3], в состав которого вошли SiC, Ti, S, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, BaCO<sub>3</sub>, KBF<sub>4</sub>. На рис. 1 представлена структура силумина АК7ч до модифицирования и после модифицирования МК.



а)

б)

Рис. 1. Структура силумина АК7ч x500: а) до модифицирования; б) после модифицирования 0,1 %масс. МК

Известно, что сера S оказывает положительное влияние на расплавы алюминиевых сплавов [4], обеспечивает изменение формы железосодержащих фаз с пластинчатой на компактную, близкую к равноосной, а также в виде китайских иероглифов. При этом уменьшаются размеры интерметаллидов и повышается равномерность их распределения в объеме металла. Выделение большого количества газообразных продуктов эффективно рафинирует сплав от неметаллических включений и растворенных газов.

Для снижения скорости окисления и возгонки серы в состав модификатора включены Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и BaCO<sub>3</sub>. Диссоциация в расплаве этих соединений с выделением углекислого газа CO<sub>2</sub> также способствует повышению уровня рафинирования. Включение в состав модифицирующего комплекса гексафтортитаната калия K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> повышает эффективность модифицирования дендритов α-твердого раствора кремния в алюминии, уменьшая размер их ячеек и общую протяженность. Наличие атомарного титана способствует образованию дополнительных центров кристаллизации в виде тугоплавких мелкодисперсных

интерметаллидов  $TiAl_3$ . Присутствие ультрадисперсного карбида кремния  $SiC$  обеспечивает увеличение количества центров кристаллизации. Это способствует созданию большого количества равноосных ячеек  $\alpha$ -твердого раствора на основе алюминия. Наличие в составе  $KBF_4$  совместно с карбонатом натрия  $Na_2CO_3$  обеспечивает образование на поверхности расплава защитной пленки, способствует адсорбции шлаковых включений и одновременному удалению из сплава водорода.

Эффективность данного модифицирующего комплекса подтверждается результатами, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Механические и литейные свойства сплава АК7ч

МК, %масс.	Механические свойства						Литейные свойства											
	$\sigma_b$ , МПа			$\delta$ , %			НВ, МПа			Жидкотекучесть, мм			Линейная усадка, %			Пористость, балл		
	I	II	II+МКШ.	I	II	II+МКШ.	I	II	II+МКШ.	I	II	II+МКШ.	I	II	II+МКШ.	I	II	II+МКШ.
0	278	229	288	1,8	0,8	4,8	902	962	845	441	394	420	1,6	1,2	1,3	3	4	3
0,1	306	265	307	2,6	2,6	5,9	871	847	890	504	452	480	1,8	1,3	1,5	2	3	2
0,15	252	235	297	1,3	2,0	5,1	886	892	895	529	474	500	1,9	1,4	1,6	1	1	1

Примечание. I – первичный АК7ч; II – вторичный АК7ч; II+МКШ. – вторичный сплав АК7ч содержащий 40...45 % мелкокристаллической шихты(МКШ).

Применение модификатора позволило повысить предел прочности  $\sigma_b$  на 10...15 %, пластичность  $\delta$  на 1...2 %, при обеспечении твердости НВ > 800 МПа, что удовлетворяет требования ГОСТ 1583-93 для первичных, чистых сплавов. Для получения более высоких механических и литейных свойств была опробована экспериментальная технология переработки вторичных сплавов с использованием возрастающей добавки мелкокристаллической шихты и установлено что оптимальное количество в составе каждой плавки составляет 40...45 %. Результаты испытаний показали, что при таком методе переработки механические свойства ( $\sigma_b$  и НВ) вторичного сплава АК7ч не уступа-

ют первичному, а по относительному удлинению  $\delta$  даже превосходят в 2...3 раза.

Согласно результатам полученным Лютовой О.В. [5] применение модифицирующей обработки позволяет повысить жидкотекучесть на 10...15 %, линейную усадку на 20...30 % и снизить пористость в среднем до 1 балла.

### **Выводы**

Проведенные исследования показывают, что применение новых энергоэффективных технологий позволяют получать алюминиевые сплавы из отходов производства с уровнем механических и литейных свойств первичных, что позволяет сократить производственные затраты, поскольку переработка вторичного алюминия требует всего 5 % от объема энергии, необходимого для его производства из глинозема [6]. Также улучшаются санитарно-гигиенические условия труда в литейном цеху и снижаются выбросы в атмосферу парниковых газов.

### **Список литературы**

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д. Ф. Чернега, В. С. Богусевський, Ю. Я. Готвянський та ін: За ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
2. Мітяєв О.А. Науково-технологічні основи формування структури, фізико-механічних і службових властивостей вторинних силумінів: автореф. дис. на здобуття ступеня доктора техн. наук: спец. 05.02.01 / О. А. Мітяєв. – Запоріжжя. – 2008. – 34 с.
3. Волчок І. П. Підвищення якості вторинних силумінів шляхом використання рафінувально-модифікувальної, термічної та лазерної обробок / І. П. Волчок, О. Л. Скуйбіда, О. В. Лютова, Н. В. Широкобокова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 5 (53). – Дн-ськ: ДНУЗТ, 2014. – С. 101–108.
4. Немененок Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. – Мн. : Технопринт, 1999. – 1072 с.
5. Лютова О. В. Повышение литейных свойств вторичных алюминиевых сплавов / О. В. Лютова // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – № 3. – С. 53–59.
6. Алюминий и окружающая среда / Русал // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rusal.ru/aluminium/al\\_and\\_nature/](http://www.rusal.ru/aluminium/al_and_nature/).

# ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ И ТЕПЛОСБЕРЕЖЕНИЕ В МЕТАЛЛУРГИИ И МАШИНОСТРОЕНИИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ ОГНЕУПОРОВ

*Мазур В.Л., Мазур В.В.*

*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,  
г. Киев, Украина*

Эффект от использования прогрессивных теплоизоляционных материалов в промышленных объектах металлургических предприятий превосходит возможности снижения энергозатрат за счет выбора рациональных режимов технологических процессов, например режимов обжаты на листовых и сортовых станах [1 – 3]. К сожалению, в прокатных цехах металлургических заводов Украины этому вопросу уделяется недостаточно внимания. В частности, вопросам снижения энергозатрат на нагрев и термообработку металла перед и после прокатки. Сказанное в такой же мере относится и к другим металлургическим переделам (доменному, сталеплавильному и др.).

На большинстве металлургических и машиностроительных заводов при производстве проката, в различных нагревательных устройствах, термических, нагревательных печах и колодцах, котлах, дымоходах и другом оборудовании в качестве рабочего незащищенного слоя футеровки и промежуточного (защищенного) слоя футеровки, где решается задача изоляции воздействия высоких температур, традиционно применяют кирпичную огнеупорную кладку. Недостатки применения кирпичной кладки для решения проблемы теплоизоляции, теплосбережения хорошо известны (увеличение габаритов и стоимости агрегатов, высокая теплоемкость кладки из огнеупорного кирпича при сравнительно неэффективной теплоизоляции, тепловая и температурная инерционность кладки, расход энергии на ее нагрев до температур эксплуатации и т.д.).

В современных производствах кирпичная огнеупорная кладка применяется лишь в условиях, где имеется непосредственный контакт футеровки с жидким металлом или кладка может подвергаться ударным нагрузкам. В нагревательных устройствах прокатных цехов кирпичная кладка все больше и больше вытесняется пористыми или волокнистыми огнеупорными материалами нового поколения.

Достоинствами современных волокнистых материалов, к которым в первую очередь относятся материалы и изделия огнеупорные теплоизоляционные муллитокремнеземистые (алюмосиликатные) стекловолокнистые, являются: сравнительно небольшая плотность (рулонного материала не более  $150 \text{ кг/м}^3$ , муллитокремнеземистых

изделий сложной конфигурации с кажущейся плотностью не более  $500 \text{ кг/м}^3$ ), низкая теплопроводность (в 5 – 6 раз ниже, чем огнеупорного кирпича), практически неограниченная термостойкость, в том числе способность выдерживать циклические изменения температуры при периодических нагревах и охлаждениях футеровки, отсутствие опасности разрушения футеровки), малая теплоемкость, что позволяет при необходимости быстро осуществлять разогрев и охлаждение нагревательных устройств, агрегатов, например термических печей. К преимуществам огнеупорных материалов и изделий на основе муллитокремнеземистого волокна относится также разнообразие их видов (вата, рулонный материал, войлок, плиты, фетр, картон), что предопределяет удобство их применения в промышленности. Кроме того, варьируя химическим составом (содержанием алюминия, хрома, циркония) можно изменять максимально возможную температуру эксплуатации муллитокремнеземистых материалов и изделий из них.

В соответствии с действующими стандартами, теплоизоляционные огнеупорные муллитокремнеземистые стекловолоконистые материалы и изделия из них можно применять при температурах до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$  в качестве теплоизоляционного компенсационного материала для теплоизоляции термических, нагревательных, вертикально-секционных, цилиндрических и других типов печей, нагревательных колодцев и других тепловых агрегатов прокатных цехов.

В первую очередь волокнистая футеровка рекомендована для термических печей листопрокатных и сортопрокатных цехов. В методических нагревательных печах рекомендовано выполнять из керамоволокнистых блоков (плит, изделий сложной формы) «торцы» верхних зон, а из волокнистого рулонного материала и матов (войлока, фетра) изоляцию глассажных и опорных труб, уплотнения стен, сводов и горелочных узлов. В обжимных цехах наибольший эффект обеспечивает замена кирпичной футеровки крышек нагревательных колодцев волокнистыми огнеупорными материалами.

Наиболее широко волокнистые огнеупорные муллитокремнеземистые материалы используют для футеровки стен и сводов колпаковых печей в листопрокатном производстве. В результате снижается тепловой поток через стены и свод печи, уменьшается теплоемкость футеровки. Это обеспечивает уменьшение расхода топлива, увеличение производительности печи за счет сокращения цикла разогрева и охлаждения агрегата. По данным Украинского научно-исследовательского института огнеупоров им. А. С. Бережного замена огнеупорной кирпичной кладки на волокнистую футеровку для одной термической печи с выкатным подом площадью  $27 \text{ м}^2$  позволяет снизить расход топлива в 20 раз. Поэтому в термических печах различного типа (камерных со стационарным и выдвижным подом, вертикальных, конвейерных, с шагающими балками или подом и др.) свод и

стены рекомендуется полностью выполнять из волокнистых огнеупорных материалов. В общем случае в металлургии и машиностроении 1 т огнеупорных волокнистых материалов заменяет от 10 до 23 т традиционных огнеупоров (огнеупорного кирпича).

Особо эффективно применение волокнистых огнеупорных материалов в электропечах периодического действия. При использовании волокнистых огнеупорных материалов на 1/3 уменьшаются потери тепла и, соответственно, затраты электроэнергии. В агрегатах такого типа волокнистые огнеупоры используются для выполнения всех элементов футеровки за исключением загрузочного окна и пода печей. Волокнистые теплоизоляционные материалы, учитывая их высокое тепловое сопротивление, дают возможность выполнить энергосберегающую реконструкцию действующих печей и строительство более экономичных тепловых агрегатов. Ограждающие конструкции, выполненные из муллитокремнеземистых материалов, имеют ряд преимуществ перед огнеупорной кирпичной кладкой: во-первых, малую массу волокнистой футеровки печных агрегатов из-за небольшой кажущейся плотности высокопористой теплоизоляции, и, во-вторых, незначительную аккумуляцию тепла. В периодически работающих печах тепловые потери, обусловленные аккумуляцией тепла кладкой из волокнистых материалов, меньше на 20 – 40 %, чем при кирпичной футеровке. В печах, работающих в непрерывном режиме, экономия тепловой энергии в результате уменьшения теплового потока через стенки печи может достигать 8 – 10 %. В непрерывно работающих нагревательных толкательных или с шагающими балками печах прокатных цехов потери тепла через кладку могут быть меньшими, в пределах 2 – 5 %. Однако абсолютные величины экономии энергии при высокой производительности печей для нагрева заготовок оказываются достаточно внушительными.

Необходимо особо подчеркнуть, что использование рассмотренных огнеупорных материалов упрощает и облегчает металлоконструкции (массу металлокаркасов на 15 – 20 %) для вновь проектируемых печей, ускоряет процесс нагрева металла и упрощает его регулирование. Расход огнеупоров уменьшается до 10 – 12 раз, а трудовые затраты на монтаж кладки в 2 – 3 раза. Применение волокнистых муллитокремнеземистых материалов и изделий в ряде случаев ограничивается использованием их в изоляционных слоях футеровок печей только в комбинации с кирпичной и бетонной кладками. Изделия из волокнистых материалов, которые допускают более высокие максимальные температуры применения (до 1600 °С), позволяют достигать большего эффекта за счет возможности использования их в рабочем слое теплового ограждения печей.

Современный комплекс по производству огнеупорных теплоизоляционных муллитокремнеземистых материалов и изделий на их ос-

нове експлуатуються на ООО «Синтиз» (г. Синельниково, Днепропетровської області) [1 – 3]. Показательно, що безпосередньо в ООО «Синтиз» блоками розмірами 300 x 300 x 70 мм з мулітокремнеземистого волокна футерували частину робочого простору проходної тунельної печі довжиною 120 м, призначеної для обжигу виробів при температурі 1000 °С. В результаті витрати газу на обігрів печі скоротилися на 45 %. Названа тунельна печка подібна, наприклад, печам для нормалізації гарячекатаних товстих листів, експлуатуваних в багатьох прокатних цехах металургічних і машинобудівних заводів.

#### Список літератури

1. Мазур В. Л. Проблеми теплозбереження і теплоізоляції в металургії і шляхи їх рішення / В. Л. Мазур, А. І. Рябов, В. В. Мазур // Металургічна і гірнорудна промисловість. – 2007. – № 1. – С. 68–71.
2. Мазур В. Л. «М'яккі» огнеупори – ефективний шлях тепло- і енергозбереження в металургії / В. Л. Мазур, А. І. Рябов, В. В. Мазур // Металургічна і гірнорудна промисловість. – 2008. – № 2. – С. 82–86.
3. Мазур В. Л. Деякі шляхи рішення проблеми теплозбереження в прокатному виробництві // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: Системні технології. – 2005. – 576 с.

# ПОЛУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ТЕРМОГРАФЕНИТА ИЗ ДИСПЕРСНЫХ ЖЕЛЕЗОГРАФИТОВЫХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Маслов В.А., Трофимова Л.А., Дан Л.А.*

*ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»,  
г. Мариуполь, Украина*

## **Аннотация**

В настоящей работе были исследованы технологические параметры получения соединения интеркалированного графита из дисперсных железобитовых отходов металлургического производства, а из него с помощью термошокового нагрева – термографенита с магнитными свойствами.

Ключевые слова: железобитовые отходы, графит, интеркалирование, термошоковый нагрев, термографенит.

## **Введение**

Дисперсные железобитовые отходы (ЖГО) металлургического производства образуются на всех стадиях охлаждения жидкого чугуна (разливка, транспортировка, переливы, десульфурация). При этом растворимость углерода снижается и образуются дисперсные ЖГО [1], состоящие, в основном, из чешуйчатых частиц графита (10 – 60 %), сферических частиц оксидов железа и шлаковых частиц.

Характерной особенностью структуры графита является наличие протяженных гексагональных плоских графеновых сеток атомов углерода в двухмерном пространстве и слабого притяжения типа вандерваальсовского между слоями [2]. Благодаря слоистой структуре графит способен образовывать соединения интеркалирования (СИГ) с кислотами, галогенами, галогенидами металлов, оксидами, которые располагаются между сетками гексагонально связанных атомов углерода в графите [3].

## **Постановка задачи**

Целью настоящей работы было получение нового материала путем интеркалирования графита, содержащегося в ЖГО, с последующим термошоковым нагревом, который можно было бы использовать для изделий, обеспечивающих защиту биологических и технических объектов от электромагнитных и тепловых излучений.

## **Основная часть исследований**

В предварительном исследовании в качестве исходного материала вначале был использован графит марки ГАК-2 с зольностью до 1 %, полученный из металлургического скрапа и дисперсных ЖГО в промышленных условиях.

Исходный образец графита 100 г смешивали с измельченным бихроматом калия в течение 5 мин. Данную смесь заливали концентрированной 98 %-ной серной кислотой при интенсивном перемешивании и выдерживали в течение 10 мин. Затем в емкость для окисления заливали дистиллированную воду в количестве 3 – 6 л. Декантация осуществлялась от 1 до 8 раз до получения  $pH = 7$  в отходящей воде. Отделение окисленного графита осуществляли от основной массы воды на нутч-филт্রে до  $pH = 7$ .

По приведенной методике было проведено шесть экспериментов при варьировании соотношений бихромат калия – графит в пределах 0,1 – 0,2.

Конечной целью эксперимента было получение термографенита. Поэтому высушенные образцы окисленного графита подвергались вспучиванию при термошоковом нагреве в гравитационно-падающем слое при температуре 1000 °С.

Полученные результаты показали очень сильное термическое расширение и, соответственно, весьма низкие значения объемной плотности образовывавшегося термографенита: удалость достичь насыпной массы 2,7 кг/м<sup>3</sup> при степени расширения равной 104.

Анализ результатов, полученных в ходе предварительных исследований, позволил предположить, что возможно напрямую использовать дисперсные ЖГО в качестве исходного сырья для интеркалирования графита и получения термографенита. В этом случае исходное сырье будет значительно дешевле, чем чистый графит. Кроме того, наличие в ЖГО магнитных составляющих [4] именно магнитный термографенит способен обеспечивать защиту от электромагнитных излучений.

При проведении опытов были использованы миксерные ЖГО МК «Азовсталь». Вначале отходы обрабатывали при интенсивном перемешивании в окислительной смеси из концентрированной серной кислоты ( $\rho = 1,84$  кг/дм<sup>3</sup>) и 5 % бихромата калия при соотношении масс материала и окислителя 1 : 5. Время окисления было выбрано в пределах 1 – 20 мин. После окисления твердый остаток отделялся на нутч-филт্রে и промывался водой до  $pH = 7$ . Окисленный графит отделялся от воды и сушился при температуре 120 – 130 °С, а затем в падающем слое при температуре 1000 °С подвергался термошоковому нагреву. На полученном термографените определялись объемная плотность, удельная намагниченность насыщения и удельное электрическое сопротивление. Были получены следующие результаты: объемная плотность 6 – 10 кг/м<sup>3</sup>, удельная намагниченность насыщения 12 – 24 А·м<sup>2</sup>/кг, удельное электрическое сопротивление  $(1,9 – 9,0) \cdot 10^{-4}$  Ом·м.

Полученные данные показали, что время окисления существенно влияет на свойства термографенита. При слишком малом времени не

удается получить низкую объемную плотность термографенита, хотя она весьма сильно изменяется при переходе от 1 мин к 3 мин окислительной обработки, а именно от (120 – 180) до (15 – 21) кг/м<sup>3</sup>. При слишком большом времени (10 мин) значительно снижается содержание оксидов железа, а, следовательно, снижается и величина удельной намагниченности насыщения.

Проведенные исследования позволили сделать заключение о возможности получения магнитного термографенита из ЖГО и предложить технологическую схему процесса.

### **Выводы**

1. Путем окисления графита раствором бихромата калия в серной кислоте и последующего вспучивания при 1000 °С получен термически расширенный графит с объемной плотностью 2,7 – 9,5 кг/м<sup>3</sup>.

2. Разработана технология получения нового продукта – СИГ с магнитными свойствами. Установлены технологические особенности, при которых в процессе окислительного интеркалирования значительная часть оксидов железа ЖГО остаются в материале, придавая СИГ магнитные свойства. Последующее термическое расширение СИГ при 1000 °С позволяет получить термографенит с объемной плотностью 6 – 10 кг/м<sup>3</sup>, удельной намагниченностью насыщения 12 – 24 А·м<sup>2</sup>/кг и удельным электрическим сопротивлением  $(1,9 – 9,0) \cdot 10^{-4}$  Ом·м.

### **Список литературы**

1. Маслов В. О. Композиційні матеріали на основі залізграфітних відходів металургійного виробництва / В. О. Маслов // Хімічна промисловість України. – 1994. – №4. – С. 54–60.
2. Уббеладе А. Р. Графит и его кристаллические соединения / А. Р. Уббеладе, Ф. А. Льюис. – М. : Мир, 1965. – 256 с.
3. Физико-химические свойства графита и его соединений / Черныш И. Г. и др. – К. : Наукова думка, 1990. – 200 с.
4. Маслов В. А. Магнитные свойства ЖГО металлургического производства в зависимости от различных параметров / В. А. Маслов, Л. А. Трофимова // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. – Маріуполь : ПДТУ, 2000. – Вип. 9. – С. 37–39.

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ НАГРІВУ СВЧ НА СТРУКТУРУ ТА ТВЕРДІСТЬ СОРТОВОГО ПРОКАТУ З ДАКТИЛЬОВАНОГО ЧАВУНУ

*Миронова Т.М.<sup>1</sup>, Семенова І.О.<sup>1</sup>, Давидюк А.В.<sup>2</sup>*

*1 – Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

*2 – Дніпропетровський коледж ракетно-космічного машинобудівництва  
ДНУ ім. О. Гончара, м. Дніпро, Україна*

## **Анотація**

Досліджено вплив температури гартування струмом високої частоти на структуру та твердість дактильованого чавуну, що піддається обробці тиском. Визначено оптимальний режим нагріву для отримання загартованого шару, що має структуру дрібногольчастого мартенситу з твердістю 65HRC глибиною 5 мм, що забезпечують підвищення експлуатаційної стійкості виробів із чавунного сортового прокату. Отримані в роботі результати використані при визначенні схеми виготовлення валків для холодної прокатки.

Ключові слова: білий чавун, обробка тиском, термічна обробка СВЧ, твердість, експлуатаційна стійкість.

## **Вступ**

Білі чавуни є одними з найпоширеніших матеріалів, що використовують в металургії та машинобудівництві для деталей з підвищеною зносостійкістю. Виготовлення чавунних виробів відбувається, в основному, ливарним виробництвом і термічною обробкою, що значно спрощує і здешевлює отримання деталей складної форми. Структура білих чавунів в загальному випадку являє собою металеву основу і евтектичні карбіди, що забезпечують високу твердість і зносостійкість. Але застосування їх обмежується низькою міцністю і нездатністю протистояти ударним навантаженням [1, 2]. Деформування покращує властивості чавуну завдяки подрібненню евтектичної складової. Застосування обробки тиском в промислових умовах стало можливим завдяки ефекту дактилювання, тобто пластифікації цементиту завдяки карбідним перетворенням, що відбуваються під час деформування.

Після деформаційної обробки структуру металевої основи, що оточує карбідні частки, можна регулювати термічною обробкою в широких межах, регулюючи твердість, міцність, ударну в'язкість.

В одних випадках термічна обробка може бути проміжною операцією, що служить для поліпшення оброблюваності сплавів тиском, різанням, тобто технологічних властивостей, в інших – є остаточною операцією, що забезпечує комплекс механічних, фізичних і експлуатаційних властивостей виробів або напівфабрикатів. Напівфабрикати піддають термічній обробці для поліпшення структури, зниження твердості (поліпшення оброблюваності), а деталі - для додання їм певних, необхідних властивостей (твердості, зносостійкості, міцності). Непра-

вильно призначений чи невдало проведений режим термічної обробки може звести до мінімуму переваги білих зносостійких чавунів перед іншими матеріалами у стійкості при експлуатації.

### **Постановка задачі**

Можливість значного підвищення механічних властивостей після деформаційно-термічної обробки у порівнянні з вихідним станом дозволяє використовувати сортопрокат білих дактильованих чавунів для виготовлення таких виробів, як прокатні валки, направляючі ролики, пальці траків тракторів. Підвищення експлуатаційної стійкості цих деталей забезпечується високою твердістю поверхні та здатністю серцевини витримувати напруження на вигин. Для цього необхідне застосування термічної обробки з нагріву поверхні струмом високої частоти (СВЧ). Отримання оптимальних властивостей чавунних деталей, загартованих при нагріванні струмами високої частоти істотно залежить від їх вихідної структури. При швидкому нагріванні взаємозв'язок вихідного структурного стану чавуну і термодинамічних параметрів зародження аустеніту набуває великого значення. При використанні попереднього відпалу можна отримати структурні стани, характеризуються суттєво різним розташуванням цементитних частинок в феритній матриці, і, таким чином, можна полегшити або ускладнити зародження аустеніту при швидкому нагріванні. В попередніх роботах [3, 4] були визначені оптимальні температури нагріву під об'ємне гартування чавунних зразків, але використання швидкісного нагріву СВЧ вимагає додаткового дослідження для корегування режимів термічної обробки. В зв'язку з цим задачею даної роботи є дослідження впливу режимів нагріву СВЧ на структуру та твердість загартованого шару сортового прокату з дактильованого чавуну.

### **Основна частина досліджень**

Дослідження проводили на циліндричних зразках Ø35 мм, вирізаних з блюмса 160 × 160 чавуну та сортового прокату Ø44 мм, що містить 2,65...2,78 % С та 2...2,5 % легуючих елементів Cr і V сумарно. Гартування СВЧ здійснювали на горизонтально-гартівному стані 165 с використанням індуктора Ø52 мм, підключеного до генератора струму високої частоти (2400 Гц). Температуру нагрівання контролювали фотоелектричним пірометром швидкої дії «ФП-3», що має високу чутливість (2 – 3 °С). Вибір температурного режиму нагріву під загартування здійснювали на підставі мікроструктурного аналізу загартованих зразків і контролю їх твердості. Застосування водяного душа забезпечує охолодження чавуну зі швидкістю вище критичної.

Як показали дослідження, оптимальною для проведення СВЧ – нагрівання є перлітна структура. Так як після сфероїдизаційного відпалу, який застосовували для пом'якшення чавуну перед механічною об-

робкою в структурі присутній досить грубий зернистий цементит, то для підготовки матриці до СВЧ- гартування таку структуру необхідно змінити. З цією метою була проведена аустенізація металу при температурі 850 °С, витримка протягом 1 години, а потім охолодження на повітрі. Після даної обробки матриця набуває перлітну структуру з межпластинчатою відстанню порядку 2-х мкм.

Для швидкості нагріву (в області фазових перетворень) 50 °С/с зростання зерна аустеніту спостерігається тільки у випадку значного перевищення температури нагріву над температурою, прийнятої при звичайному гартуванні. Для чавуну з великим числом карбідних часток, які гальмують зростання аустенітних зерен, потрібне велике перевищення температури (до 200 °С) над звичайною для досягнення таких же розмірів зерен. Певний затримуючий вплив на зростання зерна аустеніту у чавуні надають і дисперсні (1 – 2 мкм) важкорозчинні карбіди ванадію. Розмір зерна аустеніту, характерний для звичайного повільного нагрівання до 860 °С ( $\leq 15$  мкм), досягається при індукційному нагріванні зі швидкістю 50 °С/с лише при 1000 °С. При швидкому нагріванні до 850 °С твердість після охолодження має недостатній рівень, нижче, ніж у випадку повільного нагрівання.

Це пояснюється тим, що швидке нагрівання не забезпечує перетворення всього перліту в аустеніт через нестачу часу. Але і при більш високих температурах (870 – 890 °С) в структурі після гартування залишається перліт. З цієї причини нагрівання до 890 °С також недостатньо для перетворення вихідних фаз в аустеніт.

Лише при гартуванні з температур 900 – 930 °С твердість загартованого шару (рис. 1а) перевищує твердість, яка досягається при звичайному загартуванні[4]. Нагрівання до температури 910 °С повністю забезпечує перетворення вихідних фаз в аустеніт. У загартованому шарі спостерігається однорідна мартенситна структура. Для прийнятої швидкості нагріву температура 910 °С є оптимальною, забезпечуючи отримання дрібнозернистого і дрібноблочного аустеніту, що дозволяє отримати дрібногольчастий мартенсит навколо карбідних включень(рис. 1б).

Нагрівання вище 910 °С приводить до зростання аустенітного зерна і підвищення вмісту вуглецю в аустеніті за рахунок часткового розчинення вторинних карбідів. У структурі загартованого шару виявляється залишковий аустеніт.

Таким чином, високочастотний нагрів до 900 – 920 °С при загальному часі аустенітизації 10 с (включаючи паузу між нагріванням і охолодженням) і спреєрне гартування водою забезпечує загартований шар з твердістю 65HRC і глибиною 5 мм, при цьому зберігається структура серцевини, що забезпечує конструктивну міцність деталей та спроможність витримувати напруження на вигин при експлуатації [5].

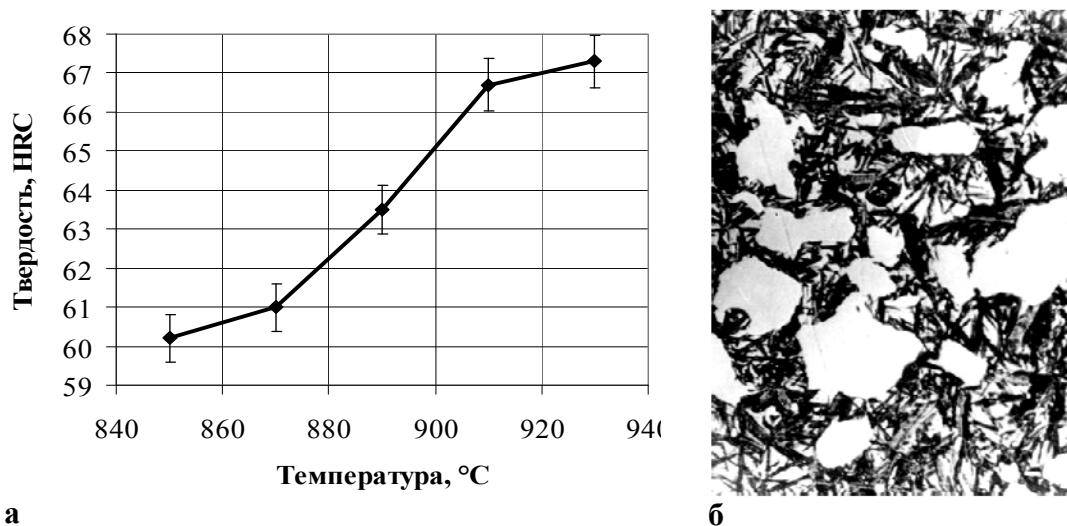


Рис. 1. Вплив температури нагріву СВЧ на твердість (а) і структуру чавуну (б×1000) після гартування

Розроблені режими термічної обробки дозволили використовувати білі дактільовані чавуни для деформуючого інструмента, а саме із сортового прокату було виготовлено опорні валки для стану "ДВ-160" для прокатки тонких стрічок, що працюють у дуже важких умовах з великими статичними і динамічними навантаженнями (рис. 2). На рис. 3 показана зміна твердості від поверхні до вісі валка. Глибина загартованого шару 4 ... 5 мм, при цьому твердість серцевини досягає 39 HRC, а твердість поверхні 65... 68 HRC.

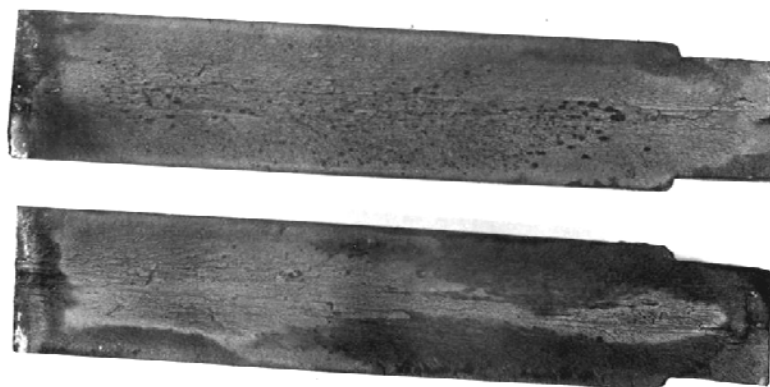
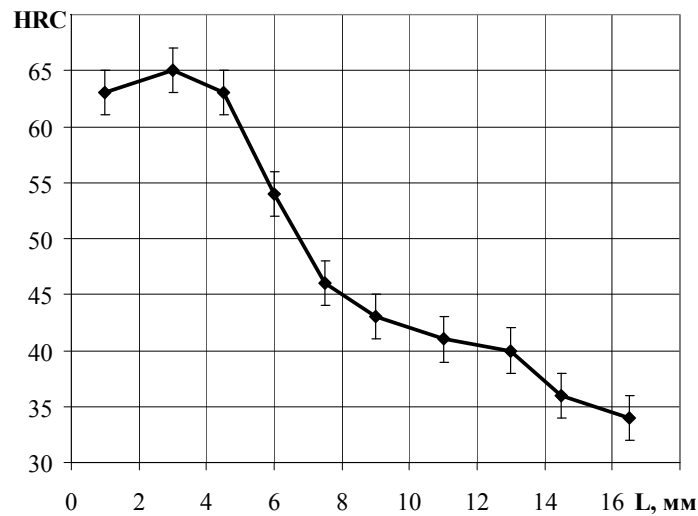


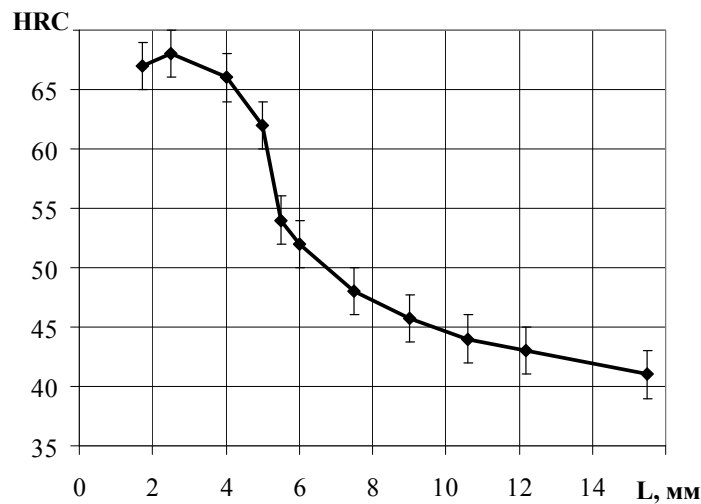
Рис. 2. Макроструктура валків із дактільованого чавуну для стану "ДВ-160"

Виготовлені валки випробували в якості перших опорних верхніх та нижніх валків 20-ти валкового стану. Прокатували стрічку з нержавіючої сталі марки 12X18Н9. Ширина стрічки 200 мм, маршрут прокатки 0,71 – 0,5 – 0,41 мм. Усі валки показали стійкість до переточки в 3...4 рази вище, ніж стійкість валків традиційно застосовуваної сталі 9ХШ, 9Х або 9ХС. Стрічка зі сталі 12X18Н9, яка була прокатана

на чавунних валках, мала більш якісну поверхню. Після переточування стійкість валків залишалася на колишньому рівні.



а



б

а – середина валка; б – хвостова частина валка

Рис. 3. Зміна твердості від поверхні до вісі валка після термічної СВЧ

Завдяки оптимальним режимам термічної обробки експлуатаційна стійкість валків виросла в 1,7 – 4 рази, в порівнянні з традиційно застосовуваними сталями 9ХШ, 9Х або 9ХС.

### Висновки

1. Досліджено вплив температури гартування струмом високої частоти на структуру та твердість дактильованого чавуну. Визначено, що високочастотний нагрів до 900 – 920 °С при загальному часі аустенізації 10 с (включаючи паузу між нагріванням і охолодженням) і

спреєрне гартування водою забезпечує отримання загартованого шару з твердістю 65HRC глибиною 5 мм.

2. Отримані в роботі результати використані при визначенні схеми виготовлення виробів з білого чавуну, завдяки чому була підвищена експлуатаційна стійкість валків для холодної прокатки в 1,7 – 4 рази в порівнянні з валками із сталей 9ХШ, 9Х або 9ХС, що застосовуються традиційно.

### Список літератури

1. Миронова Т. М. Управление формированием структуры в белых ледебуритных чугунах на различных этапах деформационного передела / Т. М. Миронова, М. М. Рябчий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – №4. – С. 79–81.

2. Миронова Т. М. О мехагизмах влияния фазових переходов на поведение евтектических карбидов при деформировании / Т. М. Миронова, Т. Р. Донская, А. Ю. Сидорова. – *Вісник ДНУ-2012*, т. 20, № 2-серія Фізика. Радіоелектроніка, в. 19, С. 97–104.

3. Куцова В. З., Управление структурой и свойствами дактилированных белых чугунов с помощью термической обработки после обработки давлением / Куцова В. З., Миронова Т. М., Рудень Д. О // *Металлознавство та термічна обробка матеріалів : Наук. та інформ. журнал / ПДАБА. – ДН-вск. – 2011. – № 1–2 (52–53). – С. 120–132.*

4. Миронова Т. М. Формирование структуры матрицы в процессе нагрева под прокатку и предварительной обработки деформируемых белых чугунов / Т. М. Миронова // *Новини науки Придніпров'я*. – 2012. – № 2. – С. 57–61.

5. Миронова Т., Петруша А. Исследование возможности применения белых чугунов для пальцев траков тракторов / *New Technologies And Achievements In Metallurgy And Materials Engineering / A collective monograph*. – 2016, Nr 68, Czestochowa Series. – P. 60–65.

# ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ КОТЕЛЬНЫХ ТРУБ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Опрышко Л.В., Головняк Т.В.*

*ГП «НИТИ» им. Я.Е. Осады, г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

Исследовано влияние технологических факторов производства (схема и степень деформации, термическая обработка) на характеристики жаропрочности (длительные прочность и пластичность) металла котельных горячекатаных труб, изготовленных из недеформированных непрерывнолитых заготовок стали 20 на трубопрокатных агрегатах с непрерывным и пилигримовым станами. Установлено, что использование недеформированной непрерывнолитой заготовки позволяет получать на указанных агрегатах котельные трубы из стали 20 высокой эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: котельные трубы, непрерывнолитая заготовка, горячая прокатка, термическая обработка, структура, длительная прочность и длительная пластичность (эксплуатационные свойства).

## **Введение**

Трубы из котельной стали 20 по ТУ 14-3-460 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов» широко применяются в теплоэнергетике – до 80 – 90 % труб в котлоагрегате ТЭС изготовлены из углеродистой стали.

Жесткие условия эксплуатации (температура до 450 °С, давление до 23,5 Мпа) обуславливают высокие требования к качеству металла этих труб, в первую очередь, к их жаропрочности. Критерий жаропрочности - предел длительной прочности при температуре 450 °С за 100 тыс. часов - для котельных труб из стали 20 нормирован [1]. Для получения котельных труб высокой эксплуатационной надежности основные операции технологического цикла их производства (выплавка и разливка стали, горячая деформация и термическая обработка) должны сформировать структуру, обеспечивающую не только высокий уровень, но и стабильность служебных свойств в течение расчетного срока их эксплуатации (не менее 100 тыс. часов).

В условиях возрастающей потребности теплоэнергетики в котельных трубах, необходимых для замены в действующем энергооборудовании, и строительства новых энергетических блоков, при дефиците котельной трубной заготовки и энергоресурсов весьма актуальной является задача разработки новой ресурсосберегающей технологии изготовления котельных труб высокой эксплуатационной надежности.

## **Постановка задачи**

Котельные горячекатаные трубы из стали 20 в зависимости от сортамента изготавливают на трубопрокатных агрегатах (ТПА) с различными станами (непрерывным, пилигримовым, автоматическим, трехвалковым раскатным), которые имеют разные схемы деформации, оказывающие влияние на формирование структуры и свойств труб [2].

Для получения котельных труб, отвечающих всем требованиям нормативной документации (НД), применяют высококачественную трубную заготовку. До 90-х годов прошлого столетия в производстве их использовали только деформированную (катаную или кованую) заготовку с нормированным коэффициентом вытяжки (уковом) из слитка стационарной или непрерывной разливки.

Ввод новых современных металлургических мощностей и совершенствование процесса непрерывной разливки позволили ГП «НИТИ» разработать принципиально новую ресурсосберегающую технологию изготовления котельных труб - непосредственно из слитка непрерывной разливки, исключая из технологического цикла производства деформацию слитка в заготовку.

В действующей нормативной документации (НД) отражены различия, обусловленные технологической схемой производства котельных труб из стали 20: трубы из катаной или кованой заготовки разрешено нормализовать как с деформационного, так и с отдельного нагрева, а трубы из НЛЗ – только с отдельного нагрева [1]. Это требование для труб из слитка непрерывной разливки стали 20 было продиктовано необходимостью получения гарантированного комплекса качественных показателей (в том числе служебных свойств) котельных труб широкого сортамента в полном соответствии с требованиями ТУ 14-3-460 и Правилами устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды, а также паровых и водогрейных котлов.

Для подтверждения возможности применения экономичной технологической схемы изготовления котельных труб из НЛЗ способом горячей прокатки на трубопрокатных станах с непрерывным и пилигримовым станами без проведения энергозатратной операции – нормализации с отдельного нагрева потребовалось проведение исследований эксплуатационной надежности труб широкого сортамента в двух состояниях – после горячей прокатки (нормализация с прокатного нагрева) и после нормализации с отдельного нагрева.

## **Основная часть исследований**

Испытания на длительную прочность выполняли по ГОСТ 10145 при температуре 450 °С и напряжениях в диапазоне 220 – 140 Н/мм<sup>2</sup>. Путем линейной экстраполяции зависимости времени до разрушения

от напряжения в логарифмических координатах определяли предел длительной прочности за 100 тыс. часов.

Длительная прочность и длительная пластичность исследованных труб из НЛЗ стали 20, характеризуемые соответственно временем до разрушения и относительным удлинением разрушившихся образцов, находятся в полосе разброса этих характеристик для углеродистых котельных труб, изготовленных на тех же агрегатах по традиционной технологии - из катаных или кованых заготовок (рис. 1)

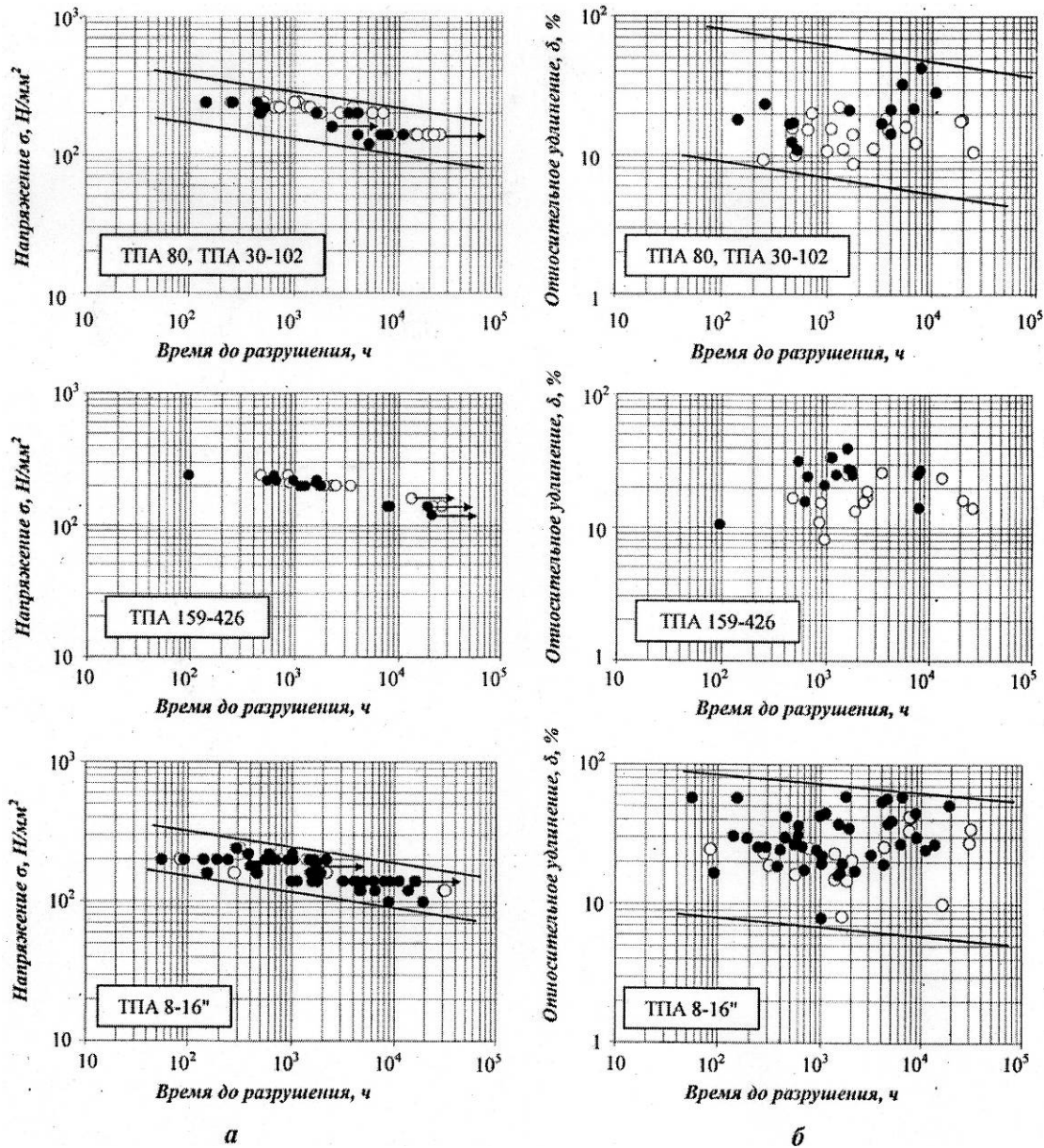


Рис. 1. Длительная прочность (а) и длительная пластичность (б) изготовленных из НЛЗ на различных агрегатах труб после горячей прокатки (○) и нормализации (●)

Металл котельных труб, прокатанных из НЛЗ на ТПА 159-426, по уровню характеристик жаропрочности не уступает горячекатаным трубам, изготовленным на других агрегатах.

Значения предела длительной прочности за 100 тыс. часов при температуре 450 °С исследованных труб находятся в диапазонах от 78 до 108 Н/мм<sup>2</sup> (после горячей прокатки, т.е. после нормализации с прокатного нагрева) и от 66 до 103 Н/мм<sup>2</sup> (после нормализации с отдельного нагрева) при среднемарочном значении этой характеристики по ТУ 14-3-460 – 78 Н/мм<sup>2</sup> ± 20 % [1].

Более высоким уровнем длительной прочности в состоянии после горячей прокатки отличаются трубы, изготовленные на агрегатах с непрерывным станом (93 – 108 Н/мм<sup>2</sup>). Причем влияния на жаропрочность коэффициентов вытяжки, с которыми были изготовлены исследованные трубы на агрегатах с непрерывным станом (на ТПА 80 и ТПА 30-102 с  $\mu = 8,1 - 17,5$ , на ТПА 159-426 с  $\mu = 4,0 - 10,1$ ), не выявлено. Влияние вытяжки проявилось в трубах, прокатанных на агрегате с пилигримовым станом: при уменьшении коэффициента вытяжки от 11,0 до 3,3 значение предела длительной прочности снизилось на 30 %.

Значения относительного удлинения (длительной пластичности) разрушенных при различных испытательных напряжениях образцов исследованных труб после горячей прокатки находятся в пределах: от 9,3 до 21,2 % (ТПА 80, ТПА 30-102), от 8,1 до 26,1 % (ТПА 159-426) и от 8,1 до 42,1 % (ТПА 8-16"). Эта характеристика не нормирована НД, но оказывает существенное влияние на эксплуатационную надежность труб – с уменьшением длительной пластичности повышается вероятность внезапного хрупкого разрушения [3].

Невысокий уровень показателя длительной пластичности (менее 10,0 %) при испытании нескольких образцов труб, изготовленных с коэффициентом вытяжки менее 8,0, связан с их структурным состоянием. В макроструктуре труб, изготовленных с малыми коэффициентами вытяжки из НЛЗ с развитой зоной транскристаллизации, выявлены зоны с остатками литой структуры в виде измельченных разориентированных дендритов (наследование структуры исходной заготовки). Микроструктура металла этих труб характеризуется наличием локальных крупнозернистых видманштеттообразных участков, ориентированных по первичной дендритной структуре. Наиболее выражена такая структура грубого конгломерата фаз в металле труб, изготовленных на ТПА с пилигримовым станом (ТПА 8-16") [4, 5].

Перекристаллизация при нормализации горячекатаных труб с отдельного нагрева за счет измельчения зерна и увеличения однородности структуры обусловила снижение на 5 – 30 Н/мм<sup>2</sup> уровня длительной прочности и повышение в 1,2 – 2,3 раза показателя длительной пластичности.

В большей степени благоприятное влияние термической обработки сказалось на трубах, изготовленных с малыми коэффициентами вытяжки (менее 8,0), прокатанных, в первую очередь, на ТПА с пилигримовым станом. Металл труб после нормализации с отдельного нагрева характеризуется оптимальным сочетанием длительной прочности и пластичности, что повышает их эксплуатационную надежность, уменьшая вероятность внезапного хрупкого разрушения.

### **Выводы**

1. Использование недеформированной непрерывнолитой заготовки стали 20 на агрегатах с непрерывным и пилигримовым станом (ТПА 80, ТПА 30-102, ТПА 159-426 и ТПА 8-16") позволяет получать котельные горячекатаные трубы широкого сортамента в полном соответствии с требованиями нормативной документации, с гарантированным уровнем эксплуатационных свойств.

2. Трубы, прокатанные на ТПА 80 и ТПА 30-102 (с коэффициентом вытяжки 8,0 и более), могут поставляться потребителю в состоянии после горячей прокатки (после нормализации с деформационного нагрева).

3. Трубы, изготовленные из НЛЗ на ТПА 159-426 и ТПА 8-16", необходимо подвергать нормализации с отдельного нагрева для повышения их длительной пластичности и надежности в эксплуатации.

### **Список литературы**

1. ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. Технические условия. – 50 с.
2. Зимовец В. Г. Совершенствование производства стальных труб / В. Г. Зимовец, В. Ю. Кузнецов. – М. : МИСИС, 1996. – 480 с.
3. Антикайн П. А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов / П. А. Антикайн. - М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
4. Опрышко Л. В. Опыт производства котельных горячекатаных труб из непрерывнолитой заготовки / Л. В. Опрышко, И. И. Полтава // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. - № 4. – С. 53–57.
5. Опрышко Л. В. Особенности структуры и свойств котельных горячекатаных труб из недеформированной непрерывнолитой заготовки углеродистой стали / Л. В. Опрышко, Т. В. Перепелица, П. В. Герасименко // Металлознавство та обробка металів. – 2012. - № 4. – С. 3–9.

# ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ТРУБЫ ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ В ПРОДУКТАХ СЖИГАНИЯ СЕРНИСТОГО ТОПЛИВА

*Сенина Т.В.<sup>1</sup>, Паршаков В.И.<sup>2</sup>, Якушев А.Б.<sup>2</sup>*

*1 – ГП «НИТИ», г. Днепр, Украина*

*2 – ДТЭК, Украина*

## **Аннотация**

Исследовано поведение в эксплуатации пароперегревательных труб из новой марки малоникелевой хромомарганцевой стали повышенной коррозионной стойкости в продуктах сгорания сернистого топлива. Показана техническая возможность и экономическая целесообразность использования их вместо труб из стали 12Х18Н12Т.

Ключевые слова: малоникелевая аустенитная сталь, сульфидная коррозия, пароперегревательные трубы, наработка

## **Введение**

Пароперегреватель в котлоагрегате энергетического блока – это комплект ширмовых и конвективных трубчатых змеевиков низкого и высокого давления. В зависимости от мощности котлоагрегата общая длина труб в пароперегревателе достигает 250 км. Сортамент труб – диаметр от 32 до 57 мм, толщина стенки от 3,5 до 7 мм.

Пароперегреватель является наиболее теплонапряженной частью энергетического котлоагрегата – температура наружной поверхности трубы до 650 °С, давление до 25 МПа, рабочие среды: водяной пар – внутри, продукты сгорания топлива – снаружи. Проектный ресурс работы труб 100 тыс. часов. Надежно работать в таких условиях может только аустенитная сталь, сейчас в Украине и во всем постсоветском пространстве – хромоникелевая марки 12Х18Н12Т, которая хорошо служит при сжигании газа или антрацитового штыба. При работе на мазуте или низкосортном сернистом угле сталь 12Х18Н12Т подвержена высокотемпературной сульфидной коррозии, обусловленной взаимодействием серы из топлива с никелем из наружной поверхности трубы. Образующаяся при этом легкоплавкая (температура плавления 600 – 610 °С) эвтектика < сульфид никеля  $Ni_3S_2 + Ni$  >, проникает по границам зерен вглубь стенки трубы и вызывает разрушение ее (рис. 1). Чем больше никеля в стали, тем интенсивнее сульфидная коррозия т.е. в условиях сжигания низкосортного топлива длительную безаварийную работу могут обеспечить трубы из аустенитной стали с малым содержанием никеля [1].

Для замены нестойкой против сульфидной коррозии стали 12Х18Н12Т в ГП «НИТИ» разработана аустенитная жаропрочная

хромомарганцевая сталь, экономно легированная никелем, марки ЭП838У, а также технология производства труб из нее [2].

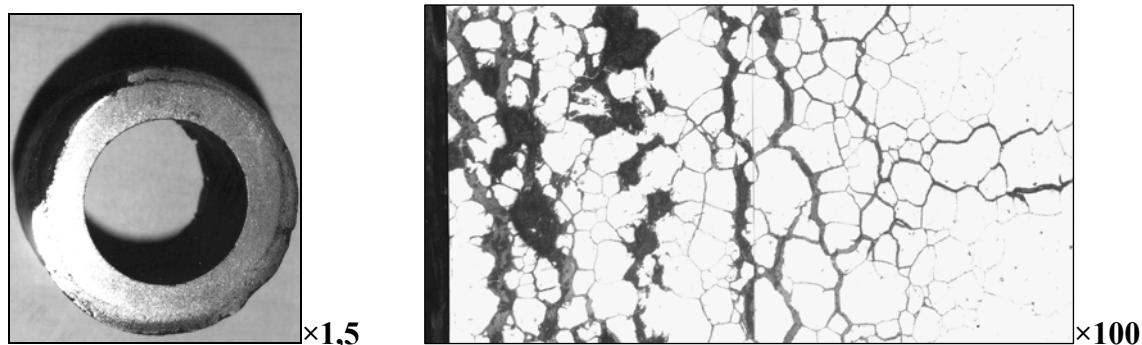


Рис. 1. Внешний вид и микроструктура трубы из стали 12X18H12T после работы в течение 77 тыс.ч

Благодаря втрое меньшему содержанию никеля, а также комплексному легированию хромомарганцевого аустенита кремнием и алюминием стойкость труб из стали ЭП838У против сульфидной коррозии, как минимум, в три раза больше, чем стали 12X18H12Т. Сталь ЭП838У технологична в металлургическом и трубном переделах. Расходные коэффициенты металла при изготовлении трубной заготовки (завод «Днепроспецсталь»), переделных горячекатаных и готовых холоднокатаных труб (Южнотрубный завод) для сравниваемых сталей были одинаковыми [3, 4]. При этом экономия импортруемых легирующих на тонну труб составила 60 кг хрома, 80 кг никеля.

### Постановка задачи

Изготовленные в промышленных условиях трубы размером  $32 \times 6$  мм из стали ЭП838У были установлены в действующие котлоагрегаты Запорожской и Криворожской ТЭС для эксплуатационного опробования в самых жестких по условиям работы участках конвективного пароперегревателя высокого давления: температура перегретого пара –  $520 - 545$  °С, температура наружной поверхности трубы –  $560 - 600$  °С,  $P = 26$  МПа. На Криворожской ТЭС трубы наработали без замечаний 23 тыс. ч и были сняты при проведении реконструкции котлоагрегата.

На Запорожской ТЭС прямая труба из стали ЭП838У эксплуатируется в первой по ходу газов нитке пакета в котле № 1 уже более 100 тыс. ч. В котле № 3 изогнутые на  $90^\circ$  элементы змеевиков из новых труб отработали без замечаний до реконструкции агрегата 52164 ч, после реконструкции вварены прямые вставки, общая наработка – 69137 ч.

Результаты исследования состояния в процессе эксплуатации позволяют оценить целесообразность замены труб из хромоникелевой стали 12Х18Н12Т на трубы из перспективной малоникелевой хромомарганцевой стали ЭП838У.

### Основная часть исследования

Исследование качества труб из стали ЭП838У в состоянии поставки показало, что по всем нормируемым техническими условиями показателям они не уступают трубам из стали 12Х18Н12Т, а по несклонности к МКК и пластичности – кратковременной и длительной – превосходят последние (табл. 1 и рис 2, 3).

Таблица 1

Механические и эксплуатационные свойства пароперегревательных труб из хромоникелевой и хромомарганцевой стали

	12Х18Н12Т	ЭП 838У
Временное сопротивление, $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	539 – 686	560 – 620
Предел текучести, $\sigma_t$ , Н/мм <sup>2</sup>	216 – 392	245 – 304
Относительное удлинение, $\delta$ , %	$\geq 35$	53 – 64
Предел длительной прочности, $y_{dn}^{10^5}$ , Н/мм <sup>2</sup> :		
при 550 °С	147 – 118	172
при 600 °С	108 – 86	123
при 630 °С	82 – 65	80
при 650 °С	69 – 54	65
Длительная пластичность, $d_{дп}$ , % за 10 <sup>5</sup> ч при 650 °С	3 – 5	13 – 31
Склонность к межкристаллитной коррозии	+	–

Для стали 12Х18Н12Т приведены нормы по ТУ 14-3-460-75, для стали ЭП838У - фактические значения, полученные при испытании труб.

Первое комплексное исследование состояния трубы из стали ЭП838У осуществили после наработки 38336 ч. Из змеевика был вырезан сварной композитный стык ЭП838У + 12Х18Н12Т с прилегающими к нему патрубками сваренных сталей. Осмотр показал, что снаружи на лобовой поверхности труба из стали ЭП838У равномерно покрыта сплошной бурой окалиной толщиной 0,14 мм, темной окалиной толщиной около 0,03 мм покрыта его внутренняя поверхность. Размеры трубы не изменились: наружный диаметр соответствует номинальному, утонения стенки нет, ее фактическая толщина 5,95 – 6,0 мм.

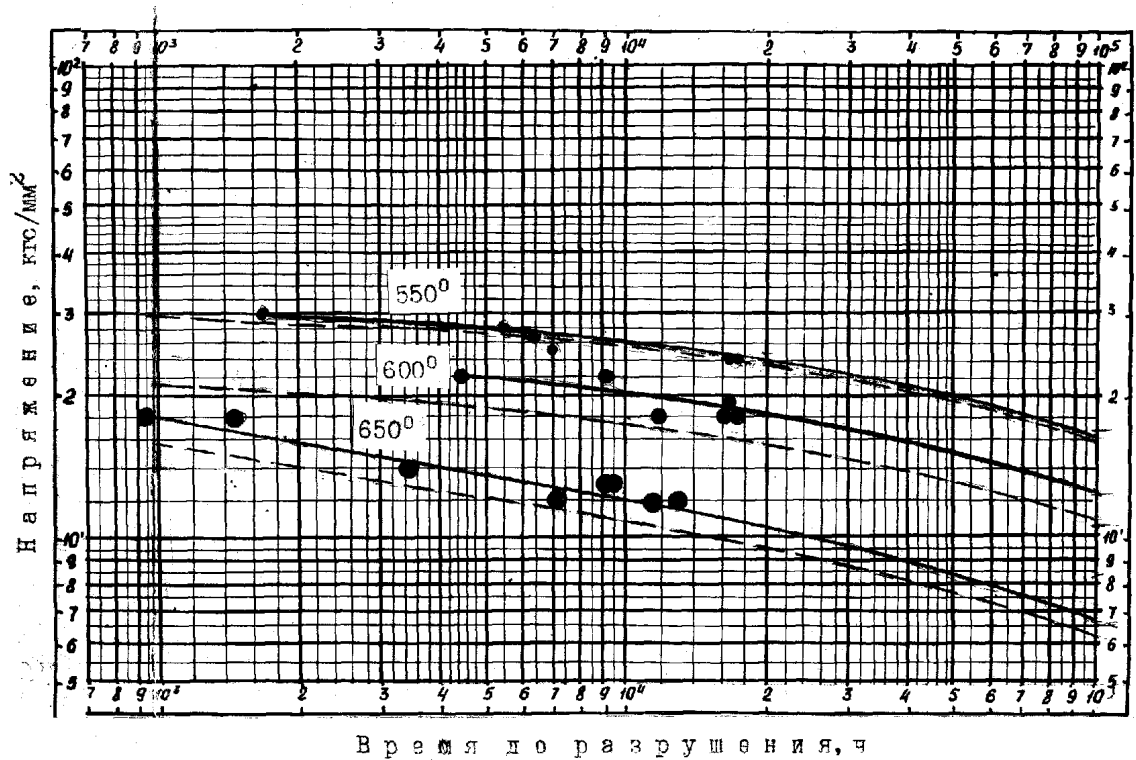


Рис. 2. Длительная прочность труб из сталей ЭП838У (точки, сплошная линия) и 12X18H12Т (штриховая линия, норма)

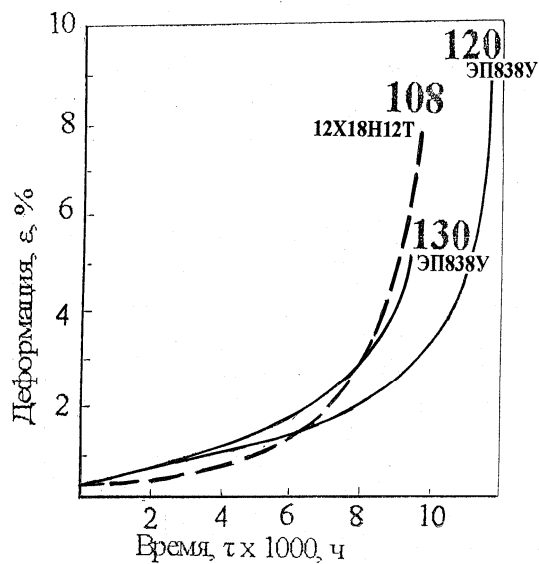


Рис. 3. Ползучесть при 650 °С сталей 12X18H12Т и ЭП838У

Температурно-временные условия работы металла труб, как хромоникелевых, так и хромомарганцевых, способствуют образованию частиц карбида хрома  $Cr_{23}C_6$ , которые вначале выделяются преимуще-

ственно на границах, а затем и в теле зерен, вследствие чего несколько изменяются механические характеристики и увеличивается склонность к межкристаллитной коррозии. За 38336 часов эксплуатации пределы прочности и текучести труб из стали ЭП838У повысились соответственно на 14 % (с 583 до 694 МПа) и 22 % (с 285 до 372 МПа), а удлинение снизилось с 50 до 45 % (абс.). Предел прочности композитного сварного соединения ЭП838У + 12Х18Н12Т соответствовал 629 МПа.

Склонность к межкристаллитной коррозии (МКК) труб из стали ЭП838У оценивали по ГОСТ 6032 (метод АМУ). Кольцевые образцы кипятили в течение 15 ч в водном растворе сернистой меди и серной кислоты в присутствии медной стружки. Металлографическим исследованием до и после кипячения не выявили существенных различий в состоянии внутренней и наружной поверхностей труб, проработавших почти 40 тыс. ч. Лишь в отдельных местах два-три зерна от внутренней поверхности (30 – 40 мкм) имели утолщенные границы. После сплющивания колец до расстояния между параллельными плитами 24,2 мм трещин не обнаружили ни на внутренней, ни на наружной поверхностях.

После наработки 72216 ч диаметр и толщина стенки не изменились, но по сравнению с предыдущей вырезкой (после наработки 38336 ч) вследствие коагуляции карбидных частиц снизились в штатных пределах механические характеристики: предел прочности на 15% (до 587МПа), предел текучести на 34 % (до 243 МПа), относительное удлинение на 17,5 % (до 27,5 %). Критерием надежности, свидетельствующим о значительном охрупчивании аустенитной стали, является снижение относительного удлинения до 18 – 20 % [5].

Металлографическое исследование после наработки 72216 ч показало удовлетворительное состояние металла у внутренней и наружной поверхностей трубы. По результатам испытания согласно ГОСТ 6032 труба из стали ЭП838У не склонна к межкристаллитной коррозии.

На 01.06.2017 г. наработка трубы из стали ЭП838У составляет 105318 ч.

### **Выводы**

1. Пароперегревательные трубы из малоникелевой хромомарганцевой коррозионностойкой жаропрочной стали ЭП838У по нормированным механическим, технологическим и служебным характеристикам не уступают трубам из хромоникелевой стали 12Х18Н12Т.
2. Эксплуатационное опробование в пароперегревателях котлоагрегатов Запорожской ТЭС с наработкой более 100 тысяч часов без замечаний свидетельствует о высокой степени надежности труб из стали

ЭП838У и технической возможности применения их вместо труб из стали 12Х18Н12Т.

3. Экономическая целесообразность использования труб из стали ЭП838У в украинской теплоэнергетике обусловлена как их повышенной коррозионной стойкостью, особенно при работе на низкосортном энергетическом топливе, так и меньшим количеством импортируемых легирующих на тонну труб: хрома – на 60 кг, никеля – на 80 кг.

#### Список литературы

1. Антикайн П. А. Лабораторные и промышленные исследования коррозионной стойкости котельных сталей в воздухе, водяном паре и среде продуктов сгорания природного газа и мазута // П. А. Антикайн, В. М. Зусман, Г. Н. Самарец. – Сб. Жаростойкость котельных марок стали. – М., 1972. – С. 40–47.

2. Декларац. патент України. Жароміцна жаростійка сталь / Сергеев В. В., Хаустов Г. Й., Правдин Ю. М., Фролов В. П., Сенина Т. В. та ін. // Промислова власність. – 2000. – № 6–11.

3. Сенина Т. В. Жаростойкая хромомарганцевая аустенитная сталь для теплоэнергетики / Т. В. Сенина, В. Ф. Фролов, Е. И. Мошкевич и др. // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 6. – С. 52–54.

4. Сенина Т. В. Пароперегревательные трубы из малоникелевой хромомарганцевой стали для современной теплоэнергетики / Сенина Т. В., Фролов В. Ф., Царьков А. К. и др. // Производство труб и баллонов. Тем. сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 2002. – С. 62–67.

5. Бугай Н. В. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования / Бугай Н. В., Березина Т. Г., Трунин И. И. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 270 с.

***Раздел 10.***  
***Опыт, проблемы и перспективы***  
***инженерного образования.***  
***Экологизация высшего образования***  
***с целью подготовки специалистов***  
***для устойчивого развития***  
***промышленности***

***Редактор раздела*** – профессор, д.т.н., заведующий  
кафедрой экологии, теплотехники и охраны труда  
Национальной металлургической академии Украины  
***Ерёмин А.О.***

***Рецензент*** – профессор, д.т.н.,  
проректор по научно-педагогической работе  
Национальной металлургической академии Украины  
***Шатоха В.И.***

# ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ОСВІТИ ІНЖЕНЕРІВ – ПРОЕКТУВАЛЬНИКІВ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ

*Балакін В.Ф., Алпаєв М.Є., Білан К.С.,  
Соловйова І.А., Николаєнко Ю.М.*

*Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

## **Анотація**

Розглянуто особливості та суттєві відмінності підготовки інженерів – проектувальників металургійного виробництва.

У роботі виконаний аналіз особливостей підготовки інженерів – проектувальників металургійного виробництва та перспективи вдосконалення їх освіти на підставі досвіду кафедри технологічного проектування НМетАУ.

Ключові слова: металургія, інженери, освіта, проектування, комп'ютерна підготовка.

## **Вступ**

Професійна підготовка спеціалістів-проектувальників металургійних підприємств в сучасних умовах має особливе значення і потребує суттєвих відмінностей в розробці начальних планів і програм освітньої діяльності при їх навчанні.

По-перше, це пов'язано з поступовим і, в подальшому, повним переходом проектних установ та підрозділів металургійних заводів на підготовку проектів в електронному вигляді.

По-друге, на підприємствах металургійної промисловості існує значна потреба в інженерах-технологах високої кваліфікації з поглибленою підготовкою в галузі інформаційних технологій. Вони повинні вміти виконувати загальний аналіз технологічних проблем виробництва і пропонувати напрямки його вдосконалення для реальних умов технологічних процесів.

Кафедри цільової технологічної підготовки не спроможні у відведені терміни навчання забезпечити поглиблену підготовку в одній особі одночасно і технолога, і проектувальника-дослідника, який здатний не тільки працювати з існуючими комп'ютерними програмами для виконання технологічних розрахунків, але й професійно виконувати роботу інженера-проектанта.

Водночас, фахівці галузі "Інформаційні технології" за спеціальністю "Комп'ютерні науки", без участі технологів не здатні розробляти технологічне програмне забезпечення, виконувати технологічні розрахунки і креслення, робити висновки і надавати рекомендації при розробці проектів металургійних об'єктів та напрямків вдосконалення технології. Тому аналіз особливостей підготовки інженерів-проектувальників металургійного виробництва та перспективи вдосконалення їх освіти в сучасних умовах є актуальною задачею.

## **Постановка задачі**

Безсумнівно, що основні принципи та правила проектування металургійних цехів невпинно вдосконалюються. Це знаходить своє відображення при викладанні дисциплін з основ проектування конкретних цехів на провідних кафедрах НМетАУ.

Ще в минулому та на початку 21-го століття підкреслювалась необхідність безперервних контактів і взаємодії дослідників, проектувальників та технологів [1]. Сьогодення вимагає мати фахівців - проектувальників з поглибленою комп'ютерною підготовкою в проектних організаціях та на металургійних підприємствах, в тому числі в проектних і технічних відділах, центрально-заводських лабораторіях тощо.

В даній роботі поставлена мета показати особливості та суттєві відмінності підготовки інженерів-проектувальників металургійного виробництва, які вкрай необхідні при сучасній комп'ютеризації технологічних процесів і їх досліджень, автоматизації проектування технології, розробці креслень окремих видів обладнання, планів цехів і в цілому металургійних підприємств.

## **Основна частина досліджень**

На даний час підготовка фахівців на кафедрі технологічного проектування (ТП) НМетАУ здійснюється за напрямом "Металургія" за спеціалізацією "Обробка металів тиском: комп'ютерне проектування в металургії". Це єдина кафедра подібного профілю в межах України.

Кафедра технологічного проектування більше 30 років здійснює підготовку технологів-проектувальників на основі використання систем автоматизованого проектування (САПР) та комп'ютерної техніки.

Основні орієнтири навчання, які викладаються в спеціальних дисциплінах кафедри:

- використання комп'ютерних технологій при проектуванні металургійних процесів, систем автоматизованого проектування (САПР);
- моделювання металургійних процесів, устаткування і технологій;
- розробка технологічних процесів, які забезпечують високу якість, економічність і екологічну безпеку продуктів на основі сучасних стандартів.

Професійній орієнтації майбутніх фахівців сприяють практична спрямованість технологічних дисциплін навчальних курсів з моделюванням виробничих ситуацій під час викладання; проведення частини практичних занять у вигляді ділових ігор; високий відсоток (80 % і більше) комп'ютеризації при навчанні на кафедрі.

При цьому додатковий акцент робиться на вивченні таких специфічних дисциплін в циклі вільного вибору студента для бакалаврів, як "Основи комп'ютерної графіки", "Системи автоматизованого проектування", "Проектування та застосування баз даних", "Комп'ютеризація інженерних розрахунків", "Технологія прийняття рішень при проекту-

ванні", "Експертний аналіз проектів", "Інформаційні технології в управлінні проектами".

Магістри у відповідному циклі вивчають, зокрема, дисципліни: "Технології інформаційного моделювання проектних рішень", "Металургійні технології переробки вторинних ресурсів", "Основи інвестиційного проектування та бізнес-планування", "Математичні методи та спеціалізовані програми обробки даних", "Інформаційні технології науково-дослідної роботи", "Системи забезпечення якості при проектуванні металургійного виробництва". Магістри додатково одержують знання з педагогіки, методології наукової діяльності, комп'ютерного моделювання технологічних процесів та менеджменту.

Студенти протягом навчання проходять технологічну та переддипломну практику в ДП «УКРДіПРОМЕЗ» (Державне підприємство "Український інститут по проектуванню металургійних заводів"), на металургійних підприємствах Дніпра, Кам'янського, Нікополя, в науково-дослідних установах і на кафедрі ТП, вивчають широкий спектр металургійних технологій в доменних, сталеплавильних, прокатних та трубопрокатних цехах.

Внаслідок цього постійно зростає частка випускників, які отримали роботу за фахом, відповідно кваліфікаційним вимогам до спеціалістів і магістрів. Серед випускників є талановиті інженери, наукові співробітники, керівники відділів, керівники підприємств і навіть міжнародних компаній. Сфери діяльності випускників кафедри стосуються всієї широти металургійних переділів, від підготовки сировини до виробництва прокату і утилізації відходів металургії.

Таким чином, багаторічний досвід кафедри ТП НМетАУ свідчить про ефективність та перспективність підготовки інженерів-проектувальників металургійних підприємств, які мають поглиблену комп'ютерну підготовку, володіють комп'ютерними технологіями проектування та дослідження технологічних процесів. Це дозволяє їм швидко адаптуватись в проектних колективах з використанням САПР, які вирішують цілий комплекс завдань, починаючи від аналізу завдання на проектування технічних об'єктів, до повної розробки конструкторської та технологічної документації в електронному вигляді.

Деякі питання набору абітурієнтів в сучасних умовах мають особливе значення.

Формування контингенту студентів відбувається, здебільшого, за рахунок випускників загальноосвітніх шкіл Дніпра та області а також випускників технікумів. Свого часу середній щорічний конкурс абітурієнтів на кафедру ТП становив 4 – 6 осіб на ліцензійне місце. Тому 70 – 90 % абітурієнтів, що залучались до навчання, в шкільних атестах мали відмінні оцінки. Цьому сприяла і назва спеціалізації з 1993 року: "Проектування і комп'ютерне забезпечення технологічних процесів", а в подальшому: "Комп'ютерне проектування в металургії".

Внаслідок демографічного спаду кількість абітурієнтів значно зменшилась. В той же час кількість бажаючих навчатись, наприклад, менеджменту, екології та комп'ютерним наукам, в декілька разів перевищує кількість ліцензійних місць на ці спеціальності. Навчання на кафедрі ТП передбачає засвоєння як технологічних, так і цілого ряду комп'ютерних дисциплін, а випускники кафедри досить часто досягають керівних посад на підприємствах і в проектних установах, подеколи повністю переходять до роботи, пов'язаної з комп'ютерним програмуванням. Тому доцільно залучати абітурієнтів до навчання комп'ютерному технологічному проектуванню в металургії.

Оскільки проектувальник стикається з постійним вдосконаленням технологій та обладнання, то процес навчання відбувається протягом всієї кар'єри. Важливим напрямком вдосконалення підготовки інженерів-проектувальників металургійного виробництва є використання дистанційних технологій навчання. Використовуючи сучасну форму дистанційного навчання, онлайн навчання, з'являється можливість надати студенту більш повно описаний матеріал в зручному вигляді. Джерелом інформації в такому випадку є бази даних в освітньому просторі, координатором навчального процесу – викладач, а інтерпретатором знань – студент.

Суттєво змінюється і роль викладача. На нього покладаються такі функції, як координування пізнавального процесу, коригування курсу, що вивчається, консультування слухачів під час впорядкування індивідуального навчального плану, керування їхніми навчальними проектами тощо. Він допомагає студентам у їхньому професійному самовизначенні. Діяльність студента змінюється у напрямі від одержання знань до їх пошуку.

В даний час НМетАУ активно розвиває дистанційні технології навчання, а співробітники кафедри технологічного проектування приймають у цьому активну участь. Важливим завданням викладачів є навчити студента вміти шукати необхідні знання з використанням всесвітнього інформаційного простору, використовуючи сучасні інструменти.

### **Висновки**

Сьогодення вимагає мати фахівців з поглибленою комп'ютерною підготовкою, особливо в проектних організаціях та технологічних і проектних відділах металургійних підприємств. Дисципліни, які викладаються студентам на кафедрі технологічного проектування НМетАУ в циклах дисциплін самостійного вибору вищого навчального закладу та вільного вибору студента, дозволяють підготувати кваліфікованих інженерів-проектантів, які швидко адаптуються на підприємствах і в проектних організаціях з високим рівнем автоматизації проектних та дослідницьких робіт.

Запропоновані напрямки збільшення кількості абітурієнтів та випускників вишу за напрямом комп'ютерного технологічного проектування в металургії.

#### **Список літератури**

1. Авдеев В. А. Основы проектирования металлургических заводов: Справочное издание / В. А. Авдеев, В. М. Друян, Б. И. Кудрин. – М. : Интернет Инжиниринг, 2002. – 464 с.

# ПІДГОТОВКА КВАЛІФІКОВАНИХ КАДРІВ ДЛЯ МЕТАЛУРГІЇ: ДОСВІД, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

*Дашковська О.В.<sup>1</sup>, Погребняк В.П.<sup>1</sup>, Солоденко А.К.<sup>1</sup>,  
Гончарова А.В.<sup>2</sup>*

*1 - Інститут модернізації змісту освіти, м. Київ, Україна*

*2 - Дніпровська філія Інституту модернізації змісту освіти, м. Дніпро, Україна*

## **Анотація**

Досліджується досвід співробітництва вищих навчальних закладів, організацій роботодавців, громадських організацій та міжнародних експертів в рамках пілотного проекту з організації розроблення професійних і галузевих стандартів вищої освіти для металургії в контексті використання його в сучасних умовах реформування вищої школи. Аналізуються заходи МОН щодо імплементації Закону України «Про вищу освіту» (2014) у частині розроблення стандартів вищої освіти, освітніх програм та організації на їх основі освітнього процесу у вищих навчальних закладах. Оцінюються можливі проблеми і ризики при впровадженні.

Ключові слова: пілотний проект, стандарт вищої освіти, освітня програма, професійний стандарт, компетентність, ризик, металургія.

## **Вступ**

Стабілізація та подальше соціально-економічне зростання України багато в чому залежать від якісної підготовки фахівців, рівень компетентностей яких міг би забезпечити виробництво наукоємної та конкурентоспроможної на світовому ринку продукції, зробити економіку України більш стійкою до наслідків глобалізації ринку.

## **Постановка задачі**

Осучаснення змісту освіти та технологій навчання, запровадження сучасних форм організації освітнього процесу, які б відповідали масштабним суспільним та економічним перетворенням, що почали відбуватись в Україні, поставило ряд конкретних завдань:

- забезпечити конституційні права особи на якісну освіту впродовж життя;
- створити можливості для гнучкого та динамічного реагування на швидкі зміни на ринку праці, врахування індивідуальних потреб особи;
- визначити, чому навчати та як навчати в умовах необхідності реформування економіки України на інноваційних засадах.

## **Основна частина дослідження**

Не виникає сумнівів в тому, що металургійна промисловість була і є базовою для економіки України. Без неї не можуть розвиватися інші галузі державного та приватного сектору економіки. Тому,

якість підготовки кадрів є пріоритетом у роботі вищих навчальних закладів, які готують фахівців для металургії та енергетики. Починаючи з 2007 року вищі навчальні заклади здійснювали підготовку фахівців для металургійної та електроенергетичної промисловості:

- бакалаврів - за 9 напрямками підготовки;
- спеціалістів та магістрів - за 42 спеціальностями;
- молодших спеціалістів - за 31 спеціальністю.

В рамках пілотного проекту [1] були створені робочі групи та розроблені перші професійні стандарти з шести професій для металургії та енергетики:

- Інженер конвертерного виробництва;
- Майстер конвертерного виробництва;
- Сталевар конвертера;
- Підручний сталевара конвертерного виробництва (конвертера);
- Інженер-електрик в енергетичній сфері енергопостачальної компанії;
- Інженер-електромеханік гірничий.

Створення нових професійних стандартів, а на їх основі – нових галузевих стандартів вищої освіти стало першим кроком щодо впровадження Національної рамки кваліфікацій. На основі професійних стандартів за напрямом підготовки «Металургія» розроблені та затверджені як експериментальні 5 галузевих стандартів вищої освіти: «Металургія чорних металів»; «Металургія кольорових металів»; «Обробка металів тиском»; «Спеціальна металургія»; «Промислова теплотехніка» [2].

Особливість розроблюваних стандартів полягала в їх узгодженості з професійними стандартами, що були розроблені для деяких металургійних професій. Було проведено аналіз відповідності компетенцій й умінь випускника вищого навчального закладу, визначених освітньо-кваліфікаційною характеристикою підготовки бакалавра, основним трудовим функціям (одиницям), визначеними професійними стандартами. Освітньо-кваліфікаційна характеристика (ОКХ) включала 30 компетентностей, які базувались на більш як 70 критеріях оцінювання результатів навчання.

Робота виконувалась в рамках спільного проекту корпорації «СКМ» (Систем Кепітал Менеджмент), Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за участі Аналітичного центру «Бюро Економічних і Соціальних Технологій» (АЦ "БЭСТ"), Благодійного фонду «Розвиток України» і Британської ради в Україні та провідних експертів Ради Європи.

З 1 вересня 2012 року всі навчальні заклади, задіяні в експерименті з розроблення і впровадження новітніх галузевих стандартів вищої освіти у межах напрямів «Металургія», «Електротехніка та

електротехнології» та «Електромеханіка», розпочали навчання студентів за новими затвердженими стандартами.

У березні-червні 2013 року в Донецькому та Дніпропетровському регіонах було проведено ряд робочих зустрічей роботодавців у сферах металургії та енергетики з розробниками галузевих стандартів, в результаті яких погоджено кваліфікаційні характеристики та профстандарты посад «Інженер конвертерного виробництва» та «Майстер конвертерного виробництва», розроблені спільні пропозиції щодо напрямів співпраці вищих навчальних закладів з роботодавцями з питань узгодження освітніх та професійних стандартів за напрямом «Металургія», посилення практичної (виробничої) складової підготовки студентів, розробки концепції стажування педагогічних кадрів на підприємствах галузі, підвищення престижності металургійних спеціальностей.

Викладачі профільних кафедр пілотних вищих навчальних закладів пройшли стажування на ПАТ МК «Азовсталь», ТОВ «Сервіс-Інвест», ДТЭК, підстанції «Донбаська», «Аеропорт 110», центральний щиток ТОВ «Сервіс-Інвест». Під час стажування були проведені майстер-класи, ознайомлення з новим обладнанням, зустрічі з керівниками провідних технічних підрозділів. За результатами стажування викладачі отримали відповідні сертифікати в рамках інноваційного проекту «Паспорт професії» програми «Сучасна освіта» компанії СКМ. Суттєву допомогу у реалізації пілотного проекту надала Галузева рада з металургії (керівник Притоманов С.О., генеральний директор Федерації металургів України).

У рамках проекту за участю представників роботодавців-розробників профстандартів були представлені адаптовані версії профстандартів «Паспорт професії. Професійний стандарт (скорочена версія)» в пілотних ВНЗ України. «Паспорти професій» були вручені студентам і викладачам Національної металургійної академії України, Приазовського державного технічного університету (Маріуполь), Донецького національного технічного університету, НТУУ «КПІ». Паспорти професій були також надіслані для ознайомлення і використання у 20 технічних університетів України. Підсумки спільної роботи були підведені на заключному заході «Паспорт професії: знаєш, чому вчитися», який організували і провели МОН, компанія СКМ разом із тижневиком «Кореспондент» 18 вересня 2013 року в м. Києві.

У 2013 – 2014 навчальному році у базових вищих навчальних закладах за новими стандартами уже навчалось: 721 студент за напрямом «Металургія», 263 - «Електротехніка та електротехнології», 226 – «Електромеханіка». Напрацьований в ході виконання пілотного проекту досвід було використано при створенні галузевих стандартів вищої освіти з інших напрямів та спеціальностей.

Згідно із Законом України «Про вищу освіту» (далі Закон) [3] скасована підготовка фахівців за освітньо-кваліфікаційними рівнями «спеціаліст» та «молодший спеціаліст». Відповідно до постанови КМУ від 29 квітня 2015 року за № 266 [4] підготовка фахівців для металургії та енергетики здійснюється за трьома спеціальностями: 132 Матеріалознавство, 136 Металургія і 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Із введенням в дію нового Закону організація освітнього процесу у вищих навчальних закладах визначається стандартами вищої освіти (СВО) і розробленими на їх основі освітніми програмами (ОП). СВО як «наступники» галузевих стандартів вищої освіти (ГСВО) адаптували і розвинули на сучасному рівні ідеї ГСВО: освітньо-кваліфікаційна характеристика (ОКХ) трансформувалась в СВО, освітньо-професійна програма (ОПП) – в освітню програму, засоби діагностики (ЗД) – у систему внутрішнього забезпечення якості освіти.

Нові стандарти вищої освіти як і ГСВО базуються на компетентнісному підході, при цьому СВО використовують філософію визначення вимог до фахівця, закладену в основу Болонського процесу, та в міжнародному Проекті Європейської комісії «Гармонізація освітніх структур в Європі» (Tuning Education Structures in Europe, TUNING). В результаті змінилась концепція СВО. Якщо ГСВО орієнтували на надання професійної кваліфікації, базуючись на чинних державних класифікаторі професій, класифікаторі видів економічної діяльності та галузевих кваліфікаційних характеристиках професій (посад), то СВО спрямовані на надання лише академічних кваліфікацій і не допускають (за окремими виключеннями) визначення професійних кваліфікацій, переліку посад, які може займати випускник вищого навчального закладу, опанувавши ту чи іншу освітню програму. Значно ускладнилась процедура погодження та введення в дію СВО.

Протягом 2015 – 2016 років були розроблені нормативно-правові документи, що визначили концепцію СВО, методологію та методику їх створення, порядок розгляду та затвердження. Створені відповідні структури і організовано розроблення проектів СВО, їх громадське обговорення, експертиза та погодження тощо [5, 6].

Не зважаючи на затримки з організацією роботи Національного агентства із забезпечення якості вищої освіти (НАЗЯВО), процедурну переобтяженість Порядку розроблення, погодження та введення в дію СВО, невизначеність механізму обов'язкового погодження з роботодавцями, галузевими органами виконавчої влади, станом на початок липня цього року розроблені проекти стандартів освітнього ступеня «бакалавр» практично зі всіх спеціальностей з 28 галузей знань (із 29), майже 50 відсотків проектів СВО освітнього ступеня «магістр» проходять громадське обговорення, біля 10 – на погоджен-

ні в НАЗЯВО. За прогнозом сектору вищої освіти НМР у 2017 році будуть затверджені та введені в дію всі бакалаврські стандарти і розроблені проекти з більшості спеціальностей магістра.

Під час розроблення освітніх програм за спеціальностями і рівнями вищої освіти вищі навчальні заклади мають подолати окремі недоліки Методичних рекомендацій через які у переважній більшості проектів стандартів вищої освіти, що направлялись на рецензування і експертизу, результати навчання подавались у вигляді гасел, які неможливо ідентифікувати, кількісно оцінити та виміряти, як цього вимагає Закон [7]. Ситуацію дещо виправляють лист МОН [8] та матеріали семінару [9], які надають додаткову інформацію і рекомендації з проблемних питань розроблення стандартів вищої освіти та освітніх програм.

В контексті впровадження СВО і ОП у майбутньому може виникнути необхідність узгодження нормативних актів МОН з чинними документами Мінсоцполітики та галузевих органів. Слід уникнути ситуації, коли «коса» задекларованої демократичності академічної кваліфікації при виборі робочого місця не натрапила на «камінь» чинних державних класифікатора професій, класифікатора видів економічної діяльності та галузевих кваліфікаційних характеристик професій (посад). При цьому також необхідно враховувати, що в 2020 – 2025 рр. МОН передбачає «перегляд концепту СВО аж до повного їх скасування чи надання статусу рекомендаційних».

### **Висновки**

1. Вищим навчальним закладам, які здійснюють підготовку кадрів для металургії, при розробці ОП прийдеться враховувати «багато профільність» спеціальності 136 Металургія: або створювати єдину ОП, спільну для всіх існуючих спеціалізацій, або розробляти окремі ОП для кожної спеціалізації.
2. Потребують узгодження на міжгалузевому рівні акти МОН і Мінсоцполітики стосовно вимог ринку освітніх послуг і ринку праці.

### **Список літератури**

1. Наказ Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України від 11.05.2012 № 566 «Про впровадження новітніх стандартів вищої і професійно-технічної освіти».
2. Наказ МОНмолодьспорту від 02.08.2012 № 877 «Про затвердження новітніх стандартів вищої освіти».
3. Закон України «Про вищу освіту», 1 липня 2014 р. №1556-VII.
4. Постанова КМУ від 29.04.2015 р. № 266 «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти».
5. Наказ МОН від 11.09.2015 №922 «Про науково-методичну раду Міністерства освіти і науки України». – Режим доступу: <http://old.mon.gov.ua/ua/about>

ministry/normative/4402-

6. Наказ МОН від 01.06.2016 №600 «Про затвердження та введення в дію Методичних рекомендацій щодо розроблення стандартів вищої освіти». – Режим доступу: <http://old.mon.gov.ua/ua/about-ministry/normative/5555->

7. Дашковська О.В., Погребняк В.П. «Стандарти вищої освіти: непростий шлях від проектів до впровадження». Матеріали ІІ науково-практичної конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно-комунікаційних систем». – Київ, 2017, С. 299-303.

8. Лист МОН від 28.04.2017 № 1/11-4171.- Режим доступу: <https://imzo.gov.ua/pro-imzo/pro-institut-modernizatsiyi-zmistu-osviti/>

9. Матеріали семінару «Розроблення та імплементація освітніх програм відповідно до Національної рамки кваліфікацій, ESG та стандартів вищої освіти». – Режим доступу: <http://pedprtsa.ua/185024-online-116.html>

# **ПРО ЗАХОДИ З ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ВИЩОЇ ОСВІТИ В НАЦІОНАЛЬНІЙ МЕТАЛУРГІЙНІЙ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ З МЕТОЮ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ-МЕТАЛУРГІВ**

*Єрьомін О.О., Матухно О.В., Гупало О.В., Єрьоміна О.Л.*

*Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

## **Анотація**

В роботі розглядаються аспекти екологізації вищої освіти, що знайшли впровадження в національній металургійній академії України. Заходи, які реалізуються в НМетАУ, спрямовані на формування сучасного світогляду молоді, глибокого осмислення проблем довкілля з урахуванням ціннісних орієнтацій нації, розуміння принципів та законів розвитку сьогодення крізь наскрізну екологічну підготовку фахівців.

Ключові слова: екологізація, вища освіта, сталий розвиток, екологія.

Екологізація вищої освіти є одним з пріоритетних напрямів діяльності Міністерства освіти і науки України та повинна бути реалізована у всіх навчальних закладах незалежно від їх форм власності [1]. Рішенням колегії МОН України від 27.11.2015 р. рекомендовано під час підготовки стандартів вищої освіти включати екологічну компетентність фахівця до переліку загальних компетентностей. На жаль в деяких проектах стандартів вищої освіти, що знаходяться в стадії обговорення та затвердження, посилення на екологічні компетентності відсутні та не передбачені відповідні нормативні результати у термінах результатів навчання.

Освіта завжди була, є і буде основою збалансованого розвитку будь-якої країни та світової громади взагалі. Освіта для сталого розвитку (ОСР) обов'язково включає екологічну складову та розвивається на базі екологічної освіти. Фахівці з екології та педагогіки [2, 3] відзначають, що не існує уніфікованої системи екологічної освіти, яку можна було б застосовувати у будь-якій країні та відносно до любого виду людської діяльності. Екологічна освіта розвивається на основі глибокого осмислення проблем довкілля з урахуванням особливостей країни: соціальної, економічної та екологічної ситуації, рівня розвитку науки, технології та виробництва, звичаїв, культурних особливостей, ціннісних орієнтацій нації та багатьох інших факторів. Формування екологічної освіти в Україні також відбувається на основі національних особливостей та власного практичного досвіду науково-педагогічних кадрів.

Останнім часом в Україні спостерігалась недостатня увага з боку офіційних структур та відомств щодо питань екологічної освіти взагалі, та екологізації освіти у вищих навчальних закладах зокрема. Так, наприклад, існувала практика вилучення дисциплін екологічного зміс-

ту з переліку обов'язкових при складанні робочих планів навчання студентів інженерних спеціальностей технічних вузів країни, що су-перечило: основним положенням «Порядку денного на ХХ століття», а саме: забезпеченню просвіти з питань розвитку та збереження навколишнього середовища при підготовці майбутніх керівників [4]; прямим вказівкам Закону України «Про вищу освіту», статті 26, п.1, пп. 4, де записано, що однією з основних завдань вищого навчального закладу є «формування особистості шляхом патріотичного, правового, екологічного виховання, утвердження в учасників освітнього процесу моральних цінностей, соціальної активності, громадянської позиції та відповідальності, здорового способу життя, вміння вільно мислити та самоорганізовуватися в сучасних умовах» [5].

Рішення Колегії Міністерства освіти та науки України «Про екологізацію вищої освіти України з метою підготовки фахівців для стало-го розвитку» [1] дещо змінило ситуацію на краще. Одними з пер-ших вишів, де був накопичений величезний досвід цей важливої осві-тньо-виховної екологічної діяльності стали НТУ «Київський політех-нічний інститут» та Національний лісотехнічний університет України, де вперше були реалізовані програми наскрізної екологічної підготов-ки фахівців та запроваджені магістерські програми з екологобезпеч-них та ресурсощадних технологій, економіки довкілля й природних ресурсів [6]. Також принципи екологізації вищої освіти задля сталого розвитку активно реалізують Національний гірничий університет, На-ціональний університет «Львівська політехніка», Київський націона-льний університет імені Тараса Шевченка, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Харківський національ-ний університет імені В. Н. Каразіна, Львівський національний уні-верситет імені Івана Франка, Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова, Сумський державний університет, Одеський державний екологічний університет та інші виші.

На підставі широкого досвіду низки ВНЗ України у впровадженні «екологічної освіти» та «екологізації освіти» з метою підготовки фахі-вців для сталого розвитку, та на виконання Рішення колегії Міністер-ства освіти і науки України [1], листа керівникам ВНЗ з рекомендація-ми Міністерства освіти і науки України про поширення екологічних знань серед студентів ВНЗ (Лист № 1/9-95 від 23.02.2016 р.), звернен-ня асоціації ректорів вищих технічних навчальних заходів України «Про відповідальність технічних університетів за екологізацію підго-товки інженерних кадрів для досягнення цілей сталого розвитку» від 7 липня 2016 р. Вченою Радою Національної металургійної академії України було розроблено низку заходів, призначених для безперерв-ної екологічної освіти студентів задля забезпечення сталого розвитку освіти та екологізації освітнього процесу у НМетАУ. Ці заходи цілком

забезпечують надбання відповідних компетентностей випускниками та отримання відповідних результатів навчання.

Так, рішення Вченої Ради НМетАУ передбачено:

1) Вивчення студентами 1 – 2 курсу всіх спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти дисципліни, що присвячена питанням екологізації вищої освіти та основам екології в обсязі 3 кредитів ECTS. В рамках вивчення цієї дисципліни студент опановує основні початкові поняття та закони екології, причини та наслідки виникнення екологічних проблем, принципи нормування шкідливих речовин у довкіллі, методи боротьби з забрудненням довкілля, основи еколого-економічних засад раціонального природокористування, вивчає основні цілі та завдання сталого розвитку. Дисципліна дозволяє отримати базові теоретичні знання з питань закономірностей взаємодії людського суспільства та природи.

2) Включення до навчальних планів підготовки бакалаврів за технологічними спеціальностями навчальної дисципліни циклу фахової підготовки, що передбачає вивчення технології та техніки екологічного забезпечення виробництва за відповідною спеціальністю загальним обсягом 4 – 5 кредитів ECTS для засвоєння знань та придбання навичок, необхідних для охорони довкілля на виробництві за обраним фахом. В результаті вивчення дисципліни студент знайомиться з джерелами, видами та масштабами забруднення навколишнього середовища виробництвом за спеціальністю, методами, пристроями та обладнанням для очистки викидів. В програмах підготовки бакалаврів за нетехнологічними спеціальностями передбачено вивчення проблематики в межах навчальних дисциплін циклу фахової підготовки шляхом включення відповідних розділів або тем до програм цих дисциплін.

3) При підготовці магістрів з всіх спеціальностей запроваджено навчальний курс «Сталий розвиток в промисловості» де розглядаються наступні питання: фактори та інструменти запобігання зміни клімату на Землі, фактори та технологічне забезпечення сталого розвитку за фахом, прогнозування та сценарії розвитку промисловості, зокрема металургії в світі та Україні, деякі питання з розробки стратегії місцевого сталого розвитку. В 2015 році для забезпечення даної дисципліни була видана монографія «Сталий розвиток чорної металургії» професором НМетАУ, д.т.н. Шатохою В. І.

Дана дисципліна викладається фахівцями кафедри екології, теплотехніки та охорони праці (ЕТОП), які вже мали досвід викладання споріднених дисциплін: «Формування екологічного світогляду», «Соціальна екологія» та багаті напрацювання щодо практичних робіт з розробки стратегій сталого розвитку. Акцент дисципліни «Стратегія сталого розвитку в промисловості» спрямований на екологічні проблеми промислового металургійного виробництва та шляхи їх вирішення для забезпечення сталого розвитку. Практичні заняття прохо-

дять у вигляді дискусій та обговорення, роботи в групах, ділових ігор, анкетування та з залученням інших інноваційних методів навчання. Мета практичних робіт полягає не лише у закріпленні знань, але й у формуванні у студентів моделей поведінки відповідно до потреб сталого розвитку, що, на нашу думку, повинно позитивно впливати на формування екологічного світогляду майбутнього фахівця.

4) Для магістрів всіх спеціальностей викладаються дисципліни, що спрямовані на вивчення нових напрямів інноваційного розвитку промисловості та сучасних еко-інновацій. Студенти знайомляться з вітчизняними та зарубіжними інноваційними розробками в рамках обраної спеціальності, виконують патентний пошук сучасних еко-технологій та обладнання, та здійснюють прогнозування впливу цих розробок на забезпечення сталого розвитку в обраній галузі. Як приклад наведемо деякі з таких дисциплін: «Енергозбереження в технологічних установках та будівлях»; «Економіко-екологічні аспекти ливарного виробництва»; «Перспективні напрями розвитку матеріалознавства»; «Нові матеріали в металургії» та інші.

Завершальним етапом екологічної освіти в НМетАУ з метою підготовки «менеджерів вищого рівня та системних аналітиків, що спроможні приймати науково обґрунтовані та практично доцільні рішення з урахуванням концепції сталого розвитку на державному та муніципальному рівнях [1]» при дипломуванні бакалаврів та магістрів всіх спеціальностей до пояснювальної записки випускної кваліфікаційної роботи включено підрозділ «Захист навколишнього середовища» в якому студент випускник реалізує надбані компетентності, що стосуються сталого розвитку та доводить свою компетентність з екологічних питань.

На виконання пункту 6 Рішення колегії МОН України [1] «організувати постійно діючі курси підвищення кваліфікації для фахівців... відповідальних за імплементацію в Україні цілей сталого розвитку» на базі існуючого центру післядипломної освіти, перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів НМетАУ розроблені програми для підвищення кваліфікації й професійної перепідготовки з екологізації економічної діяльності та управління, керівників і фахівців виробничої сфери, державного управління, працівників ВНЗ та інших категорій працюючих.

### **Висновки**

У НМетАУ проводиться активна робота з розробки та апробації навчальних програм з проблем сталого розвитку, спрямованих на формування екоцентричного типу свідомості молоді для забезпечення екологічно безпечної економіки. Поруч з прищепленням студентам навичок самостійного вирішення техніко-екологічних проблем, ми намагаємось навчити їх базувати свої рішення на основі світових і на-

ціональних нормативних документів з екологічної безпеки виробництва. Причому, з урахуванням постійного розвитку і удосконалення цих документів, нами розробляється методика навчання самостійному пошуку і роботи з ними. Досвід НМетАУ та інших ВНЗ України з впровадження екоосвіти для сталого розвитку в навчальний процес безумовно потребує систематизації і подальшого наукового аналізу.

#### **Перелік посилань**

1. Рішення Колегії Міністерства освіти та науки України «Про екологізацію вищої освіти України з метою підготовки фахівців для сталого розвитку» від 27.11.2015 р. протокол № 10/5-4 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://mon.gov.ua/about/kolegiya-ministerstva/rishennya-kolegiyi-ministerstva.html> (дата звернення 26.10.16 р.).
2. Вступ до фаху : Підручник / М. О. Клименко [та ін.]. – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. – 428 с.
3. Рідей Н. М. Теорія і практика ступеневої підготовки майбутніх екологів : автореф. дис. ... д-ра пед. наук : 13.00.04 / Рідей Н. М. ; Національний університет біоресурсів і природокористування України. – Київ, 2011. – 60 с.
4. Програма дій «Порядок денний на 21 століття» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/agenda21\\_ch36.shtml](http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/agenda21_ch36.shtml) (дата звернення 26.10.16).
5. Закон України «Про вищу освіту» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1556-18/page2>

# ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ОСВІТНІХ ПРОЕКТІВ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИБІРКОВОГО КОНТРОЛЮ

*Кармазіна Л.Л.<sup>1</sup>, Лазарева Є.Д.<sup>1</sup>, Кадильникова А.В.<sup>2</sup>*

*1 – Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

*2 – Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна*

## **Анотація**

Досліджено статистичні методи вибіркового контролю для оцінювання якості освітніх проектів. В роботі пропонується упровадження системи контролю показників якості продукту освітнього проекту на всіх етапах його життєвого циклу. Доведено, що ефективним засобом оцінки якості є статистичні методи аналізу, регулювання та контролю якості продукції освітніх проектів, які засновуються на методах математичної статистики і дозволяють обґрунтовано приймати рішення питань управління якістю по обмеженому числу спостережень.

Ключові слова: якість, освітній проект, статистичні методи, діаграма Ісікави.

## **Вступ**

У демократичному суспільстві освітні заклади функціонують відповідно до стандартів продуктивності та ефективності навчання, якості освітніх послуг та очікувань громадян – учасників навчальних проваджень. У цьому розумінні оцінювання роботи освітнього закладу є найбільш ефективним, якщо його основою є встановлені стандарти якості та перевірені методи оцінки відповідності закладу цим стандартам. Основою таких стандартів є суспільні очікування щодо якості освітніх послуг (наприклад, повноти інформації, зручності та комфортності приміщень тощо), а також показники роботи закладу (наприклад, тривалість навчання, питома вага навчальних дисциплін тощо).

## **Постановка задачі**

Важливо зазначити, що метою оцінювання якості роботи закладу є вдосконалення організації роботи, а саме підвищення продуктивності, ефективності та якості навчальних процедур.

Оцінювання якості дає керівництву закладу можливість вирішувати такі завдання:

- отримання інформації про поточну ситуацію;
- обґрунтування поточних та стратегічних рішень;
- визначення пріоритетів для змін;
- моніторинг інновацій, оцінка їхньої результативності та ефективності;
- оцінювання відповідності роботи закладу існуючим стандартам та нормативам.

Міжнародний досвід оцінювання якості роботи освітніх закладів дає підстави визначити основні складові елементи цього процесу:

- стандарти якості роботи – кількісні та якісні характеристики роботи як спеціалізованої державної установи, які формуються відповідно до базових цінностей освітньої системи та демократичного суспільства і можуть бути зафіксовані у вигляді вимог, нормативів, суспільних очікувань тощо;
- критерії якості роботи – суттєві відмінні ознаки якості, що є базисом процедур оцінки якості, зокрема вибору показників та методів оцінювання;
- показники якості роботи – кількісні чи якісні дані, які визначають рівень відповідності роботи сформульованим критеріям якості;
- методи оцінювання – сукупність стандартних засобів дослідження та прийомів отримання, обробки та аналізу даних про діяльність закладу: збір та аналіз статистичної інформації, огляд та аналіз документів, опитування тощо.

При проектуванні підсистеми забезпечення якості освітніх послуг бажано враховувати наступні фактори:

- необхідна структура, ієрархія й основні частини системи (за підрозділами);
- основні напрямки й інтенсивність інформаційних потоків;
- вимоги до технічних і програмних засобів комп'ютерних систем, що використовуються у підсистемі забезпечення якості продукції;
- необхідність підключення до глобальних мереж чи до інших локальних комп'ютерних систем.

### **Основна частина досліджень**

Багато сучасних методів математичної статистики мають досить складний для сприйняття характер, а тим більше, для широкого застосування всіма учасниками процесу управління якістю не є доцільними [1]. В той же час, при всій простоті, ці методи дозволяють зберегти зв'язок з статистикою і дають можливість професіоналам при необхідності удосконалювати їх. Отже, до основних інструментів контролю якості відносяться наступні методи [2]:

- контрольний листок;
- гістограма;
- діаграма розкиду;
- діаграма Парето;
- стратифікація (розшарування);
- діаграма Ісікави (причинно-наслідкова діаграма);
- контрольна карта.

Основне їх призначення – контроль протікаючого процесу і надання учаснику процесу фактів для коректування і поліпшення процесу. Ефективним засобом оцінки якості є статистичні методи аналізу, регулювання та контролю якості продукції. Вони засновані на методах математичної статистики і дозволяють обґрунтовано приймати рішення питань управління якістю по обмеженому числу спостережень [3].

Використовування діаграми розкиду в процесі контролю якості не обмежується тільки виявленням вигляду і тисноти зв'язку між парами змінних. Діаграма розкиду використовується також для виявлення причинно-наслідкових зв'язків показників якості і впливаючих чинників. Діаграма розкиду дозволяє наочно показати характер зміни параметра якості в часі. Для цього з початку координат проводиться бісектриса. Якщо всі крапки ляжуть на бісектрису, то це означає, що значення даного параметра не змінюється в процесі експерименту. Отже, чинник (або чинники), що розглядається, не впливає на параметр якості. Якщо основна маса крапок лежить під бісектрисою, то це значить, що значення параметрів якості за минулий час зменшилося. Якщо ж крапки лягають вище за бісектрису, то значення параметра за час, що розглядається, зросли. Провівши проміння з початку координат, відповідні зменшенню збільшенню параметра на 10, 20, 30, 50 %, можна шляхом підрахунку крапок між прямими з'ясувати частоту значень параметра в інтервалах 0.: %, 10.20 % і т.д.

Результат процесу залежить від численних чинників, між якими існують відносини типу причина – слідство (результат). Діаграма причин і слідств – це засіб, що дозволяє виразити ці відносини в простій і доступній формі. Діаграма Ісікави була включена в японський промисловий стандарт (JIS) в області контролю якості і визначається в ньому таким чином: діаграма причин і результатів – діаграма, яка показує відношення між показником якості і впливаючими на нього чинниками [4]. Причинно-наслідкова діаграма – це інструмент, що дозволяє виявити найістотніші чинники (причини), що впливають на кінцевий результат (слідство). Якщо в результаті процесу якість виявилася незадовільною, значить, в системі причин, тобто в якійсь точці процесу, відбулося відхилення від заданих умов.

Показник ефективності в загальному вигляді визначає узагальнену оцінку бюджетних коштів, спрямованих на виконання програмних заходів з метою досягнення встановлених проміжних або кінцевих цілей протягом звітного періоду.

Ступінь відповідності показника встановленим закладом нормам визначається за наступним коефіцієнтом:

$$D = \frac{q_k - Q}{Q_k - Q_{\Sigma}}$$

де  $k$  – код показника;  $q_k$  – максимально можлива сумарна оцінка відповідності показника встановленим вимогам в балах;  $Q$  – сумарна оцінка по кожному показнику в балах;  $Q_k$  – сума максимально можливих оцінок за всіма показниками;  $Q_\Sigma$  – сумарна фактична оцінка всіх показників.

Оцінка в балах здійснюється наступним чином: 0 – не відповідає встановленим вимогам; 1 – відповідає частково та потребує поліпшення; 2 – відповідає встановленим вимогам.

Відносний коефіцієнт результативності та його відповідність встановлення вимогам обчислюється за формулою:

$$Q_b = \frac{Q_\Sigma}{Q_k} \cdot 100 \%$$

Інформація про показники якості для побудови діаграми збирається з всіх доступних джерел; використовуються журнал реєстрації даних поточного контролю, повідомлення персоналу. При побудові діаграми вибираються найважливіші чинники, для чого широко використовується експертна оцінка. Дуже важливо прослідити кореляційну залежність між причинними чинниками і показниками якості, тільки у цьому випадку параметри легко піддаються кореляції. При цьому чинники слід розділити на випадкові і систематичні, звернувши особливу увагу на можливість виявлення і подальшого усунення в першу чергу причини систематичних недоліків. Важливо пам'ятати, що показники якості, що є слідством процесу, обов'язково випробовують розкид. Пошук чинників, що роблять особливо великий вплив на розкид показників якості (тобто на результат), називають дослідженням причин. Схема є графічним впорядкуванням чинників, що впливають на об'єкт аналізу. Головним достоїнством схеми Ісікави є те, що вона дає наочне уявлення не тільки про ті чинники, які впливають на об'єкт, що вивчається, але і про причинно-наслідкові зв'язки цих чинників. Побудову починають з того, що до центральної горизонтальної стрілки, що зображає об'єкт аналізу, підводять великі первинні стрілки, що позначають головні чинники (групи чинників), що впливають на об'єкт аналізу. Далі до кожної первинної стрілки підводять стрілки другого порядку, до яких у свою чергу підводять стрілки третього порядку і т.д. до тих пір, поки на діаграму не будуть нанесені всі стрілки, що позначають чинники, що роблять помітний вплив на об'єкт аналізу в конкретній ситуації. Кожна із стрілок, нанесених на схему, є, залежно від її положення, або причина, або слідство: попередня стрілка по відношенню до подальшої завжди виступає як причина, а подальша – як наслідок. Нахил і розмір не мають принципового значення. Головне при побудові схеми полягає в тому, щоб забезпечити правильну соподчиненність і взаємозалежність чинників, а також чітко оформити схему, щоб вона добре виглядала і

легко читалася. Тому, не залежно від нахилу стрілки кожного чинника, його найменування завжди розташовують в горизонтальному положенні, паралельно центральній осі.

### **Висновки**

Сучасні підходи до управління якістю освітніх проектів припускають упровадження системи контролю показників якості продукту на всіх етапах його життєвого циклу, тому в ході контролю проводиться постійний аналіз заданих відхилень параметрів якості від встановлених вимог. В тому випадку, якщо параметри освітнього продукту не відповідають заданим показникам якості, система контролю якості допоможе оперативно виявити найвірогідніші причини невідповідності і усунути їх. Суцільний контроль, як правило, є досить трудомістким і дорогим, тому звичайно застосовують так званий вибіркового контроль, піддаючи перевірці лише частину (вибірку).

### **Список літератури**

1. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. – М. : Статистика, 1978. – 221 с.
2. Николаева Э. К. Семь инструментов качества в японской экономике. – М. : Изд. Стандартов, 2004. – 39 с.
3. Томашевський О. В. Комп'ютерні технології статистичної обробки даних / О. В. Томашевський, В. П. Рисіков // Навчальний посібник. Запоріжжя : Запорізький національний технічний університет, 2006. – 175 с.
4. Статистические методы повышения качества / Под.ред. Хитоси Кумэ. – М. : Финансы и статистика, 2005. – 412 с.

# ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ОСВІТИ В РАМКАХ СТРАТЕГІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

*Радченко Ю.М.<sup>1</sup>, Радченко Т.Д.<sup>2</sup>*

*1 – Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна*

*2 – Національний еколого-натуралістичний центр учнівської молоді,  
м. Київ, Україна*

## **Анотація**

Розглянуто історію питання щодо формування нового способу життя людства в рамках стратегії сталого розвитку суспільства. Наведено відомості про пропагування та впровадження в систему підготовки фахівців питань екологізації освіти.

Ключові слова: спосіб життя, сталий розвиток, екологізація освіти.

Практично будь-яка з гострих проблем сьогодення що стосується усіх без винятку життєвих інтересів людини, так чи інакше пов'язана зі станом довкілля. Водночас, який би вид чи галузь соціально-економічної або науково-технічної діяльності людини ми не розглядали, часто можемо помітити їх виразну антиекологічну спрямованість. Антропогенне навантаження на природу веде до деградації та поступового виснаження біосфери, що загрожує існуванню людині на Землі. Паралельно в світі наростають такі проблеми як дефіцит ресурсів, зростаюча нерівність між багатими та бідними. Більшість науковців погоджуються з тим, що глобальна екологічна криза вже набула системного характеру [1].

Стає все більш очевидним, що науково-технічний прогрес, нові технології самі по собі не спроможні подолати загрозу екологічної катастрофи, яка нависла над людством. Потрібна нова філософія, нова політика, нові моральні імперативи – зобов'язання кожної людини і людства в цілому. Загалом йдеться про систему цінностей, котра б не залежала від економічних сплесків чи занепадів, змін політичної влади тощо, у якій захист і збереження природи і самої людини вважались би такою ж святістю, як і саме життя. Нагальною потребою XXI століття є формування такого способу життя, який може стати основою довготривалого розвитку людства. Єдиний спосіб забезпечити процвітаюче та безпечне майбутнє на планеті Земля – це комплексне та узгоджене вирішення проблем соціально-економічного розвитку та збереження природного середовища.

Усвідомлення цього спонукає народи та їх лідерів до пошуку принципово нових підходів до питань соціально-економічного розвитку і природокористування, що призвело до постановки на порядок денний світового співтовариства питання про перехід людства на шлях «сталого, або всебічно збалансованого розвитку».

Міжнародне прийняте визначення «сталий розвиток» (СР) означає такий «розвиток, що задовольняє потреби сучасності, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти їх потреби». В такому вигляді воно було сформульовано в Доповіді «Наше спільне майбутнє» Світової Комісії з Навколишнього Середовища та Розвитку Організації Об'єднаних Націй (1986), яку очолювала тодішній прем'єр-міністр Норвегії Гру Харлем Брутланд.

На Другій конференції ООН з навколишнього середовища (Ріо-де-Жанейро, 1992 р.) були сформульовані основні положення стратегії сталого розвитку:

- забезпечення природно-екологічної сталості на основі біотичної регуляції навколишнього середовища;
- забезпечення економічного розвитку на основі радикально модифікованої ринкової системи;
- забезпечення стійкого соціального розвитку на основі принципу справедливості;
- екологізація суспільної свідомості на основі використання систем освіти і засобів масової інформації;
- забезпечення тісного міжнародного співробітництва для досягнення цілей сталого розвитку.

З точки зору людства, у центрі сталого розвитку має бути людина та її потреби. Серед них найголовнішими є: можливість прожити довге життя, підтримуючи добрий стан здоров'я; можливість здобути освіту; можливість доступу до засобів існування, що забезпечують гідний життєвий рівень.

Отже, однією з засадничих умов сталого розвитку є наявність доступної для всіх, адекватно фінансованої і ефективної системи освіти на всіх рівнях.

Світова стратегія сталого розвитку в галузі освіти формулюється таким чином [2]:

- освіта для забезпечення сталого розвитку здійснюється протягом всього життя людини та є невід'ємною частиною процесу загальної освіти;
- вона не повинна обмежуватися системою формальної освіти;
- у межах формальної освіти на всіх рівнях бажано поступово досягти міждисциплінарності;
- слід виховувати свідомих членів суспільства на розумінні взаємозв'язку та взаємозалежності людини і природи, усвідомленні ними необхідності збереження глобальної рівноваги та причетності кожного до проблем навколишнього середовища;
- забезпечити поширення знань, умінь, навичок для прийняття рішень.

Міжнародне співтовариство наполегливо закликає до переорієнтації усіх галузей освіти на цілі сталого розвитку. У різних країнах впроваджуються й успішно працюють освітні програми для дітей і дорослих з цієї проблеми. Зокрема, у Швеції, США, наших сусідів – Польщі, Росії, Білорусії тощо.

Починаючи з 2015 року в Національному еколого-натуралістичному центрі учнівської молоді за сприяння Національної екологічної Ради України проводиться Всеукраїнський екологічний форум «Освіта для сталого (збалансованого) розвитку». Метою даного заходу – формування бачення подальшого розвитку екологічної освіти в освіту сталого розвитку, підвищення рівня відповідальності та зацікавленості у міжгалузевому співробітництві, розроблення рекомендацій для комплексного розв'язання муніципальних і регіональних проблем у сфері екологічної освіти і виховання, сприяння співпраці навчальних, наукових, громадських організацій, органів державної влади, місцевого самоврядування, налагодження та зміцнення міжнародного співробітництва у збереженні довкілля, впровадження засад збалансованого розвитку в Україні.

На останньому III Форумі (2017) відбулося обговорення проекту документу «Стратегія сталого розвитку України на період до 2030 року» та завдань освіти щодо її реалізації.

Зокрема, на дискусійному майданчику з питання «Кращі практики освіти для збалансованого розвитку у вищій та післядипломній освіті» було запропоновано:

- забезпечити неперервну екологізацію освіти;
- зобов'язати ВНЗ готувати спеціалістів-екологів різної фахової спеціалізації;
- забезпечити екологізацію загальноосвітніх дисциплін та дисциплін фахового спрямування та навчальних програм;
- запровадити на державному рівні конкурс екологічних проєктів щодо збору та утилізації відходів;
- сприяти впровадженню кращого зарубіжного досвіду зі збору та переробки відходів;
- забезпечити державну підтримку технологій безвідходного виробництва;
- запровадити практики проведення екологічних тренінгів для вчителів та науково-педагогічних працівників.

В Національній металургійній академії України (НМетАУ) починаючи з 2016 року до програм підготовки магістрів усіх спеціальностей введено дисципліну «Сталий розвиток промисловості». Одним із завдань цього курсу є усвідомлення студентами того, що технологічну основу для сталого розвитку металургійної промисловості мають забезпечити системні інновації, спрямовані насамперед на скорочення

споживання вуглецевих матеріалів у якості відновників та палива. Неможливо досягти екологічних завдань, що стоять перед людством в контексті запобігання глобальній зміні клімату, спираючись лише на існуючі технології [3]. Знайомство з типологією еко-інноваційних підходів до вирішення екологічних проблем у промисловості формує у майбутніх фахівців здатність до вирішення проблем сталого розвитку металургії.

З метою підготовки спеціалістів-екологів різної фахової спеціалізації в НМетАУ на базі кафедри екології, теплотехніки та охорони праці (ЕТОП) відкрито нову спеціальність – «технології захисту навколишнього середовища», що певною мірою відповідає рекомендаціям Всеукраїнського екологічного форуму «Освіта для сталого (збалансованого) розвитку».

### **Висновки**

1. Екологізація освіти є запорукою збереження довкілля для нинішніх та прийдешніх поколінь.
2. Необхідною умовою впровадження засад збалансованого розвитку в Україні є переорієнтація усіх галузей освіти на цілі сталого розвитку.
3. Підготовка спеціалістів-екологів різного профілю сприятиме вирішенню проблем розвитку суспільства на засадах сталого розвитку, а також модернізації провідних галузей промисловості України.

### **Список літератури**

1. Сталий розвиток суспільства: навчальний посібник / А. Садовенко, Л. Масловська, В. Серєда, Т. Тимочко. – Київ, 2011. – 392 с.
2. Україна в контексті «Порядку денного на ХХІ століття» / Упорядкував. : В.І. Вовк та інші. – К. : Нора-Прінт, 1998. – 80 с.
3. Шатоха В.І. Сталий розвиток чорної металургії : Монографія. Дніпропетровськ : Дріант, 2015. – 184 с.

# **ОПЫТ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ. ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Фриман И.М., Фриман Е.М.*

*Национальная Металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина*

## **Аннотация**

Исследование опыта, проблем и перспективы инженерного образования, связанных с экологизацией высшего образования является актуальной задачей современного общества. В работе рассмотрены причины несоответствия образовательной системы современным особенностям инженерного труда, требования перед высшей технической школой по совершенствованию инженерного образования с учетом современных экономических условий хозяйствования предприятий.

Ключевые слова: инженерные школы, технические университеты, вспучивание, устойчивое развитие, экологизация, экологизация высшего образования.

## **Вступление**

Инженерное образование сегодня переживает не лучшие времена. За последние двадцать лет упали его престиж и популярность технических университетов среди абитуриентов. Большую, но не единственную, роль здесь сыграли экономические и социальные факторы, связанные с отделением Украины от Советского Союза и необходимостью формирования новых, национальных структур общественной и производственной сферы. Снижение качества инженерного образования связано также с соответствующей динамикой среднего образования, объективной инерционностью педагогической системы как таковой, которая не успевает дать адекватный ответ на изменившиеся условия среды формирования и профессиональной деятельности личности. О несоответствии образовательной системы современным особенностям инженерного труда говорит также недостаточный уровень компьютерного и программного обеспечения процесса обучения на фоне бурного развития методов компьютерного и математического моделирования инженерных проблем. Противоречивость этой ситуации состоит в том, что инженер – ключевая фигура современной мировой экономики. Не только постсоветская Украина и государства бывшего СССР ощущают дефицит инженерных кадров, необходимость развития инженерного образования отмечается во всем мире.

## Постановка задачи

Недостаточная школьная подготовка является одной из главных причин низкой успеваемости студентов в технических вузах, а в особенности на тех специальностях, где основой профессионального образования является математика. Важнейший вопрос успешного развития промышленной отрасли государства - качество инженерного образования. С высокой степенью уверенности можно утверждать, что инженерное образование в Украине является одним из лучших в мире, а ведущие технические вузы страны не уступают лучшим технологическим школам мира.

Интерес к нашим инженерным школам, объясняется прежде всего тем, что выпускники украинских высших технических учебных заведений всегда отличались широтой профессиональных познаний в сочетании с прочностью их фундаментальной подготовки.

Наряду с глубокой фундаментальной подготовкой основополагающим принципом в технических вузах является «обучение на основе науки». Это означает, что преподаватели и студенты профилирующих кафедр обязаны вести научные исследования, чтобы быть подготовленными на самом высоком и современном уровне в области своих профессиональных знаний.

Эти два принципа – глубокая фундаментальная подготовка и обучение на основе последних достижений науки – во многом объясняют то признание и высокий авторитет, которым пользуется украинское инженерное образование в мире.

Новые экономические условия и реалии настоящего времени ставят перед высшей технической школой ряд новых задач по совершенствованию инженерного образования. Наряду с традиционно высокой фундаментальной подготовкой, соблюдением принципа «образование на основе науки», связью с промышленностью, методической продуманностью учебного процесса надо отметить и такие проблемы, как слабое практическое знание выпускниками инженерных вузов иностранных языков, недостаточное использование современных информационных технологий и особенно – недостатки в экономической, менеджерской подготовке выпускников.

Сейчас технические университеты ведут работу по существенному изменению соответствующих учебных программ и курсов. Очень важно, чтобы каждый выпускник инженерного вуза владел бы вопросами управления и менеджмента.

Существует много кадровых проблем. К ним следует отнести нехватку специалистов на предприятиях и в научных организациях высокотехнологического комплекса, достаточно низкая мотивированность молодежи, а особенно выпускников технических высших учебных заведений работать в Украине.

## Основная часть исследования

В последние годы во взаимоотношениях человечества с природой намечился новый этап. Отличительной чертой нынешнего этапа можно назвать переход от констатации фактов к действию, к выработке модели устойчивого социального и экологического развития [1, 2].

В настоящее время относительно понятия «устойчивое развитие» имеется два различных взгляда. Концепция устойчивого развития появилась в результате объединения двух основных точек зрения: экономической и экологической. В первом случае доминируют экономические аспекты, а во втором – экологические.

### *Экономическая составляющая.*

Экономический подход к концепции устойчивости развития основан на теории максимального потока совокупного дохода Хикса-Линдаля, который может быть произведен при условии, по крайней мере, сохранения совокупного капитала, с помощью которого и производится этот доход. Эта концепция подразумевает оптимальное использование ограниченных ресурсов и использование экологических, природо-, энерго-, и материало-сберегающих технологий, включая добычу и переработку сырья, создание экологически приемлемой продукции, минимизацию, переработку и уничтожение отходов.

### *Экологическая составляющая.*

С экологической точки зрения, устойчивое развитие должно обеспечивать целостность биологических и физических природных систем. Особое значение имеет жизнеспособность экосистем, от которых зависит глобальная стабильность всей биосферы. Более того, понятие «природных» систем и ареалов можно понимать широко, включая в них созданную человеком среду, такую как, например, города. Основное внимание уделяется сохранению способностей к самовосстановлению и динамической адаптации таких систем к изменениям, а не сохранение их в некотором «идеальном» статическом состоянии.

Именно знания, как результат полученного образования должны стать движущей силой по направлению к устойчивому развитию общества. При этом требуется беспрецедентный уровень организации таких знаний, поскольку предстоит решение проблем не только на местном и региональном уровне, но и в государственном масштабе.

При этом термин «образование» отражает концепцию непрерывного образования в течение всей жизни, а понятие «устойчивое будущее» определяет общие концептуальные рамки новаторской, ориентированной на будущее деятельности.

Перспективы развития общества во многом обусловлены процессом экологизации всех форм жизнедеятельности.

Экологизация захватывает в настоящее время все сферы науки и деятельности человека, создавая представление о том, что центр внимания экологии как науки – человеческое общество. Следует, однако,

четко отличать экологию как область фундаментальных исследований, изучающую в свойственном ей ключе все формы жизни и те прикладные, грандиозные по масштабам практические задачи, которые вытекают из экологических законов применительно к деятельности человека. Экологизация есть, по сути, проникновение идей экологии в разные сферы жизни общества [3].

В общем плане под экологизацией следует понимать учет возможных последствий воздействия человека на природную среду с целью свести к минимуму отрицательные результаты природо- преобразовательной деятельности [4].

Объективная оценка процесса экологизации и его наглядное выражение выступают важнейшей основой для построения системы экологического воспитания и образования. Материальное производство, прежде всего промышленность, выступает в качестве заказчика в подготовке соответствующих кадров. Поэтому тенденции, проявляющиеся в экологизации материального производства, оказывают значительное влияние на формирование обучающих программ в реальном времени и в системе деятельностно-ориентированных целей и принципов.

Задача экологизации высшего образования состоит в формировании нового человека, который осознает себя в неразрывной связи с природой, в формировании специалиста, который будет создавать новые технологии и технику, обеспечивающие реализацию концепции устойчивого развития общества. Экологизация образования должна ставить своей целью не только, и даже не столько осознание необходимости охраны природы, сколько выработку мышления, обеспечивающего переход к неразрушительному природопользованию. Экологизация должна войти составной частью в идеологию общества XXI века. Именно экологизация образования способна обеспечить разрешение глобального экологического кризиса.

### **Выводы**

Экологизация высшего образования с целью подготовки специалистов для устойчивого развития промышленности должна осуществляться через ряд основных механизмов государственной политики:

- формирование у всех слоев населения, прежде всего у студенческой молодежи, экологически ответственного мировоззрения;
- включение вопросов охраны окружающей среды в новые образовательные стандарты;
- обеспечение направленности процесса воспитания и обучения в образовательных учреждениях на формирование экологически ответственного поведения,

– государственная поддержка деятельности образовательных учреждений, осуществляющих обучение в области охраны окружающей среды;

– развитие системы подготовки и повышения квалификации в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности руководителей организаций и специалистов, ответственных за принятие решений при осуществлении экономической, производственной, а также управленческой деятельности, которая оказывает или может оказать негативное воздействие на окружающую среду.

#### **Список литературы**

1. Грищенко Я. И., Книжникова О. А. Особенности организации и проведения обучения работников предприятий в области охраны окружающей среды и экологической безопасности // Экологический вестник Казахстана. – 2015. – № 7. – С. 62–67;

2. Иткин Б. А. Сертификация систем экологического менеджмента и качество окружающей среды // Экология производства. – 2015. – № 6. – С. 32–41;

3. Морозов В. Н. Мировая экологическая политика и международное экологическое сотрудничество. – Издательско-полиграфический центр Карагандинского государственного технического университета, 2013.

4. Юдин А. Г. Китайский проект // Экология и жизнь. – 2012. – № 1. – С. 31–33.

# ІНТЕРАКТИВНЕ НАВЧАННЯ ПИТАННЯМ ЕКОЛОГІЇ НА ОСНОВІ ВЕБ -КВЕСТУ

*Хлестова О.А.*

*Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний  
технічний університет», м. Маріуполь, Україна*

## **Анотація**

Соціально-активна молодь та громадські організації постійно закликають суспільство до рішення екологічних проблем та покращення умов життя. Нажаль зараз відсутнє єдине джерело з актуальною та цікавою інформацією щодо ролі та впливу антропогенного фактору на погіршення якості довкілля, масштабів та наслідків змін клімату. В роботі розглянуто використання інноваційної технології навчання у вигляді веб-квесту, шляхом створення інформаційного простору щодо рішення проблем, пов'язаних з питаннями екології, протидії змінам клімату.

Проведення веб-квесту, як освітнього заходу для учнівської молоді та широкої громадськості дозволяє підвищити загальну обізнаність населення, обрати для подальшої реалізації заходи з захисту навколишнього середовища та формування найбільш сприятливих та комфортних умов проживання, адаптації до змін клімату від наслідків антропогенної діяльності.

Ключові слова: веб-квест, зміни клімату, освітній простір, інтернет-ресурси.

## **Вступ**

25 вересня держави – члени ООН прийняли Порядок денний в галузі сталого розвитку до 2030 року. Він містить низку цілей, спрямованих на якісну освіту, сталі міста та населені пункти, боротьбу зі змінами клімату. Для досягнення цілей в галузі сталого розвитку необхідні спільні зусилля уряду, приватного сектору, громадянської спільноти, ініціативних громадян. Нові технології і рішення змінюють вигляд сучасних міст. Зокрема, ІТ-розробки в сфері управління міським господарством дозволяють створити умови для ресурсозбереження та комфорту городян.

Сучасні зміни клімату відбуваються під впливом теплового забруднення атмосфери, насиченням повітря частками пилових викидів. Крім того, так званий «тепловий острів» від нагрітої поверхні простягається високо вгору, порушує природний рух атмосферних мас та сприяє передчасному випадінню опадів переважно з одного боку промислових зон регіону, а з іншого утворюється суха «дошова тінь».

Молодь, що належить до найбільш ініціативних громадян, зацікавлена в покращенні умов життя, але, як правило не має досвіду та знань з питань засобів та шляхів перетворення на найкраще свого довкілля. Зробити це можна за рахунок знань з ландшафтного та архітектурного дизайну, основ пермакультури.

Базою для успішного розвитку молоді є зацікавленість в прикладній реалізації отриманих в навчальних закладах спеціалізованих знань з інформаційних технологій, екологічної освіти.

### **Постановка задачі**

Геолого-географічні особливості розташування Приазов'я сформували в регіоні специфічні кліматичні умови, зумовлені впливом Азовського моря та рози вітрів з переважаючим північно-східним напрямом. Під впливом промисловості та урбаністичних процесів над сучасними промисловими містами формується «тепловий острів», який змінює «розклад погоди» [1]. Отримання інформації, щодо ролі стану поверхні місцевості в утворенні «теплових островів», що посилюють теплове навантаження на здоров'я людей (особливо в місцях з високою вологістю), призводять до зсуву сезонів (весна приходить раніше, зимовий холод проникає пізніше порівняно з сусідніми районами) дозволяє краще оцінити наслідки змін клімату.

Не завжди населення може впливати на кількість та якість викидів, але протидіяти наслідкам теплового та фізичного забруднення можливо шляхом зниження поглинаючої властивості поверхні певних зон, використовуючи можливості ландшафтного дизайну та пермакультури в житлових районах та в межах джерел забруднення, адаптуючи міські та промислові інфраструктури до змін клімату. Для цього потрібно озвучити проблеми, донести їх до населення й запропонувати шляхи вирішення за рахунок сучасних освітніх інтернет-технологій.

В класичному розумінні веб-квест – це проблемне завдання, для виконання якого використовуються інтернет-ресурси [2]. Технологія веб-квесту (web-quest) дозволяє організувати проект з самостійного пошуку користувачем необхідної інформації. До цільової аудиторії веб-квесту входять: студентська та учнівська молодь, активна в соціальних мережах, яка володіє навичками розробки іт-проектів та зацікавлена в поліпшенні умов життя, протидії змінам клімату та антропогенному навантаженню на довкілля; представники житлово-комунального господарства (ЖКГ) та об'єднання співвласників багатопверхових будинків (ОСББ); власники приватних будинків; рекламодавці. Долучити цільову аудиторію до участі в веб-квесті можливо як в межах освітньо-навчального процесу, так й за рахунок загальнономіських програм розвитку, або за умови участі в загальнодержавних та регіональних проектах, грантах.

### **Основна частина досліджень**

Організація та проведення веб-квесту передбачає наступні етапи:

1. Підбір команди веб-квесту (викладачів та фахівців) з питань зміни клімату, ландшафтного дизайну, пермакультури.

2. Розробка веб-порталу для здійснення освітньо-проектної діяльності із залученням молоді, яка володіє іт-технологіями з посиленням на інтернет-ресурси

3. Підбір інформації з ландшафтного та архітектурного дизайну, основ пермакультури, підготовка відео матеріалів та відео-конференцій.

3. Ознайомлення представників цільової аудиторії (цільових груп) з існуючими проблемами щодо змін клімату (ролі «теплових островів», «дощової тіні», визначення альbedo поверхні певних зон) та напрямками протидії небажаним змінам в сучасних умовах господарювання.

4. Розробка (за необхідністю) допоміжного додатку- конструктора для візуалізації проекту прибудинкової території

5. Аналіз стану територій, представлених цільовими групами.

6. Індивідуальна або групова робота учасників цільових груп (з розподілом ролей та задач) за рішенням заданої проблеми з використанням інтернет-ресурсів, підготовлених командою веб-квесту

7. Залучення рекламодавців.

В ході веб-квесту робоча група отримує готові рекомендації щодо рішень зі зменшення теплового навантаження на локальні території, покращення кліматичних умов з урахуванням територіальних властивостей, впровадження інноваційних рішень та міжнародного досвіду.

Освітня діяльність при роботі над веб-квестом передбачає можливість проведення тренінгів, досліджень щодо наявності різних кліматичних факторів та чинників, що на них впливають, знайомство з зарубіжним досвідом зі зниження теплового навантаження промислових та урбаністичних територій, зменшення поглинаючої здібності поверхонь найбільш проблемних зон, використання для цих цілей надрбань з ландшафтного дизайну.

Технологія веб-квесту, використовуючи інформаційні ресурси Інтернет і інтегруючи їх в освітній процес, допомагає ефективно вирішувати цілий ряд практичних та соціальних задач, а саме:

- усвідомленого сприйняття навколишнього середовища, формування дбайливого ставлення до природи, розумного використання її багатств, природних ресурсів;

- сприяння розвитку самонавчання та самоорганізації соціально-активних шарів населення, учнівських груп, серед яких поширює активне використання інтернет-комп'ютерних технологій для вирішення теоретичних та прикладних завдань;

- дозволяє отримати декілька варіантів рішень поставленої задачі, визначити найбільш раціональну, обґрунтувати свій вибір.

Результати виконання веб-квесту, залежно від цільової аудиторії можуть бути представлені у вигляді усного виступу, комп'ютерної презентації, буклетів, макетів вдосконалених територій тощо.

## Висновки

Технологія веб-квесту, спираючись на інтернет-ресурси та досвід фахівців з визначеної тематики, дозволяє організувати освітньо-інформаційний простір для рішення актуальних задач з питань екології, протидії змінам клімату.

Участь активної молоді та зацікавлених громадян, представників ЖКГ, ОСББ в освітньому заході дозволить об'єднати зусилля громади, соціально-активних шарів населення так кваліфікованих спеціалістів (екологів, педагогів) для підвищення загальної обізнаності громадян, рішення суспільних проблем, дозволить їм отримати знання з питань ландшафтного та архітектурного дизайну та пермакультури, познайомитися з найкращими досягненнями, передовими технологіями та досвідом фахівців, що сприятиме покращенню прибудинкових територій та міської інфраструктури в цілому.

## Список літератури

1. Ложко А. Н. Моделирование эффекта «дождевая тень» в промышленной зоне индустриального объекта // А. Н. Ложко, О. А. Хлестова // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. пр. – Маріуполь, 2011. – Вип. № 22. – С. 272–277.

2. Веб-квест как средство развития навыков информационной деятельности на уроках технологии // Молодежный научный форум : Гуманитарные науки : электр. сб. ст. по материалам XI студ. междунар. заочной науч.-практ. конф. – М. : «МЦНО». – 2014. – № 4 (11) / [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – URL: [https://nauchforum.ru/archive/MNF\\_humanities/4\(11\)/pdf](https://nauchforum.ru/archive/MNF_humanities/4(11)/pdf)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Раздел 4. Процессы сжигания топлива и топливо-сжигающие устройства.</b> . . . . .	3
<i>Matysiak H., Łukasiak K., Radomiak H.</i> Badanie stabilności płomienia dyfuzyjnego przy różnej zawartości tlenu w utleniaczu. . . . .	4
<i>Musiał D., Radomiak H., Zajemska M.</i> Wybrane aspekty bezpieczeństwa podczas eksploatacji pieców grzewczych. . . . .	9
<i>Zajemska M., Radomiak H., Kamkina L.V., Yeromin O.O., Musiał D., Rajca P.</i> Wykorzystanie techniki obliczeniowej do prognozowania stężenia tlenków azotu w komorach grzewczych. . . . .	14
<i>Зинченко В.Ю., Иванов В.И., Чепрасов А.И., Каюков Ю.Н.</i> Особенности стадийного сжигания топлива в пламенных печах камерного типа. . . . .	21
<i>Орловская С.Г., Калинин В.В., Зуй О.Н., Лисянская М.В.</i> Исследование закономерностей сжигания угольного топлива в дисперсном виде. . . . .	26
<i>Сезоненко А.Б., Васечко А.А.</i> Опыт использования регенеративных горелок на промышленных печах переработки лома и отходов цветных металлов. . . . .	31
<i>Сорока Б.С., Воробьев Н.В., Sandor P., Воробьев А.В., Карабчиевская Р.С.</i> Влияние влажного горючего на энергоэкологические характеристики сжигания технологических топлив. . . . .	36
<i>Чепрасов А.И., Каюков Ю.Н., Башлий С.В.</i> Разработка и использование горелок частичного предварительного смешения в нагревательных и термических печах. . . . .	41
<i>Черненко А.С., Калинин В.В., Войцех Новак, Куземко Р.Д.</i> Аналитическое исследование влияния диаметра и реакционной способности частиц угольной пыли на кинетику устойчивого горения . . . . .	46
<i>Швачич С.В., Булычёв В.В.</i> Исследование процесса горения продуваемого слоя при различных условиях теплообмена. . . . .	52
<b>Раздел 5. Эффективное использование энергии и ресурсов в металлургии.</b> . . . . .	56
<i>M. Bernasowski, A. Klimczyk, R. Stachura.</i> Prospective view on reducing of coke consumption in the process of zinc and lead simultaneous production in imperial smelting furnace. . . . .	57
<i>Boryca J., Wyleciał T., Urbaniak D.</i> Weryfikacja krzywych nagrzewania do badań eksperymentalnych wpływu technologii nagrzewania na przyczepność zgorzeliny. . . . .	62
<i>Борыца Я., Вылецял Т., Гупало Е.В., Ерёмкина О.Л.</i> Оценка тепловой работы электрической камерной печи. . . . .	70

<i>Бровкин В.Л., Лазич Л., Варга А., Кизек Я., Ковтун А.О.</i> Тепловая работа нагревательной печи с шагающим подом на смеси природного и доменного газа. . . . .	75
<i>Гупало Е.В., Здоровиченко С.А., Седнев А.Ю., Гупало В.И.</i> Использование пылеугольного топлива для обжига известняка во вращающихся печах. . . . .	79
<i>Каракаш Є.О., Дереза С.А.</i> Основні напрямки використання вторинних енергетичних ресурсів у доменному виробництві і застосування теплових насосів для утилізації фізичної теплоти колошникового газу. . . . .	85
<i>Колодяжний В.С., Губинский М.В., Слепко С.А.</i> Тепловые потери чугуновозного ковша. . . . .	90
<i>Кравцов С.В., Мешкова А.Г., Сулименко С.Е., Саввин А.В.</i> Исследования процессов обогащения железосодержащих отходов методами магнитной сепарации. . . . .	95
<i>Мных А.С.</i> Повышение энергоэффективности процесса измельчения твердого топлива в четырехвалковой дробилке. . . . .	100
<i>Назаренко О.М., Мельник О.В., Назаренко І.А.</i> Про особливості сушіння пористих тіл. . . . .	105
<i>Педченко Е.А., Медовар Л.Б.</i> Электрошлаковый переплав для утилизации валков холодной прокатки и роликов машин непрерывного литья заготовок. . . . .	109
<i>Пилипенко Р.А., Пилипенко А.В.</i> Интенсификация процессов сушки и разогрева металлургических ковшей. . . . .	112
<i>Сорока Б.С., Воробьев Н.В., Липницкий Л.В., Воробьев А.В.</i> Учет влажности атмосферного воздуха при определении экономии природного газа в печах в условиях рекуперативного подогрева окислителя. . . . .	119
<i>Шемет Т.Н., Пульпинский В.Б., Ложко А.Н., Шемет В.Ю.</i> Влияние количества зон регулирования температуры на технико-экономические показатели работы печи методического типа. .	124
<b>Раздел 6. Экологические проблемы металлургии и энергетики. Технологии защиты окружающей среды. . . .</b>	128
<i>Балакин В.Ф., Машинистов В.Е.</i> Эффективная технология рециклинга радиационно загрязненного металла. . . . .	129
<i>Белоконь К.В., Проскурнин О.А., Кирпичева И.В., Белоконь Ю.А.</i> Определение оптимального состава интерметаллидного катализатора для окисления оксида углерода и углеводородов с использованием непараметрических статистических методов. . .	134
<i>Гаращенко А.В., Гаращенко В.И., Лукьянчук А.П.</i> Энергоэффективная технология магнитной очистки водных сред от ферромагнитных примесей. . . . .	139
<i>Іванов І.І., Бабенко Л.В., Саввін О.В.</i> Радонова небезпека на Дніпропетровщині. . . . .	144

<i>Коломієць О.В., Буличов В.В.</i> Вибір оптимальної температури піролізу зношених шин. . . . .	149
<i>Мешикова А.Г., Матухно О.В., Кравцов С.В., Сухарева М.В.</i> Дослідження схильності води, що циркулює в циклах водопостачання, до утворення відкладень та корозії в умовах ВАТ МЗ «Дніпросталь» . . . . .	154
<i>Назаренко А.Н., Вольвач И.В., Назаренко И.А.</i> Эволюция парниковых газов при трансформации углекислотного равновесия. . . . .	159
<i>Полищук С.З., Дядькина А.И., Левченко О.А., Михальченко А.А., Троценко А.В.</i> Экологические аспекты утилизации теплоты и промышленных выбросов. . . . .	163
<i>Романенко М.О., Ємець М.А., Романенко І.І.</i> Екологічна оцінка теплопостачання та інших інженерних систем життєзабезпечення промислових об'єктів. . . . .	169
<i>Саввін О.В., Іванов І.І., Бабенко Л.В., Мешикова А.Г., Кравцов С.В.</i> Утворення та утилізація шламів металургійного виробництва. . . . .	174
<i>Скрыпников В.Б., Ляховецкая-Токарева М.М., Завгородняя Е.П.</i> Повышение энергоэффективности и уменьшение теплового загрязнения окружающей среды за счет рациональной эксплуатации турбокомпрессорных установок. . . . .	178
<i>Третьяков О.В.</i> Організація оперативного контролю викидів в атмосферу забруднюючих речовин з джерел металургійних виробництв. . . . .	183
<i>Тякин О.К., Пигулевский П.И.</i> Пространственное прогнозирование опасного геоэкологического влияния горно-металлургических предприятий по геолого-геофизическим и тектоническим данным. . . . .	187
<i>Фриман И.М., Фриман Е.М.</i> Экологические проблемы металлургии и энергетики. Технологии защиты окружающей среды. . . . .	192
<i>Шишко Ю.В., Жмуренко В.Г., Сергеев В.В., Хансйорг Дитше.</i> Оцінка екологічної ефективності спільного використання біомаси та вугілля в котельних агрегатах. . . . .	196
<i>Шишко Ю.В., Усенко А.Ю., Китач Е.И.</i> Влияние параметров работы котельных агрегатов на выбросы токсичных веществ при совместном использовании угля и биомассы. . . . .	200
<i>Шмандій В.М., Харламова О.В., Ригас Т.Є., Знайко В.Ю.</i> Підвищення рівня екологічної безпеки при застосуванні нейтралізаторів на автомобілях застарілої конструкції. . . . .	206
<i>Шматков Г.Г.</i> Экологические аспекты индивидуальной и социальной ответственности. . . . .	208
<b>Раздел 7. Энергоэффективные технологии и оборудование обработки металлов давлением.</b> . . . . .	213
<i>Bajor T., Laber K., Duja H.</i> Określenie warunków odkształcalności stopów aluminium serii 7xxx. . . . .	214

<i>Kawalek A., Dyja H., Koczurkiewicz B., Magiera M., Laber K.</i> Analiza rozkładu naprężeń i odkształceń w asymetrycznej kotlinie walcowniczej. . . . .	218
<i>Балакин В.Ф., Байрымов А.А.</i> Методы производства длинномерных изделий с применением интенсивной пластической деформации. . . . .	225
<i>Балакин В.Ф., Генрук Дуя, Григоренко В.У., Мищенко А.В.</i> Развитие метода прогнозирования изменения поперечной разностенности при холодной прокатке труб из сплавов на основе титана. . . . .	231
<i>Ботштейн В.А., Каневский А.Л., Мантула В.Д., Минко А.Н., Костомаров А.С.</i> Эффективные технические решения по модернизации систем охлаждения валков и межклетьевого охлаждения полосы прокатного стана. . . . .	236
<i>Гоцуляк А.А., Малыгин М.С, Матыящчик К.</i> Энергоэффективные технологии прокатки толстых листов для ответственных металлоконструкций в условиях ISD HCZ. . . . .	240
<i>Григоренко В.У., Пилипенко С.В.</i> Исследование влияния диаметра валков и начального диаметра ведущих шестерен станов холодной пильгерной валковой прокатки на величину осевых усилий. . . . .	243
<i>Лазоркин А.В., Лазоркин Д.В.</i> Энергоэффективные технологии и оборудование для деформации слитков и заготовок в металлургии. . . . .	248
<i>Малыгин М.С, Матыящчик К.</i> Энергосберегающее оборудование и технология ускоренного охлаждения листового проката на стане ISD HCZ. . . . .	253
<i>Кулаковская А.В., Дья Х., Лабер К.</i> Влияние параметров деформации на тепловой эффект в сплаве алюминия 7075. . . . .	255
<b>Раздел 8. Энергоэффективный операционный менеджмент и инженерия производства.</b> . . . . .	259
<i>Альошина Т.В.</i> Реінжинірінг бізнес-процесів на промислових підприємствах України. . . . .	261
<i>Мироненко М.А., Алексеенко І.А., Воронко Т.М.</i> Енергоефективність як ключовий чинник переходу на концепцію ощадливого виробництва в умовах ПАТ «Полтаваобленерго» . . . . .	263
<i>Хлестова О. А.</i> Використання дотаційного ефекту при оцінюванні витрат ресурсів у технологіях. . . . .	268
<b>Раздел 9. Энергоэффективные материалы и технологии их получения.</b> . . . . .	271
<i>Волчок И.П., Митяев А.А., Фролов Р.А., Сахно А.С.</i> Энергоэффективная технология получения алюминиевых сплавов. . . . .	272
<i>Мазур В.Л., Мазур В.В.</i> Теплоизоляция и теплосбережение в	

металлургии и машиностроении: перспективы применения волоконных огнеупоров. . . . .	276
<i>Маслов В.А., Трофимова Л.А., Дан Л.А.</i> Получение магнитного термографенита из дисперсных железграфитовых отходов металлургического производства. . . . .	280
<i>Миронова Т.М., Семенова И.О., Давидюк А.В.</i> Дослідження впливу режимів нагріву СВЧ на структуру та твердість сортового прокату з дактильованого чавуну. . . . .	283
<i>Опрышко Л.В., Головняк Т.В.</i> Эксплуатационная надежность котельных труб при применении ресурсосберегающих технологий. . . . .	289
<i>Сенина Т.В., Паршаков В.И., Якушев А.Б.</i> Пароперегревательные трубы повышенной коррозионной стойкости в продуктах сжигания сернистого топлива. . . . .	294
<b>Раздел 10. Опыт, проблемы и перспективы инженерного образования. Экологизация высшего образования с целью подготовки специалистов для устойчивого развития промышленности. . . . .</b>	300
<i>Балакин В.Ф., Алпаев М.С., Білан К.С., Соловйова І.А., Николаєн- ко Ю.М.</i> Досвід та перспективи освіти інженерів – проектувальників металургійних підприємств. . . . .	301
<i>Дашковська О.В., Погребняк В.П., Солоденко А.К., Гонча- рова А.В.</i> Підготовка кваліфікованих кадрів для металургії: досвід, проблеми та перспективи. . . . .	306
<i>Єрьомін О.О., Матухно О.В., Гупало О.В., Єрьоміна О.Л.</i> Про заходи з екологізації вищої освіти в національній металургійній академії України з метою підготовки фахівців-металургів. . . . .	312
<i>Кармазіна Л.Л., Лазарева Є.Д., Кадильникова А.В.</i> Оцінювання якості освітніх проєктів на основі статистичних методів вибіркового контролю. . . . .	317
<i>Радченко Ю.М., Радченко Т.Д.</i> Екологізація освіти в рамках стратегії сталого розвитку. . . . .	322
<i>Фриман И.М., Фриман Е.М.</i> Опыт, проблемы и перспективы инженерного образования. Экологизация высшего образования с целью подготовки специалистов для устойчивого развития промышленности. . . . .	326
<i>Хлестова О.А.</i> Інтерактивне навчання питанням екології на основі веб-квесту. . . . .	331

Наукове видання

Міністерство освіти і науки України  
Національна металургійна академія України

**ТЕПЛОТЕХНІКА, ЕНЕРГЕТИКА  
ТА ЕКОЛОГІЯ В МЕТАЛУРГІЇ**

**Колективна монографія**

**У двох книгах**

**Під загальною редакцією д.т.н., проф. Ю.С. Пройдака**

**Книга друга**

Російською, українською, англійською та польською мовами

Технічний редактор О.В. Гупало

Здано на складання 01.09.2017 р.

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національної металургійної академії України  
(Протокол № 7 від 20.09.2017 р.)

Підписано до друку 20.09.2017 р. Формат 84x108/32

Папір офсетний. Умовн. друк. арк. 20,0.

Тираж 100 прим. Замов. №

Видавництво «Нова ідеологія»  
49044, м. Дніпро, вул. Гоголя, 15-а.  
Свідоцтво ДК № 191 від 20.09.2000 р.

ISBN 978-617-7068-43-2