

MOKRE GASZENIE KOKSU
W WIEŻACH Z WYPEŁNIENIEM KOMÓRKOWYM

JAN HEHLMANN¹, BERNARD MARCINKIEWICZ¹, JAN KAPAŁA²

¹ Katedra Aparatury Chemicznej i Procesowej, Politechnika Śląska, ul. M. Strzody 7, 44-100 Gliwice

² Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, ul. M. Skłodowskiej-Curie 34, 41-819 Zabrze

Keywords: Wet quenching of coke, cellular packing, fumes contraction, dust extraction and absorption of gases.

WET QUENCHING OF COKE
IN TOWERS PACKED WITH CELLULAR PACKING

This article presents a modified method of coke quenching with condensation and fumes contraction within the cellular packing which is accompanied by dust extraction and absorption of gases.

The article also shows the investigation results, which were obtained on the basis of original computing procedures. These procedures include thermodynamic, kinematic and process effects which have a substantial effect on the improvement of ecological conditions.

Streszczenie

W artykule przedstawiono zmodyfikowany sposób wieżowego gaszenia koksu ze skraplaniem i kontrakcją oparów w obrębie pakietu wypełnienia komórkowego, któremu towarzyszy odpylanie i absorpcja gazów.

Prezentowano wyniki badań uzyskane na podstawie oryginalnych procedur obliczeniowych uwzględniających efekty termodynamiczne, kinematyczne i procesowe, które w sposób istotny wpływają na poprawę warunków ekologicznych.

WPROWADZENIE

Spośród niezwykle uciążliwych dla środowiska człowieka źródeł emisji pyłowo-gazowych zanieczyszczeń powietrza w koksowni w pierwszej kolejności należy wymienić proces gaszenia koksu metodą moką. Z tego procesu emitowane są zanieczyszczenia stałe, ciekłe i gazowe. Z punktu widzenia powstawania zanieczyszczeń można wydzielić następujące grupy [14]:

– zanieczyszczenia pochodzące z koksu, w tym pył, substancje smołowe, benzo(α)piren,

- zanieczyszczenia pochodzące z rozkładu koksu pod wpływem powietrza i pary wodnej, w tym tlenek węgla, dwutlenek siarki i częściowo siarkowodór,
- zanieczyszczenia pochodzące z rozkładu i desorpcji substancji zawartych w wodzie używanej do chłodzenia koksu, w tym fenol, amoniak, cyjanowodór i częściowo siarkowodór.

Poszukiwanie nowych rozwiązań techniczno-organizacyjnych dotyczących gaszenia koksu ma istotne znaczenie motywowane względami ochrony środowiska oraz szeroko rozumianymi względami ekonomicznymi, związanymi z poprawą wskaźników technicznych i ochroną korozyjną instalacji zakładu koksowniczego. W koksowniach wyposażonych w urządzenia do ograniczenia emisji zanieczyszczeń największy udział, bo nawet 60%, przypada na mokre gaszenie koksu metodą wieżową. Ilość emitowanego pyłu waha się w granicach 200...600 g/Mg wsadu węglowego lub też 200...300 g/Mg suchego koksu. Oprócz tego przy otwartym gaszeniu wodami przemysłowymi zachodzi znaczna emisja składników gazowych, przy czym udział procesu gaszenia w ogólnej emisji koksowni wynosi dla fenolu 50%, siarkowodoru 20%, amoniaku 20% oraz cyjanowodoru 6%.

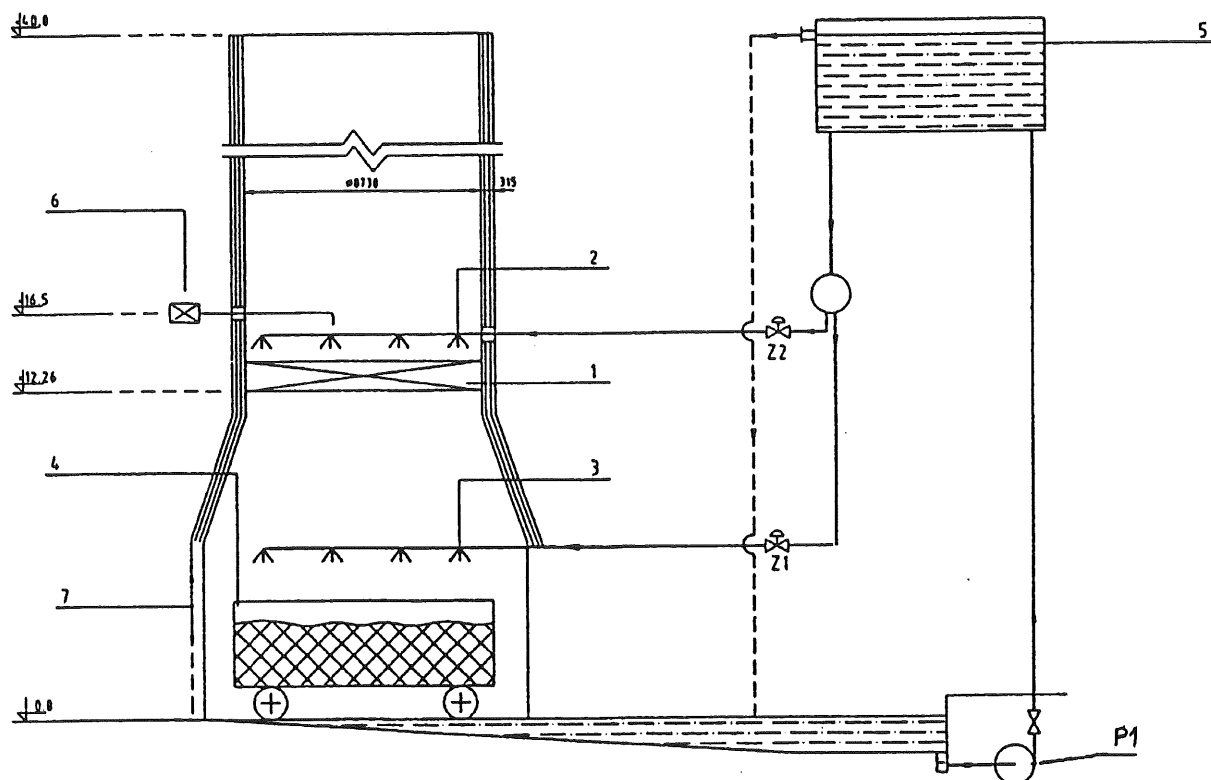
Analiza literaturowa pozwala sformułować wiele wniosków mających istotne znaczenie w poszukiwaniu nowych rozwiązań wieżowego gaszenia koksu.

1. Racjonalizacja procesu wieżowego gaszenia koksu polegająca na stosowaniu wypełnień odpylających typu inercyjnego prowadzi do ograniczenia emisji pyłów nawet o 40...60%, jednakże metoda ta, wykazująca selektywny mechanizm separacyjny, prowadzi do wzrostu emisji frakcji o wymiarach poniżej 5 μm . Frakcje te mają większą zawartość popiołu, siarki i 3,4-benzopirenu. Ta sama niekorzystna tendencja utrzymuje się w przypadku powierzchni właściwej i składu popiołów. Likwidacja tego niekorzystnego ze względów zdrowotnych efektu może nastąpić jedynie przez zmiany procesowe, polegające na zastosowaniu mechanizmu odpylania uszczelniającego wydzielenie pyłów drobnych.

2. Korzystne jest złagodzenie eksplozywnego charakteru gaszenia koksu w wozie gaśniczym. Efekt taki można uzyskać przez zastosowanie gaszenia pojemnościowego w wozie [1] oraz zastosowanie wieży z regulowanym ciągiem i zraszaniem wypełnieniem inercyjnym [8].

Metody te prowadzą do ograniczenia czasu gaszenia o 60...75% oraz obniżenia zużycia wody o co najmniej 20%. Jednocześnie wg [8] następuje częściowa kondensacja par, co dodatkowo zmniejsza zużycie wody oraz emisję pyłów i szkodliwych składników gazowych.

W krajowych koksowniach wdrożono także wiele innych oryginalnych rozwiązań w celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń z procesu chłodzenia koksu. Między innymi należy podkreślić, że polskie koksownictwo jako jedyne na świecie dysponuje technologią ograniczenia emisji gazowych zanieczyszczeń powietrza (szczególnie siarkowodoru) z omawianego procesu [10, 11]. Kolejną istotną modyfikacją, wdrożoną w wielu krajowych koksowniach, obniżającą uciążliwość procesu gaszenia koksu dla środowiska, jest system bazujący na aplikacji wypełnienia komórkowego, prowadzący do metodycznych zmian procesu gaszenia (Rys. 1). Pakiet wypełnienia komórkowego umieszczony w kominowej części wieży jest zraszany wodą gaśniczą z pewną charakterystyczną zwłoką w stosunku do gaszenia głównego. W obrębie zraszanego wypełnienia, generującego barbotażową hydraulikę, osiąga się główne efekty ekologiczne: odpyla-



Rys. 1. Schemat wieży gaszenia koksu z zainstalowanym wypełnieniem komórkowym:

- 1 – wypełnienie komórkowe, 2 – zraszacz, 3 – zraszanie główne wozu gaśniczego, 4 – wóz gaśniczy,
5 – zbiornik naporowy wody gaśniczej, 6 – stanowisko badawczo-pomiarowe (sonda pyłowo-kinetyczna),
7 – kurtyna regulacyjna ciągu wieży, P1 – pompa

Scheme of the coke quenching column with the cellular:

- 1 – cellular packing, 2 – sprinkler, 3 – main sprinkling of a quenching car, 4 – quenching car,
5 – quenching water thrust tank, 6 – examination and measurement stand (dust-kinetic probe),
7 – regulating curtain of tower draft, P1 – pump

nie strugi, kondensację oparów i absorpcję szkodliwych odgazów. Cykl gaszenia przedstawia się następująco: po podstawieniu wozu gaśniczego pod wieżę następuje zraszanie wozu gaśniczego ze zraszacza głównego. Po upływie ok. 10...20 s uruchamia się zraszanie wypełnienia komórkowego. Zraszanie wypełnienia komórkowego prowadzi się jeszcze przez ok. 20 s od chwili zakończenia gaszenia koksu w wozie w celu kondensacji resztkowych oparów i przemycia wypełnienia. W zależności od warunków barycznych ustala się położenie żaluzji (poz. 7) tak, aby nie występowało zjawisko bocznego wypływu oparów, a jednocześnie by był spełniony warunek minimalnego dosysania powietrza atmosferycznego.

W zmodyfikowanym systemie gaszenia koksu można wyodrębnić następujące fazy procesowe.

Faza 1 – gaszenia głównego, trwająca w przedziale czasowym $[0...(10...20)]$ s.

W tym czasie powstaje mieszanka parowo-gazowa z głównym ukierunkowaniem wypływu osiowego przez wieżę gaśniczą. Mieszanka parowo-gazowa przepływa przez dwuwarstwowy pakiet wypełnienia komórkowego [15], podlegając inercyjnemu odpylaniu. Mechanizm ten prowadzi do ograniczenia emisji pyłów o (40...60)%.

Faza 2 – gaszenia binarnego, trwająca w przedziale czasowym [(10...20)...60] s.

W tym czasie funkcjonuje zraszanie główne (poz. 3) i zraszanie wtórne (poz. 2), powstająca mieszanka parowo-gazowa przepływa osiowo przez układ wieżowy, przy czym w obrębie wypełnienia komórkowego panuje barbotażowy reżim hydrauliczny, a nad wypełnieniem występuje przeciwprądowy reżim dyspersyjny. Parametry wypełnienia zostały określone na podstawie badań podstawowych [3, 15, 16].

W obrębie wypełnienia komórkowego mieszanina parowo-gazowa podlega następującym efektom procesowym:

- odpyleniu wg kompleksowego procesu mokrego odpylania z udziałem mechanizmu inercyjnego, dyfuzyjnego i termoforezy,
- ochłodzeniu mieszanki parowo-gazowej, połączonym z równoczesną kondensacją oparów i efektem kontrakcji objętości [16] generującym dodatkową siłę ciągu,
- absorpcji składników gazowych, pochodnych procesu gaszenia,
- wyrównaniu profilu prędkości, dzięki czemu ogranicza się wpływ eksplozywnego charakteru przepływu strugi.

Faza 3 – gaszenia wtórnego, trwająca w przedziale czasowym [60...(90)] s.

W tym czasie funkcjonuje **jedynie zraszanie wtórne** (poz. 2). Przepływająca mieszanina parowo-powietrzna, **stanowiąca efekt samoodparowania i suszenia koksu**, podlega oczyszczeniu według **analogicznych efektów** jak w fazie 2.

Faza 4 – suszenia wypełnienia **obejmuje okresy między cyklami gaszenia**.

W tym czasie występuje **przepływ powietrza** wytworzony aerodynamicznym ciągiem wieży, prowadzący do **wysuszenia wypełnienia**.

Istotny wpływ na całość procesu **ma kondensacja par na wypełnieniu**, prowadzi ona do kontrakcji objętości par w wieży, **co powoduje efekt zwiększenia ciągu wieży** w jej dolnym odcinku. W górnym odcinku wieży prowadzi to do odmiennego efektu. Mianowicie gwałtowne zmniejszenie **objętości par w strefie pracy wypełnienia komórkowego** powoduje redukcję prędkości **mieszanki parowo-powietrznej** w strefie dyspersyjnej.

Omówione powyżej zjawiska **pozwalają przewidywać istnienie dodatkowej strefy** znajdującej się ponad wypełnieniem komórkowym, w której zachodzi dopełnienie procesu odpylania i absorpcji.

Rozwiązanie to, stanowiące przedmiot **zgłoszenia patentowego** [6], zostało wdrożone w kilku koksowniach i zostało **poddane szczegółowym badaniom**.

BADANIA PORÓWNAWCZE WIEŻ GASZENIA KOKSU

BADANIA TERMODYNAMICZNE

Badania dotyczyły rozkładów prędkości emitowanej strugi w wybranych przedziałach czasowych, a także określenia wielkości termodynamicznych, umożliwiających poznanie stanu i rzeczywistych natężeń przepływu emitowanego aerozolu.

Badania [17] miały charakter porównawczy i dotyczyły dwóch wieżowych systemów gaszenia koksu: wieży z tzw. kurtyną wodną (rozwiązanie tradycyjne) oraz wieży zmodernizowanej przez zastosowanie wypełnienia komórkowego i regulacji ciągu wieży.

Proces gaszenia koksu znajdującego się w wozie gaśniczym jest nieustalonym procesem cieplnym. Temperatura złoża kokсового zmienia się od ok. 850°C w fazie początkowej do ok. 85°C w końcowej fazie gaszenia. Procesowi temu towarzyszy wygenerowanie strumienia aerozolu o specyficznej charakterystyce dynamicznej. Celem badań było określenie istotnych z punktu widzenia ocen ekologicznych wskaźników emisyjnych odniesionych do jednostkowej ilości wsadu węglowego bądź produkowanego koksu. W badaniach tego procesu zastosowano metodę podziału cyklu na reprezentatywne przedziały czasowe, dla których na podstawie przeprowadzonych pomiarów opracowano chwilowe profile prędkości, stanowiące podstawę do obliczenia sumarycznej emisji aerozolu. Natomiast emisję pyłów i składników gazowych oparto na pomiarach bilansowych, odpowiadających pełnym cyklom gaszenia koksu. W pomiarach tych można było przyjąć (za badaniami cytowanymi w [16]), że w całym przekroju wieży występuje stałe stężenie pyłu. Pomiar emitowanego ładunku pyłowego można więc było ograniczyć do jednego miejsca aspiracyjnego poboru próbki [9, 18]. Jednocześnie na podstawie prowadzonych pomiarów [17] stwierdzono, że w czasie całego cyklu gaszenia zarówno temperatura, jak i stopień zawilżenia aerozolu są w przybliżeniu stałe. Z termodynamicznego punktu widzenia emisję aerozolu można więc w sposób uzasadniony ocenić w kategoriach procesu ustalonego z uwzględnieniem dynamicznej charakterystyki natężenia przepływu.

Badania dynamiki emitowanej strugi aerozolu przeprowadzono za pomocą zestawu aspiracyjnego, montowanego w cylindrycznej części obydwu badanych wież na poziomie ok. 16,5 m. Zaletą przyjętej metody badań jest relatywnie łatwy sposób wykonania pomiaru oraz powtarzalność wyników w kolejnych cyklach gaszenia, wynoszących 90 s. Pomiary wykonano w pewnych odstępach czasowych:

- dla wieży z kurtyną wodną $\tau_i = 15, 20, 30, 40, 60, 80, 90$ s,
- dla wieży z wypełnieniem komórkowym $\tau_i = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ s.

Każdemu czasowi τ_i odpowiada indywidualny profil prędkości mierzony w punktach $y_i = 0,25, 0,5, 1,0, 1,5, 2, 2,5$ m (Rys. 2). Mierzone wartości profilu prędkości (w_i) wyrównano wykorzystując model Prandtla, precyzujący uogólniony rozkład prędkości w funkcji promienia kanału przepływowego:

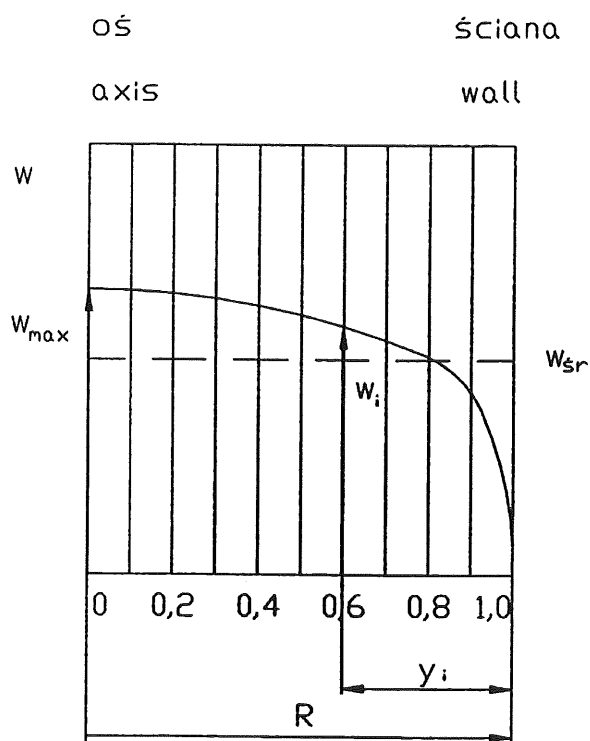
$$w = w_{\max} \left(\frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{7}}. \quad (1)$$

Wzór ten wykazuje dobrą zgodność z doświadczeniem dla liczb $Re < 80\,000$. Dla większych wartości liczby Reynoldsa można napisać ogólniejszą postać wzoru:

$$w = w_{\max} \left(\frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (2)$$

Dla oznaczeń jak na rysunku 2 ogólna zależność Prandtla przyjmie postać:

$$\frac{w_i}{w_{\max}} = \left(\frac{y_i}{R} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (3)$$



Rys. 2. Promieniowy rozkład prędkości przy turbulentnym przepływie przez rurę

Radial lay out of velocities in the turbulent flow through the pipe

Dla zmierzonych wartości w_i odpowiadających położeniu sondy y_i wartość wykładnika n_i wynosi:

$$n_i = \frac{\ln \frac{y_i}{y_n}}{\ln \frac{w_i}{w_n}} \quad (4)$$

Chwilowy profil prędkości dla czasu τ_i wyrównuje się na podstawie wartości średniej:

$$n_{i\text{sr}} = \frac{\sum n_i}{i} \quad (5)$$

uzyskując:

$$\frac{w}{w_{\max}} = \left(\frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{n_{i\text{sr}}}} \quad (6)$$

Zaletą stosowania uogólnionego rozkładu prędkości jest możliwość określenia pełnego profilu na podstawie kilku zmierzonych wartości (Rys. 3), toteż prędkość maksymalną chwilowego profilu prędkości możemy wyznaczyć na podstawie dowolnej prędkości w_i odpowiadającej położeniu sondy y_i :

$$w_{i\max} = w_i \left(\frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{n_{i\text{sr}}}} \quad (7)$$

Stosunek prędkości średniej do prędkości maksymalnej, z wykorzystaniem podanego wzoru potęgowego Prandtla, możemy przedstawić rozważając kolejno objętościowe natężenie przepływu na podstawie prędkości lokalnej:

$$\dot{V} = \int_0^R 2\pi w(R-y)dy = 2\pi w_{\max} \int_0^R (R-y)^{\frac{1}{n}} dy = \frac{2\pi R^2 w_{\max}}{\left(\frac{1}{n} + 2\right)\left(\frac{1}{n} + 1\right)} \quad (8)$$

oraz na podstawie prędkości średniej:

$$\dot{V} = \pi R^2 w_{\text{śr}}, \quad (9)$$

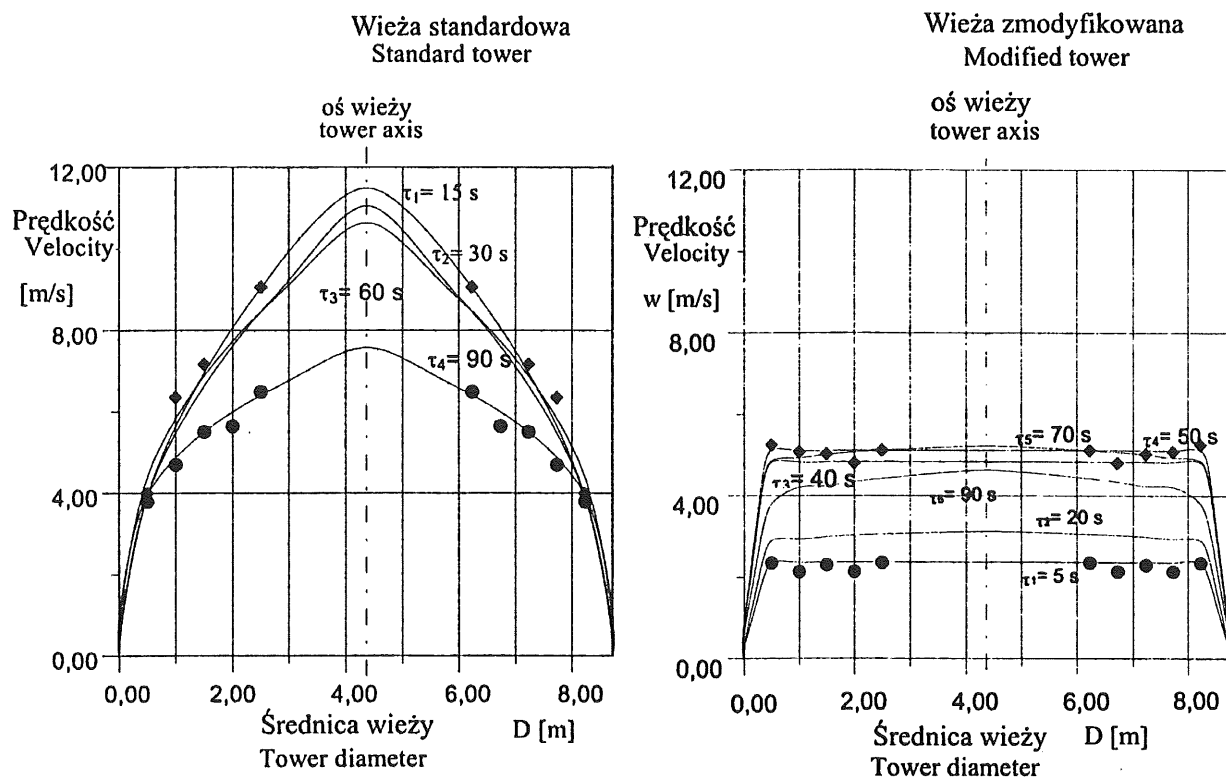
skąd:

$$\frac{w_{i\text{śr}}}{w_{i\text{max}}} = \frac{2}{\left(\frac{1}{n_{i\text{śr}}} + 2\right)\left(\frac{1}{n_{i\text{śr}}} + 1\right)}. \quad (10)$$

Zależność ta pozwala określić prędkość średnią dla poszczególnych przedziałów pomiarowych τ_i .

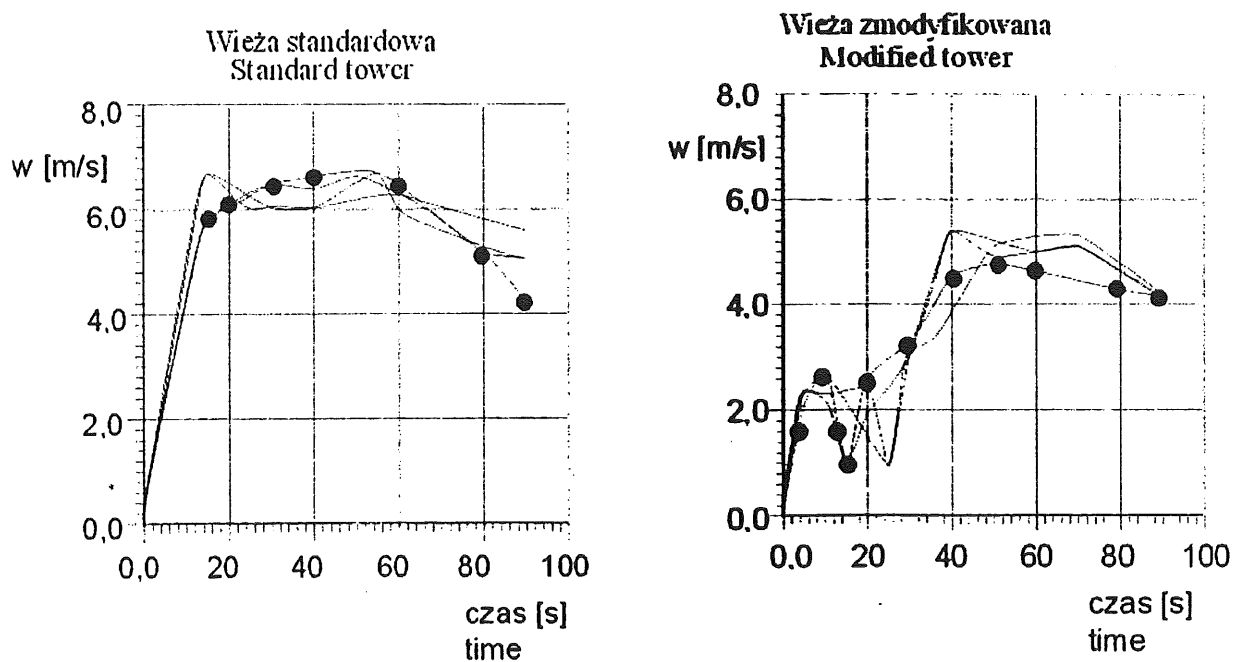
Przedstawiona procedura umożliwia uzyskanie szczegółowych równań profilu prędkości dla kolejnych pomiarów (τ_i) cyklu gaszenia przy dowolnie zlokalizowanej sondzie (y_i). Równania te posłużyły do opracowania analitycznych profili prędkości przepływu aerozolu, przedstawionych na rysunku 3. Dodatkowo naniesione punkty pomiarowe wykazują dobrą zgodność z wykreślonymi krzywymi funkcji $w_i = f(y_i)$. Dla utrzymania przejrzystości rysunku umieszczono jedynie punkty dla $\tau = 15$ s i $\tau = 90$ s w przypadku wieży bazowej oraz $\tau = 5$ s i $\tau = 90$ s w przypadku wieży zmodernizowanej. Analiza tych wykresów wskazuje na pewną istotną transformację charakteru przepływu w obydwu wieżach. Wieża porównawcza ma profil typu parabolicznego z wyraźnym maksimum, sięgającym w początkowej fazie procesu do ok. 11,6 m/s. Oznacza to, że w znacznym przekroju wieży istnieje wzmocniona tendencja eksplozywnego charakteru gaszenia, czemu towarzyszy wzrost emisji zanieczyszczeń procesowych. W przypadku wieży zmodernizowanej w niemal całym przekroju wieży uzyskano płaski profil prędkości, co jest efektem stabilizującego oddziaływania pakietu wypełnienia komórkowego. W zależności od fazy procesu (τ_i) prędkość maksymalna kształtuje się w przedziale (2,5...5) m/s. Zmiana charakteru profilu prędkości w stosunku do wieży tradycyjnej jest niezwykle korzystna ze względu na obniżenie prędkości i wyrównanie parametrów procesowych w całym przekroju wieży. Zmiana ta jest kluczowym czynnikiem obniżającym dynamikę pracy wieży, wpływając jednocześnie na obniżenie całkowitej emisji aerozolu.

Rysunek 4 przedstawia doświadczalne charakterystyki dynamiczne przepływu mieszaniny parowo-powietrznej dla kilku cykli gaszenia koksu [17]. Krzywe odpowiadają średnim prędkościom aerozolu obliczanym wg równania (10). Zestawienie to ilustruje powtarzalność charakterystyk dynamicznych procesu gaszenia. W przypadku wieży zmodernizowanej nastąpiła istotna redukcja dynamiki emisji aerozolu w początkowej fazie gaszenia, kiedy to występuje najwyższa emisja pyłu. Istotne jest również obniżenie prędkości średnich z ponad 6 do 5 m/s oraz skrócenie okresu wystę-



Rys. 3. Profile prędkości aerozolu wyznaczone metodą analityczno-doświadczalną

Aerosol velocity profiles, determined with the analytic-experimental method



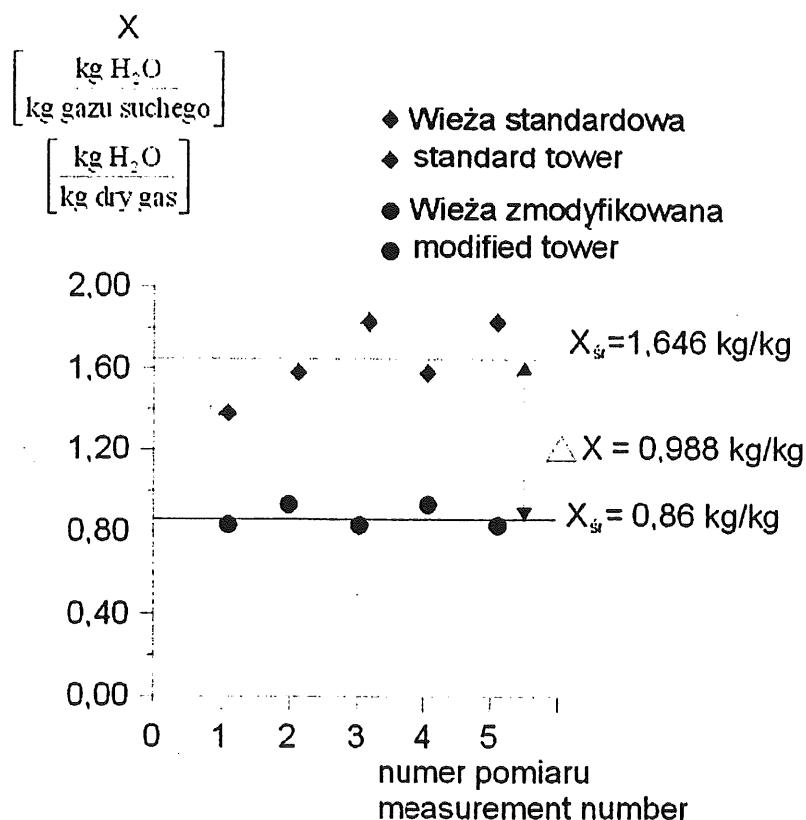
Rys. 4. Wykres rozkładu średnich prędkości aerozolu w czasie gaszenia koksu

Diagram of the lay out of aerosol mean velocities during coke quenching

powodzenia tych prędkości z 80 do 50 s. Wieżę bazową cechuje dynamiczny wzrost prędkości w przedziale (0...15) s, a następnie stabilizacja prędkości średnich przy wartościach powyżej 6 m/s do końcowego czasu gaszenia $\tau_g = 60$ s. W okresie samoistnego suszenia koksu w wozie widoczny jest spadek prędkości do ok. 5 m/s.

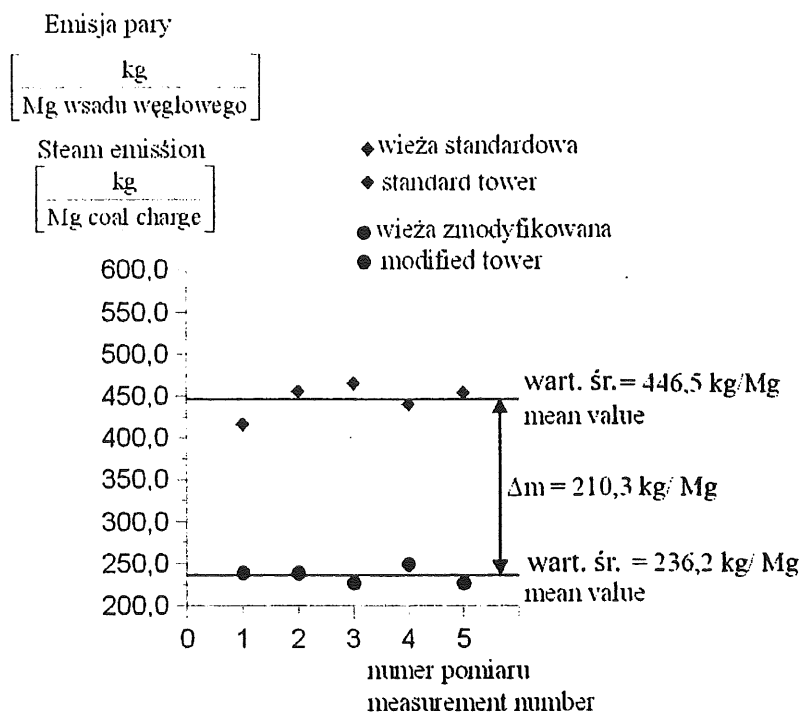
W przypadku wieży zmodernizowanej widoczna jest istotna zmiana cech dynamicznych. Zraszanie główne powoduje wzrost prędkości przepływu, jednakże ograniczony do ok. 2,5 m/s, co osiąga się dzięki stabilizującemu działaniu warstwy wypełnienia komórkowego oraz regulowanemu ciągowi wieży, dostosowanemu do warunków barycznych. Po uruchomieniu gaszenia binarnego w przedziale czasowym $\Delta\tau = (10...20)$ s, obserwuje się redukcję prędkości przepływu, będącą efektem wzmocnionego tłumienia oraz kondensacji oparów, wywołującej efekt kontrakcji objętościowej. W przedziale czasowym $\sim (15...40)$ s następuje wzrost prędkości przepływu do wartości ok. 5 m/s, z jednoczesnym zainicjowaniem barbotażowego reżimu pracy wypełnienia, czemu towarzyszy wzrost skuteczności odpylania i absorpcji składników gazowych. Po wyłączeniu zraszania głównego ($\tau = 60$ s) utrzymywane jest zraszanie binarne, zapewniające wysoki efekt oczyszczenia aerozolu i kondensacji oparów. W końcowej fazie prędkość spada do ok. 4 m/s.

Wytlumienie dynamiki przepływu aerozolu ma bezpośredni wpływ na obniżenie emisji par do atmosfery. Rysunek 5 przedstawia różnicę stopnia zawilżenia emitowanego aerozolu z porównywanych wież. W powiązaniu z mechanizmami omówionymi wcześniej różnica ta prowadzi do znacznego obniżenia ilości emitowanej pary i aerozolu, co ilustrują rys. 6 i 7 dla kolejnych serii pomiarowych.



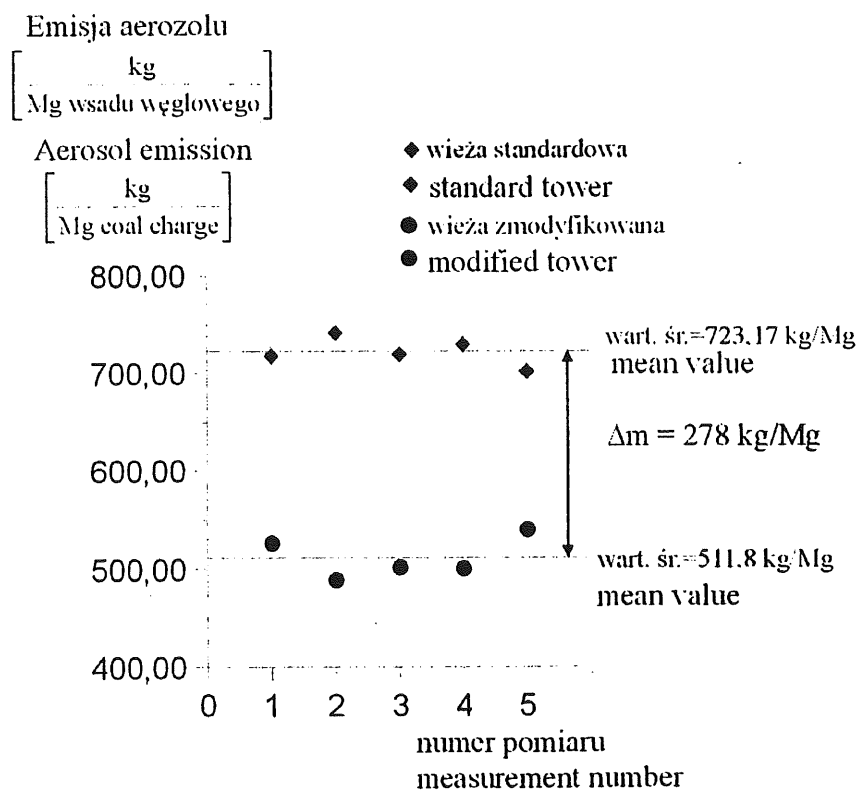
Rys. 5. Różnice stopnia zawilżenia aerozolu w porównywanych wieżach gaszenia

Differences between aerosol humidity rate in the compared quenching towers



Rys. 6. Różnice emisji pary wodnej z wieży gaśniczej z zastosowanym wypełnieniem komórkowym i wieży standardowej

Differences between steam emission from quenching tower with the cellular packing installed and from the standard one



Rys. 7. Różnice emisji aerozolu z wieży z zastosowanym wypełnieniem komórkowym i wieży standardowej

Differences between aerosol emission from quenching tower with the cellular packing installed and from the standard one

BADANIA SKUTECZNOŚCI ODPYLANIA

Ogólna skuteczność odpylania aerozolu w wieży gaśniczej jest efektem złożonego zbioru wyizolowanych mechanizmów, charakterystycznych dla mokrego odpylania w reżimie dyspersyjnym (dolna część wieży) i barbotażowym (w obrębie wypełnienia komórkowego). Proces ten można opisać wykorzystując model energetyczny.

Elementarną ilość pyłu wydzieloną ze strugi aerozolu można zapisać równaniem:

$$d\dot{m}_p = \dot{V}_g \cdot dc. \quad (11)$$

Jednocześnie obowiązuje równanie kinetyczne procesu odpylania:

$$d\dot{m}_p = k \cdot (c_i - c_i^*) dF. \quad (12)$$

Porównując równania (11) i (12) otrzymujemy:

$$k \cdot (c_i - c_i^*) dF = \dot{V}_g \cdot dc. \quad (13)$$

Przyjmując, że dla całego procesu powierzchnia kontaktu faz od powierzchni zraszanego koksu (1) zmienia się od $F = 0$ do wartości F w przekroju (2) emisji aerozolu, zaś stężenia zmieniają się od wartości c_p do c_k , otrzymujemy:

$$-\frac{k}{\dot{V}_g} \cdot \int_0^F dF = \int_{c_p}^{c_k} \frac{dc}{c_i - c_i^*}$$

oraz

$$-\frac{k}{\dot{V}_g} \cdot F = \ln \left(\frac{c_p - c_p^*}{c_k - c^*} \right). \quad (14)$$

Postać tę można przekształcić do formy

$$\frac{c_p - c_k}{c_p - c^*} = 1 - \exp \left(-\frac{k \cdot F}{\dot{V}_g} \right). \quad (15)$$

Przyjmując, że w szerokim zakresie ważna jest zależność stężenia równowagowego

$$c^* = 0, \quad (16)$$

co oznacza brak oporu wnikania pyłu do fazy ciekłej, otrzymamy zależność odpowiadającą definicyjnie ogólnej skuteczności odpylania:

$$\eta = \frac{c_p - c_k}{c_p} = 1 - \exp \left(-\frac{k \cdot F}{\dot{V}_g} \right). \quad (17)$$

Uwzględniając równanie zmiany pędu strugi aerozolowej w przekroju (1) i (2), wykładnik równania (17) można przekształcić do postaci [5]:

$$\frac{k \cdot F}{\dot{V}_g} \triangleq \frac{w_0^2 \cdot \rho}{\Delta p} = Eu^*, \quad (18)$$

gdzie przyjęto, że $(k \cdot \Delta w) \triangleq w_0^2$, co oznacza następującą funkcyjną zależność liczby Eulera dla procesu odpylania:

$$Eu^* = x_1 \cdot Eu^{x_2}, \quad (19)$$

przy czym liczba Eulera (Eu) jest wyznaczona na podstawie oporów przepływu aerozolu w wieży oraz średniej prędkości przepływu reprezentującej cały cykl gaszenia koksu.

Ostatecznie więc

$$\eta = \frac{c_p - c_k}{c_p} = 1 - e^{-Eu^*}, \quad (20)$$

zatem

$$\ln \left| \frac{c_k}{c_p} \right| = -Eu^*.$$

Jednocześnie ogólna liczba jednostek wymiany masy **związana z odpylem** strugi aerozolu wynosi:

$$N_{og} = \int_{c_p}^{c_k} \frac{dc}{c_i - c^*}, \quad (21)$$

zaś dla przyjętego założenia $c^* = 0$ otrzymujemy:

$$N_{og} = \ln \left| \frac{c_k}{c_p} \right|. \quad (22)$$

Zatem przez porównanie równań 20 i 22 otrzymujemy:

$$N_{og} = -Eu^*. \quad (23)$$

Równanie modelowe procesu odpylania, **wynikające** ze zmiany potencjału energetycznego, ma więc postać:

$$\eta = 1 - \exp(-N_{og}) = 1 - \exp(-Eu^*). \quad (24)$$

Dla rozpatrywanego przypadku istotne jest określenie współczynnika zmniejszenia emisji pyłu z wieży zmodernizowanej w stosunku do wieży bazowej. Biorąc pod uwagę równanie modelowe (24) oraz przyjmując, że $c_p \sim c_{kb}$, a $c_k \sim c_{km}$ uzyskuje się zależność:

$$\varepsilon^* = \frac{c_{km}}{c_{kb}} = \exp(N_{og}^*), \quad (25)$$

gdzie b jest indeksem wieży bazowej, a m – wieży zmodernizowanej.

Przedstawione równanie modelowe ε^* można zapisać w postaci ogólnej, uwzględniającej różnice oporów przepływu aerozolu w wieży bazowej i zmodernizowanej:

$$\varepsilon^* = \frac{c_{km}}{c_{kb}} = \exp(-x_1 \cdot \text{Eu}_z^{x_2}), \quad (26)$$

przy czym zastępczą liczbę Eulera definiuje się następująco:

$$\text{Eu}_z = \frac{\Delta p_d}{w^2 \cdot \rho}, \quad (27)$$

gdzie różnica średnich ciśnień dynamicznych dla całego cyklu gaszenia koksu wynosi:

$$\Delta p_d = (\bar{p}_{db} - \bar{p}_{dm}) = \frac{1}{2} (w_{sr,b}^2 \cdot \rho_b - w_{sr,m}^2 \cdot \rho_m). \quad (28)$$

Równanie (26) umożliwia także ocenę efektywności procesowej wieży zmodernizowanej przez wprowadzenie pojęcia relatywnej skuteczności odpylania aerozolu, zdefiniowanej następująco:

$$\eta^* = \frac{c_{kb} - c_{km}}{c_{kb}} = 1 - \varepsilon^*. \quad (29)$$

Porównawcze badania procesowe wieży standardowej i zmodernizowanej odbywały się w warunkach powtarzalnych [17]. Przeprowadzono po jedenaście pomiarów na każdej z wież, przy czym na jeden pomiar składało się pięć cykli gaszenia koksu. Biorąc zaś pod uwagę, że jeden z pomiarów obejmował 10 gaszeń, ogólnie więc przebadano 115 gaszeń jednostkowych przy produkcji 2047 ton koksu. Pomiary wykonano za pomocą pyłomierza grawimetrycznego, składającego się z następujących zespołów: sonda aspiracyjna, rurka spiętrzająca, separator skroplin, urządzenie zasysające. Pomiary zapylenia aerozolu, traktowanego jako mieszanina parowo-powietrzno-pyłowa, poprzedzono wyznaczeniem profilów prędkości dla poszczególnych przedziałów czasowych $\Delta\tau_i$ cyklu gaszenia koksu. Sonda pyłowa była zlokalizowana w stałym miejscu z utrzymaniem stałej prędkości zasysania, która odpowiadała miejscowej prędkości średniej, wyznaczonej z równania profilu prędkości (7). Średnie stężenie, reprezentatywne dla całego cyklu gaszenia, wyznaczono z równania, w którym uwzględniono funkcijną korektę stężenia zapylenia (c_i) w związku z nieizokinetycznym poborem próbki w poszczególnych przedziałach czasowych $\Delta\tau_i$ [9]:

$$c_k = c_i \cdot \sum 1,02 \cdot \left(\frac{w_{zas}}{w_{sr}} \right)_i^{-0,49} \frac{\Delta\tau_i}{\tau_g}, \quad (30)$$

przy czym zmierzone dla każdego cyklu stężenie zapylenia wynosiło

$$c_i = \frac{m_p}{V_g}, \quad (31)$$

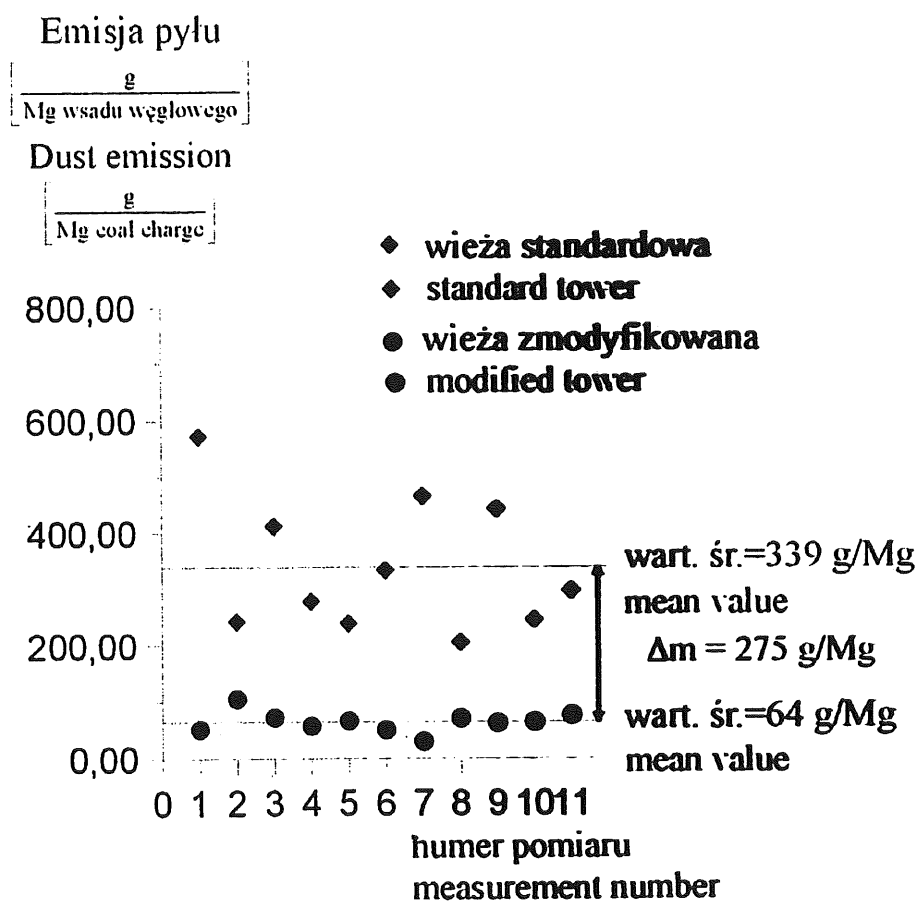
zaś średnia prędkość w_{sr} i -tego przedziału pomiarowego określono na podstawie równania (10). Prędkość zasysania strugi w_{zas} utrzymywano stałą w całym cyklu w przedziale (0,8...1,2) w_{sr} .

W wyniku przeprowadzonych badań można sformułować wnioski dotyczące najważniejszych wskaźników technicznych obydwu rozwiązań.

1. Obliczono, że stężenie zapylenia emitowanego aerozolu wynosi dla wieży bazowej $0,2795 \text{ g/m}^3$, zaś dla wieży z wypełnieniem komórkowym $0,0799 \text{ g/m}^3$. Oznacza to, że relatywna skuteczność odpylania wieży zmodyfikowanej ma wartość:

$$\eta^* = \frac{c_{kb} - c_{km}}{c_{kb}} = \frac{0,2795 - 0,0799}{0,2795} = 0,7141. \quad (32)$$

Na rysunku 8 przedstawiono emisję pyłu odniesioną do 1 Mg wsadu węglowego. Widoczny jest znaczny rozrzut tej wartości dla wieży bazowej, co wiąże się z eksplozywnym charakterem przepływu aerozolu. Ujawnia się także stabilizujący wpływ wypełnienia komórkowego w postaci wyrównanej i obniżonej emisji pyłów. W przypadku wieży bazowej średnia wartość emisji pyłów wynosi 339 g/Mg wsadu węglowego, zaś w przypadku wieży z wypełnieniem komórkowym wartość średnia równa się 64 g/Mg wsadu węglowego. Średnia redukcja emisji pyłu wynosi więc 275 g/Mg wsadu węglowego. Redukcję emisji pyłów należy identyfikować jako zwiększoną skuteczność odpylania, powodującą przyrost masy koksiku odzyskanego w osadniku wody gaśniczej, a także jako zmniejszoną emisję pyłu koksowego z wozu gaśniczego dzięki zmienionej charakterystyce roboczej zmodyfikowanej wieży.



Rys. 8. Różnice emisji koksiku z wieży gaśniczej z zastosowanym wypełnieniem komórkowym i wieży standardowej

Differences between quick coke emission from quenching tower with the cellular packing installed and from the standard one

2. Ilość emitowanych pyłów i składników gazowych pozostaje w silnym związku z ogólną ilością emitowanego aerozolu. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że redukcja natężenia przepływu wynosi ok. 55%. Można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że podobny wskaźnik utrzyma się w zakresie składników gazowych. Tezę tę potwierdzają wyniki analiz wykonanych w strefie wylotowej wieży za pomocą analizatora EMIOTEST 2592:

emisja względna obliczona w [kg/Mg wsadu węglowego]:

pył	0,05737
SO ₂	0,03027
CO	0,05996
H ₂ S	0,02487
amoniak	0,00011
cyjanowodór	0,00001
fenol	0,00016

Niższą wartość wskaźnika emisji pyłu zmierzoną za pomocą EMIOTESTU 2592, zasysającego próbkę u wylotu wieży, tłumaczy się tym, że w obrębie wieży powyżej aspiracyjnego punktu pomiarowego (+16,5 m) mogą wystąpić efekty termoforezy prowadzące do zwiększenia skuteczności odpylania.

Na podstawie przeprowadzonych badań porównawczych opracowano równanie współczynnika redukcji emisji pyłu w postaci:

$$\varepsilon^* = \frac{c_k}{c_{kb}} = \exp(-0,72 \cdot Eu_z^{-0,82}). \quad (33)$$

Na podstawie powyższego równania możliwe jest prognozowanie redukcji emisji pyłu poprzez zmniejszenie ciągu wieży za pomocą kurtyny regulacyjnej. Położenie kurtyny wpływa bowiem na wartość średniego ciśnienia dynamicznego strugi aerozolu. Równanie (33) może być także przekształcone do postaci relatywnej skuteczności odpylania wieży zmodernizowanej:

$$\eta^* = 1 - \exp(-0,72 \cdot Eu_z^{-0,82}). \quad (34)$$

Istotny wzrost skuteczności odpylania osiąga się przez redukcję ciągu wieży, przy czym parametr ten jest ograniczony efektem bocznego wypływu oparów z wieży w procesie gaszenia. Położenie kurtyny regulacji ciągu musi być zatem dostosowane do bieżących warunków barycznych.

Obiektem kolejnych badań przy zastosowaniu zmienionej metodyki pomiarowej była wieża cylindryczna, która przed modernizacją miała następującą charakterystykę techniczną:

- wieża żelbetowa z otuliną klinkierową,
- całkowita wysokość wieży – 40 m,
- wysokość tunelu – 10 m,
- wysokość komina – 30 m,
- średnica komina – 8 m,
- czas chłodzenia koksu – (90...120) s,
- czas chłodzenia koksu po gaszeniu – (300...400) s,
- zużycie wody do gaszenia koksu – (15...25) m³/h,
- rodzaj używanej wody – woda przemysłowa z odświeżania obiegów.

Skład wody stosowanej do gaszenia koksu oraz zraszania wypełnienia komórkowego w trakcie prowadzenia badań podano w tabeli 1.

Opracowano sposób pomiaru, w którym dokonuje się izokinetycznego poboru części aerozolu z równoczesnym pomiarem ciśnienia dynamicznego w przekroju (0,2–0,8) m od wylotu aerozolu z komina wieży gaszenia [12, 13]. Następnie pobrany aerozol podgrzewa się do temperatury (90...100)°C, równocześnie separując pył, a po oddzieleniu pyłu i oznaczeniu w nim substancji smołowych oraz benzo(α)pirenu prowadzi się dwustopniową absorpcję: amoniaku, siarkowodoru, cyjanowodoru, fenolu i dwutlenku siarki, najpierw alkaliczną w roztworze 0,1 n NaOH, a następnie kwasową w roztworze 0,1 n H₂SO₄. Z kolei dokonuje się separacji wilgoci z pomiarem ilości gazu suchego oraz stężeń tlenu węgla, tlenu azotu i siarkowodoru. Omówiony sposób pomiaru emisji umożliwia ilościowe określenie zanieczyszczeń z dokładnością $\pm 20\%$.

Wskaźniki emisji zanieczyszczeń obliczono według wzoru (35) przy założeniu, że profil prędkości jest stały w całej wieży i nie ma rozkładu stężeń wzdłuż promienia:

$$A_i = \frac{c_i \cdot w \cdot \tau \cdot F \cdot 0,001}{m} \quad (35)$$

Wartość poszczególnych parametrów zanotowana w trakcie badań była następująca: $w = 6,14$ m/s, $F = 47,02$ m², $\tau = 125$ s, $m = 16,4$ Mg. Stężenia badanych zanieczyszczeń zestawiono w tabeli 2. Posłużyły one do obliczania emisji zanieczyszczeń z wieży chłodzenia koksu z wypełnieniem komórkowym. Dla porównania w tabeli 3 zestawiono wskaźniki emisji zanieczyszczeń z omawianej wieży przed modernizacją, tzn. bez wypełnienia komórkowego. Umożliwiało to określenie wzrostu skuteczności działania wieży zmodernizowanej.

Tabela 1. Skład chemiczny wody stosowanej do gaszenia koksu oraz zraszania wypełnienia komórkowego w trakcie prowadzonych badań
Chemical constitution of water used for coke quenching and sprinkling of cellular packing during the researches carried out

Zanieczyszczenie Contaminant	Stężenie [mg/dm ³] Concentration		
	Woda uzupełniająca Refill water	Woda do gaszenia (osadnik) Quenching water (decanter)	Woda po gaszeniu (spływ) Post-quenching water (flow off)
Fenole lotne Volatile phenols	0,01	0,11	0,22
Amoniak lotny Volatile ammonia	12,00	18,00	26,00
Cyjanki wolne Free cyanides	0,00	0,02	0,03
Siarczki Sulphides	0,10	0,82	0,97

Tabela 2. Stężenie zanieczyszczeń w emitowanych oparach oraz wskaźnik emisji z wieży gaszenia koksu metodą moką po zastosowaniu wypełnienia komórkowego
 Pollutants concentration in the emitted fumes, and the emission factor from the coke quenching tower.
 The coke is cooled with the wet method after the application of cellular packing

Zanieczyszczenie Pollutant	Średnie stężenia zanieczyszczeń [mg/m ³] Pollutant mean concentration [mg/m ³]	Wskaźnik emisji zanieczyszczenia [g/Mg wsadu węglowego] Pollutant emission index [g/Mg coal charge]
Pył całkowity Total dust	7,05	15,5
Dwutlenek węgla Carbon dioxide	2,78	6,1
Tlenek węgla Carbon oxide	137,0	301
Substancje smołowe Pitch substance	0,18	0,40
Benzo(α)piren	0,17·10 ⁻³	0,37·10 ⁻³
Amoniak Ammonia	1,32	2,90
Siarkowodór Hydrogen sulfide	18,01	39,6
Cyjanowodór Hydrogen cyanide	0,002	0,004
Fenol Phenol	0,003	0,007

Z tabeli 3 wynika także, że wzrost skuteczności działania wieży z wypełnieniem komórkowym waha się od 5% dla siarkowodoru do 87% dla benzo(α)pirenu. Znaczny wzrost skuteczności działania (45...87%) zanotowano w przypadku zanieczyszczeń pochodzących z koksu oraz z jego rozkładu. W przypadku zanieczyszczeń pochodzących z rozkładu i desorpcji substancji zawartych w wodzie stosowanej do gaszenia koksu skuteczność działania jest znacznie niższa, bo wynosi jedynie (5...20%), co wynika z wysokich temperatur wody gaśniczej wynoszących około 65°C, a więc dość intensywnej fizycznej desorpcji składników gazowych.

Tabela 3. Skuteczność działania wypełnienia komórkowego dla ograniczenia emisji zanieczyszczeń z wieży gaszenia koksu

The efficiency of cellular packing in reduction of pollutants emission from the coke quenching tower

Zanieczyszczenie Pollutant	Wskaźnik emisji [g/Mg wsadu węglowego] Emission index [g/Mg coal charge]		Wzrost skuteczności odpylania wieży z wypełnieniem komórkowym Deducting efficiency increase for a cellular packing tower
	Bez wypełnienia komórkowego Without cellular packing	Z wypełnieniem komórkowym With cellular packing	
Pył całkowity Total dust	50,5	15,5	69,3
Dwutlenek węgla Carbon dioxide	14,7	6,1	58,5
Tlenek węgla Carbon oxide	552,00	301	45,5
Substancje smołowe Pitch substance	1,7	0,4	76,5
Benzo(α)piren	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$0,37 \cdot 10^{-3}$	86,6
Amoniak Ammonia	3,35	2,9	14,0
Siarkowodór Hydrogen sulfide	41,91	39,6	5,5
Cyjanowodór Hydrogen cyanide	0,005	0,004	20,0
Fenol Phenol	0,008	0,007	13,0

WNIOSKI

Wdrożenie w krajowych koksowniach wież gaszenia koksu z wypełnieniem komórkowym stanowi znaczący krok do obniżenia uciążliwości procesu gaszenia koksu metodą mokrą. Rozwiązanie takie pozwala na uzyskanie wielu korzystnych efektów technicznych, będących konsekwencją zjawiska kontrakcji oparów oraz stabilizacji procesu gaszenia z jednoczesnym ograniczeniem naturalnego ciągu wieży gaśniczej.

W stosunku do wież standardowych osiągnięto znaczną redukcję wskaźników eksploatacyjnych:

- średni wskaźnik emisji pyłu wynosi 45,88 g/Mg wsadu węglowego, oznacza to redukcję o ok. 89%,
- średnie stężenie pyłu w emitowanym aerozolu wynosi 0,0752 g/m³, co oznacza poprawę skuteczności o 72%,
- ilość emitowanego aerozolu wynosi 511 kg/Mg wsadu węglowego, co oznacza redukcję o ok. 30%,
- ilość emitowanej pary wodnej wynosi 236,2 kg/Mg wsadu węglowego, co oznacza redukcję o około 53%,
- ocenia się, że redukcja ilości składników gazowych pochodzących z koksu wynosi ok. 55%. W przypadku zanieczyszczeń pochodzących z wody gaśniczej skuteczność działania wypełnienia komórkowego jest niższa. Oznacza to, że do obniżenia emisji tych zanieczyszczeń niezbędne jest stosowanie dodatkowych rozwiązań technologicznych.

SPIS OZNACZEŃ

A_i	– wskaźnik emisji i -tego zanieczyszczenia [g/Mg]
c	– stężenie [g/m ³]
c^*	– stężenie równowagowe [g/m ³]
c_i	– stężenie i -tego zanieczyszczenia [g/m ³]
F	– powierzchnia międzyfazowa, powierzchnia przekroju pomiarowego [m ²]
k	– współczynnik szybkości wydzielania pyłu [m/s]
m	– średnia masa suchego wsadu węglowego [Mg]
m_p	– masa pyłu [kg]
N_{og}	– liczba jednostek wymiany masy w procesie odpylania aerozolu
n	– wykładnik równania profilu prędkości
p	– ciśnienie [Pa]
R	– promień wieży, promień rury [m]
y	– położenie sondy od ściany w kierunku osi wieży [m]
\dot{V}	– objętościowe natężenie przepływu [m ³ /s]
w	– prędkość przepływu aerozolu w przekroju pomiarowym [m/s]
X	– stopień zawilżenia gazu, [kg H ₂ O/kg suchego gazu]
x_1, x_2	– stała i wykładnik równania korelacyjnego
Δp_d	– różnica ciśnień dynamicznych [Pa]
ε^*	– współczynnik redukcji emisji pyłu
η	– relatywna skuteczność odpylania wieży zmodernizowanej
η	– ogólna skuteczność odpylania
ρ	– gęstość [kg/m ³]
τ	– czas [s]

INDEKSY DOLNE

g	– odnosi się do pełnego cyklu gaszenia koksu
i	– odnosi się do kolejnego ułożenia sondy w wieży

k	– wartości końcowe
b	– dotyczy porównawczej wieży bazowej
m	– dotyczy wieży zmodernizowanej
max, min, \bar{s}	– odpowiednio: wartości maksymalne, minimalne i średnie
p	– wartości początkowe
z	– wartość zastępcza

SYMBOLS

A_i	– factor of i impurities emission [g/Mg]
c	– concentration [g/m ³]
c^*	– normal concentration [g/m ³]
c_i	– concentration of i impurity [g/m ³]
F	– interfacial area, measurement section area [m ²]
k	– coefficient of dust rate emission [m/s]
m	– average mass off coal charge [Mg]
m_p	– mass of dust [kg]
N_{og}	– number of mass penetration units in a aerosol dedusting process
n	– exponent of velocity shape equation
p	– pressure [Pa]
R	– radius of a column, radius of a tube [m]
y	– sounder position from the wall in direction of column axis [m]
\dot{V}	– volumetric flow rate [m ³ /s]
w	– flow rate of aerosol in a measurement section [m/s]
X	– grade of gas humidity [kg H ₂ O/kg dry gas]
x_1, x_2	– constant and exponent of correlation equation
Δp_d	– dynamic pressure difference [Pa]
ε^*	– coefficient of reduction of dust emission
η^*	– relative dedusting effectiveness of modernise tower
η	– relative dedusting effectiveness
ρ	– density [kg/m ³]
τ	– time [s]

SUBSCRIPTS

g	– it refers to full cycle of coke quenching
i	– it refers to following sounder position in a tower
k	– ended values
b	– it concerns comparative base tower
m	– it concerns a modernise tower
max, min, \bar{s}	– accordingly: the upper values, lower values and average values
p	– initial values
z	– substitute values

LITERATURA

- [1] Beyerlein H., A. Losch: *Sposób gaszenia koksu za pomocą zraszania drobno rozpyloną mgłą wodną*, Patent NRD nr 26.093 (1963).
- [2] Bukowski J.: *Mechanika płynów*, PWN, Warszawa 1959.
- [3] Hehlmann J.: *Badania procesowe aparatu kolumnowego z wypełnieniem komórkowym*, Zeszyt Naukowy Politechniki Śląskiej, 125, Gliwice 1991.
- [4] Hehlmann J., J. Kapała, J. Olejnik: *Skuteczność działania wypełnienia komórkowego dla ograniczenia emisji zanieczyszczeń z wieży chłodzenia koksu metodą mokrą*, II Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Teoria i praktyka ochrony powietrza”, Szczyrk 1998.
- [5] Hehlmann J., K. Nakonieczny: *Badania i zastosowanie przemysłowe hybrydowego urządzenia do oczyszczania gazów przemysłowych*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 5, 8–11 (1994).
- [6] Hehlmann J. i inni: *Sposób i wieża mokrego gaszenia koksu z kontrakcją emitowanych oparów*, Zgł. Pat. nr P.-318 386, 1997.
- [7] Hobler T.: *Ruch ciepła i wymienniki*, WNT, Warszawa 1968.
- [8] Informacja firmowa: *Urządzenie do gaszenia rozżarzonego koksu*, Paliwa, 45, 9–10 (1965).
- [9] Juda J.: *Pomiary zapylenia i technika odpylania*, WNT, Warszawa 1968.
- [10] Kapała J., C. Olczak, J. Olejnik, Z. Sobala, Z. Trzepizur, B. Wolany: *Sposób chłodzenia koksu*, Patent RP nr 173 197.
- [11] Kapała J., C. Olczak, J. Olejnik, Z. Sobala, Z. Trzepizur: *Sposób ograniczenia emisji zanieczyszczeń z procesu chłodzenia koksu metodą mokrą*, Materiały I Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Teoria i praktyka ochrony powietrza”, Oficyna Wydawnicza Makago, Bytom 1996, 239–247.
- [12] Kapała J., C. Olczak, W. Śmigiel: *Sposób pomiaru emisji zanieczyszczeń z mokrego chłodzenia koksu*, Patent RP nr 173207.
- [13] Kapała J., N. Zeltinsh: *A direct way of estimation of impurity emission from the coke cooled by the wet method*, Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 6, 19–28 (1997).
- [14] Ozerskij J.G.: *Issledowanie wybrosov w atmosferu pri tuszenji koksa*, Koks i Chimija, 1, 46–55 (1985).
- [15] Praca zbiorowa: *Badania oraz aplikacja zmodernizowanego systemu wieżowego gaszenia koksu*, Praca nauk.-bad. nr NB-405/RCh-5/W.961/88, Politechnika Śląska, Gliwice 1990.
- [16] Praca zbiorowa: *Analiza możliwości zastosowania nowego wypełnienia celem usprawnienia wieżowego gaszenia koksu*, Praca nauk.-bad. nr NB-26/RCh-5/87, Politechnika Śląska, Gliwice 1987.
- [17] Praca zbiorowa: *Badania pilotowe zmodernizowanego systemu gaszenia koksu*, Praca nauk.-bad. W901/RCh-5/95, Politechnika Śląska, Gliwice 1995/97.
- [18] Ryska E.: *Pomiary zapylenia gazów w przewodach*, Wyd. „Śląsk”, Katowice 1969.
- [19] Użow W.N., A.J. Waldborg: *Oczyszczanie gazów mokrymi filtrami*, Chimia, Moskwa 1972.
- [20] Warych J.: *Odpylanie gazów metodami mokrymi*, WNT, Warszawa 1979.
- [21] Wojciechowski J.: *Pomiary ciepłne w elektrowniach*, PWN, Warszawa 1965.

Wpłynęło: 14 grudnia 1998, zaakceptowano do druku: 19 marca 1999.