*ŁUKASZ SMĘDOWSKI *), ALEKSANDER SOBOLEWSKI*
Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

System prognozujący jakość koksu – użyteczne narzędzie dla zakładu koksowniczego

Coke Quality Prediction System – an useful tool for a coking plant

Słowa kluczowe: *koks, mieszanka węglowa, prognozowanie, optymalizacja, jakość koksu, system informatyczny*
Keywords*: coke, coal blend, prediction, optimization, coke quality, IT system*

Wprowadzenie

Ewolucja procesu wielkopiecowego, głównie w kierunku minimalizacji zużycia koksu do wytopu surówki żelaza, spowodowała drastyczne zaostrzenie wymagań stawianych parametrom jakościowym koksu. W procesie koksowania, właściwości surowca węglowego przekładają się bezpośrednio na parametry jakościowe wyprodukowanego koksu. Produkcja koksu o wartościach parametrów jakościowych oczekiwanych przez hutnictwo, uwarunkowana jest:

- dostępem do odpowiedniej ilości i jakości węgli koksowych,
- odpowiednią technologią ich przygotowania do koksowania,
- dyspozycyjnym potencjałem produkcyjnym,
- skutecznym narzędziem sterowania jakością produkcji.

Podstawą racjonalnego wykorzystania węgla w koksowniach, jest znajomość jego cech jakościowych i prawidłowa ich ocena. O wartości technologicznej węgla decyduje zespół jego właściwości fizycznych, chemicznych i fizykochemicznych. Krajowe koksownie mają do dyspozycji ograniczoną bazę wysokojakościowych węgli koksowych. Ponadto, znaczna większość z nich nie jest zintegrowana z hutą żelaza, a co za tym idzie produkuje koks, który sprzedawany jest na międzynarodowym rynku, istotną kwestią jest utrzymanie jakości produkowanego produktu przy jednoczesnym wykorzystaniu dostępnych zasobów surowca w sposób jak najbardziej optymalny. W związku z powyższym, skonstruowanie i wdrożenie w koksowniach elektronicznego systemu, który mógłby wspomagać zarządzanie produkcją koksu wydaje się być działaniem zasadnym i pożądanym.

Przegląd stanu wiedzy, jaki został przeprowadzony w ramach zadania badawczego „Prognostyczny model właściwości koksu – prognozowanie jakości koksu" realizowanego w projekcie „Inteligentna koksownia spełniająca wymagania najlepszej dostępnej techniki" [1] potwierdził, że problem prognozy jakości koksu jest niezwykle trudny i złożony, a prezentowane w literaturze modele różnią się między sobą poziomem skomplikowania oraz wykorzystywanymi w nich zmiennymi niezależnymi. Modele prognozowania wskaźników jakościowych koksu, przytaczane w źródłach literaturowych, odnoszą się do:

- konkretnej koksowni, dla której równania prognozowania opracowano przy założeniu stałych warunków przygotowania i koksowania wsadu węglowego, tak więc funkcje uzależniały parametry jakościowe koksu tylko od właściwości surowca węglowego [2-4],
- dowolnej koksowni, wtedy opracowane równania prognostyczne uwzględniały, oprócz właściwości węgla wsadowego, także wskaźniki określające wpływ technologii przygotowania wsadu i parametrów koksowania na jakość koksu [5-7].

Modele dotyczące dowolnej koksowni spotyka się w literaturze sporadycznie, gdyż ich opracowanie jest zadaniem znacznie trudniejszym, z uwagi na ich skomplikowaną strukturę co powoduje trudności w praktycznym ich zastosowaniu w zakładzie koksowniczym. Jak dotychczas nie opracowano uniwersalnego modelu, którego równania oprócz parametrów jakościowych węgla, zawierałyby również składowe odzwierciedlające wpływ stosowanej technologii, opisujące wszystkie przemiany zachodzące w procesie koksowania węgla, a przez to umożliwiające prognozowanie jakości koksu niezależnie od stosowanego surowca węglowego i stosowanej technologii koksowania. Większość modeli została opracowana na potrzeby konkretnych koksowni i określonej bazy węglowej, a więc dla parametrów węgla i parametrów technologicznych wahających się w określonym przedziale ich zmienności.

*) **Autor do korespondencji:**
Dr Łukasz Smędowski – Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, 41-803 Zabrze, ul. Zamkowa 1
tel.: +48 32 271 00 41, w. 355; fax.: +48 32 271 08 09
e-mail: lsmedowski@ichpw.zabrze.pl

W ramach tematu 5.2 pt. „Prognozowanie jakości koksu w skali ‘makro’, jako funkcja przejścia przez instalację koksowniczą” projektu „Inteligentna koksownia…” podjęto działania mające na celu stworzenie produktu w postaci systemu informatycznego, który będzie efektywnym narzędziem wspomagającym zarządzanie produkcją koksu poprzez:

- prognozowanie kluczowych parametrów jakościowych koksu,
- optymalizację składu mieszanki w aspekcie jakościowym, ilościowym i cenowym,
- wskazywanie najbardziej optymalnego sposobu na utrzymanie wysokiej jakości produkowanego koksu, niezależnie od występujących wahań jakościowych węgli w dostawach do koksowni,
- wczesną identyfikację możliwych zakłóceń jakościowych koksu, już na etapie sporządzania mieszanki wsadowej i ich szybką, skuteczną eliminację.

System ten ma ponadto stanowić uzupełnienie funkcjonujących obecnie w polskich koksowniach systemów dyspozytorskich, w aspekcie zarządzania zasobami węglowymi oraz prowadzenia produkcji koksu.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości systemu prognozującego jakość koksu na potrzeby dowolnego zakładu koksowniczego.

Istotne zagadnienia rozwiązane na etapie projektowania systemu

W literaturze przedmiotu można znaleźć różnorodne modele matematyczne, przy pomocy których możliwe jest prognozowanie wskaźników jakościowych koksu [1, 8-11]. Niestety, większość z nich uwzględnia wyłącznie kwestię wyliczenia odpowiedniego wskaźnika z wykorzystaniem pewnego zbioru danych wejściowych, nie uwzględnia natomiast tego, w jaki sposób pozyskać wiarygodny zbiór danych wejściowych w warunkach przemysłowych, tj. dla partii węgla, którą obsadzane są komory baterii koksowniczej w rzeczywistym zakładzie produkcyjnym. Z przeprowadzonych obserwacji jasno wynika, iż w krajowych koksowniach próbka węgla, która poddawana jest szerokiemu zakresowi analiz pobierana jest z dostaw węgla do koksowni. Następnie węgiel ten, nim trafi do komory koksowniczej, jest składowany i uśredniany na składowisku, magazynowany w zbiornikach węglowych i mieszany z innymi węglami w momencie komponowania mieszanki wsadowej. Na każdym z tych etapów, za wyjątkiem składowiska pobierane są próbki, które analizowane są w węższym, w stosunku do prób z dostaw, zakresie analiz. Należy ponadto zauważyć, że użyteczność tych analiz pod kątem prognozowania jest niewystarczająca, ze względu na to, iż uzyskany wynik zazwyczaj pojawia się w systemie dyspozytorskim w czasie, gdy węgiel jest już dozowany do mieszanki lub podawany do komory. W związku z powyższym uznano, iż proponowany system prognozujący jakość koksu opierać się będzie wyłącznie na wynikach analiz dotyczących przychodów węgla. Wyniki tę będą odpowiednio przetwarzane przez specjalnie przygotowany algorytm matematyczny, mający na celu wyliczenie najbardziej prawdopodobnych wartości parametrów jakościowych uśrednionych na składowisku węgli, a następnie na ich podstawie wyliczane będą parametry jakościowe mieszanki o zadanym składzie, w oparciu o prostą zależność:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{n}(K_i \cdot X_i^{sk})}{100} \quad (1)$$

gdzie:

X – wartość parametru X dla mieszanki,

n – liczba węgli w mieszance,

K_i – koncentracja i-tego węgla w mieszance, wyrażona w % ($\sum_{i=1}^{n}\frac{K_i}{100}$),

X_i^{sk} – wartość parametru X_i dla składnika mieszanki, ujęta jako średnia ze składowiska.

Takie postępowanie jest słuszne, ponieważ zdecydowano się bazować jedynie na dwóch grupach parametrów. Pierwszą z nich stanowią parametry addytywne, tj. takie, których wartości dla mieszanki węglowej bezpośrednio wynikają z wartości tych parametrów dla poszczególnych węgli oraz ich udziałów procentowych w mieszance wsadowej, np. A^d, V^{daf}. Drugą grupę stanowią parametry nieaddytywne, tj. wartości wskaźników określających reakcyjność, wytrzymałość i ścieralność koksu z węgli koksowanych w instalacji Karbotest, dla których udało się opracować funkcje przejścia pomiędzy ich wartościami dla pojedynczych węgli oraz mieszankami skomponowanymi dla tych węgli. Funkcje te zostały przetestowane dla rzeczywistych mieszanek stosowanych w Koksowni Przyjaźń SA i zaimplementowane bezpośrednio do modeli prognostycznych. Oczywiście, należy zdawać sobie sprawę z tego, że w przypadku stosowania innych węgli funkcje te należy poddać ponownemu testowaniu oraz korekcie, dlatego też zostały one wprowadzone do systemu w taki sposób, aby możliwe było korygowanie ich postaci bez konieczności ingerencji w kody źródłowe aplikacji. Przedstawione powyżej podejście, oprócz tego iż gwarantuje użycie do prognozowania zbliżonych do rzeczywistych wartości parametrów jakościowych węgli, niesie ze sobą dodatkową korzyść, jaką jest możliwość analizy wpływu poszczególnych dostaw węgli na jakość surowca zgromadzonego na składowisku, a tym samym wczesne identyfikowanie niekorzystnych zmian w jakości wsadu.

W proponowanym systemie, również na zasadzie zaimplementowania odpowiedniego algorytmu matematycznego, zdefiniowane zostało ponadto powiązanie czasowe pomiędzy uzyskaniem uśrednionych wartości parametrów jakościowych węgla, skomponowaniem mieszanki oraz obsadzeniem mieszanką komór. Jest to bardzo ważna funkcja, ponieważ dzięki niej powiązane są wartości parametrów jakościowych węgli z dostaw z mieszanką węglową, stosowaną do uzyskania koksu w konkretnym przedziale czasowym. W związku z powyższym, system ma możliwość prognozowania jakości danej partii koksu na podstawie wartości parametrów, które na pewno odnoszą się do tej mieszanki, z której ta partia koksu została uzyskana.

Ostatnim problemem, z którym zmierzono się na etapie opracowania założeń programu, była kwestia braków w danych. Wiadomym jest, że nie każda dostawa węgla jest analizowana pod kątem wszystkich, niezbędnych do prognozowania parametrów jakościowych. Ze względu na przyjętą specyfikę systemu, która wymaga tego, aby do każdego przychodu surowca przyporządkowany był komplet wartości niezbędnych analiz, zaimplementowano prostą procedurę matematyczną, w wyniku działania której powyższy cel został osiągnięty. Procedura ta wykorzystuje równanie (2), które odzwierciedla prawdopodobny trend liniowy, występujący pomiędzy dwiema danymi rzeczywistymi, opisującymi wartości parametru a:

$$a_k = a_1 + (k-1)\frac{a_n - a_1}{n-1} \quad (2)$$

gdzie:

a_k – brakująca wartość parametru jakościowego,

a_1, a_n – dwie wartości rzeczywiste parametru jakościowego, pomiędzy którymi występuje k brakujących wartości,

n – liczba wyrazów w ciągu wartości analiz przyporządkowanych do przychodów węgla, którego skrajne wyrazy (a_1, a_n) są danymi rzeczywistymi.

Niemniej należy tutaj mieć na uwadze, że jakość danych generowanych przez proponowany algorytm zależy od tego, jak często dany parametr jest oznaczany. W ramach przeprowadzonych testów stwierdzono, że dla parametrów oznaczanych z częstotliwością nie mniejszą niż 10 dni (zakładając jedną dostawę na dobę) wartości generowanych danych w sposób akceptowalny oddają rzeczywiste zmiany wartości takiego parametru. W przypadku, gdy częstotliwość oznaczeń jest mniejsza, prognozowanie jakości koksu na podstawie takich danych obarczona jest większym błędem, który w opinii autorów powoduje, iż wyniki prognozy powinny być traktowane z mniejszą ufnością.

System prognozujący jakość koksu

Prezentowany system prognozujący jakość koksu został opracowany przy współpracy Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla z Koksownią Przyjaźń SA oraz Advicom sp. z o.o. Koksownia Przyjaźń SA udostępniła pakiet danych historycznych, którymi zasilono system celem przeprowadzenia szeregu testów jego funkcjonowania, Advicom sp. z o.o. był natomiast wykonawcą prac informatycznych, w wyniku których powstał produkt, którego wszystkie założenia techniczne opracowane zostały przez IChPW. Ogólnie rzecz ujmując, nadrzędnym celem systemu jest wspomaganie procesu zarządzania produkcją koksu, tj. podejmowania najbardziej korzystnych decyzji związanych z utrzymaniem jakości koksu na zadanym poziomie oraz optymalnym wykorzystaniem zasobów węgla. Cel ten jest realizowany poprzez wykorzystanie szeregu danych opisujących: jakość węgla, technologię oraz statystyczne zależności pomiędzy jakością wsadu oraz koksu, wynikające ze zgromadzonych danych historycznych (rys. 1).

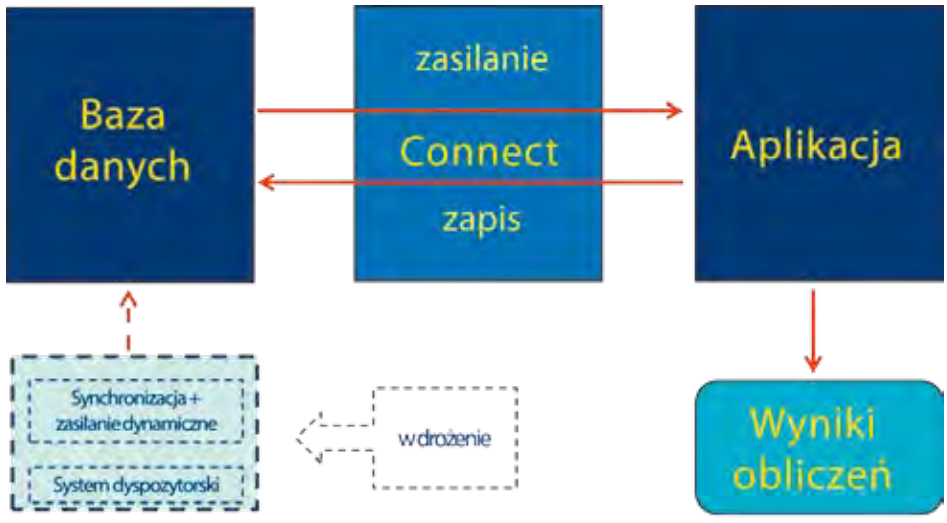
Opisywany system składa się z dwóch zasadniczych części (rys. 2):

- bazy MSSQL, w której są gromadzone wszystkie niezbędne do funkcjonowania programu dane,
- aplikacji webowej, wykonującej obliczenia oraz prezentującej ich wyniki na ekranie monitora.

Obydwa elementy są ze sobą połączone za pomocą odpowiednich komend SQL, dzięki czemu utrzymywany jest transfer danych pomiędzy komponentami. Należy tutaj zauważyć ponadto, iż ze względu na różnorodność systemów dyspozytorskich funkcjonujących w koksowniach, kwestia zapewnienia zasilania systemu bieżącymi danymi produkcyjnymi jest elementem wdrożenia systemu w konkretnym zakładzie koksowniczym.

Rys. 1. Ogólna filozofia proponowanego systemu

Fig. 1. General philosophy of the proposed IT system



Rys. 2. Schemat systemu

Fig. 2. System scheme

Baza danych

Zakres przechowywanych danych niezbędnych do prawidłowego działania Systemu można podzielić na trzy grupy:

- dane jakościowe, pochodzące z systemu dyspozytorskiego,
- dane porządkujące (kody identyfikacyjne), umożliwiające komunikowanie się aplikacji z bazą,
- dane logiczne, określające jaki jest charakter danego parametru.

Dane są gromadzone w bazie w dziewięciu blokach:

1. analizy jakościowe oraz ilości przychodów węgla,
2. parametry jakościowe oraz ilości węgli na składowiskach,
3. zakresy czasowe obowiązywania mieszanek węglowych,
4. składy procentowe mieszanek,
5. analizy dodatkowe węgla,
6. analizy jakościowe koksu,
7. zestawienie dostawców,
8. zestawienie i parametry wież węglowych oraz baterii (wszystkie dane technologiczne),
9. wzory obliczeniowe dla parametrów jakościowych koksu.

Baza posiada dodatkowo jeszcze tablicę, w której gromadzone są wartości wyliczane przez program, tzn. każdy wynik prognozy jest automatycznie zapisywany w bazie danych.

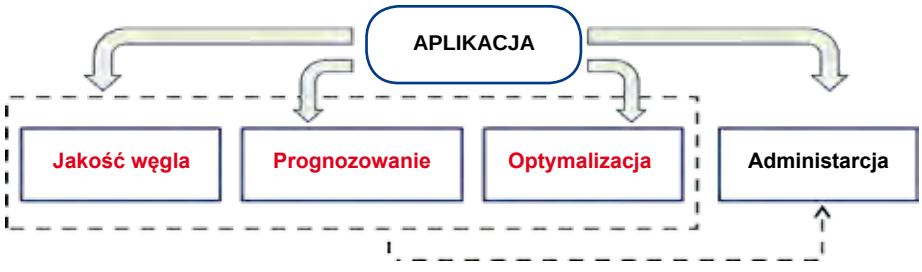
Aplikacja prognozująca jakość koksu

Aplikacja prognozująca jakość koksu została skonstruowana w technologii webowej, co oznacza, iż obsługa systemu odbywa się poprzez przeglądarkę internetową. Takie rozwiązanie niesie za sobą szereg korzyści, tj.:

- możliwość korzystania z programu w dowolnym miejscu (warunek – dostęp do sieci internetowej),
- możliwość jednoczesnego korzystania z jednej konfiguracji Systemu przez kilku użytkowników,
- możliwość zarządzania produkcją koksu dla kilku zakładów jednocześnie, z wykorzystanie jednego konta użytkownika.

System ma konstrukcję modułową i składa się z trzech modułów funkcyjnych oraz modułu administracyjnego (rys. 3):

moduł 1 – Jakość węgla,
moduł 2 – Prognozowanie jakości koksu,



Rys. 3. Schemat aplikacji

Fig. 3. Application scheme

moduł 3 – Optymalizacja składu mieszanki w aspekcie jakościowym i ekonomicznym,
moduł administracyjny.

Moduł 1 – Jakość węgla

Ten moduł stanowi wizualizację informacji w bazie danych, dotyczących przychodów węgli oraz zasobów surowca na składowiskach. Okno główne tego modułu zaprezentowane zostało na rysunku 4. Przedstawione są tutaj dane dotyczące rodzajów, ilości i jakości zasobów węgli gromadzonych na składowiskach, aktualne na zadany dzień. Po wyborze funkcji „wykres – składowisko" lub „wykres – przychody" dostępne są bardziej szczegółowe informacje dla zadanej pryzmy/rodzaju węgla, które użytkownik może analizować dla wybranego przez siebie przedziału czasowego:

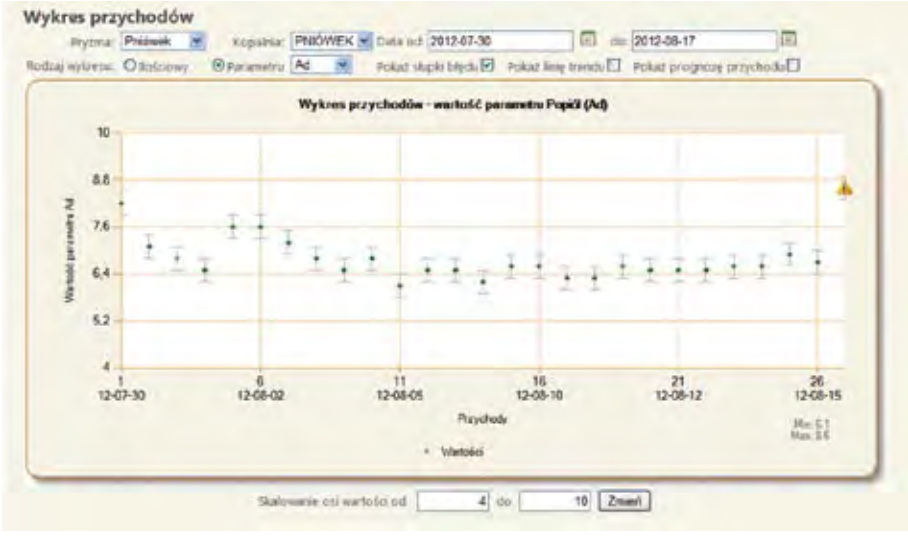
– podgląd przychodów dla poszczególnych dostawców węgla, zarówno w aspekcie ilościowym jak też jakościowym. Po dokonaniu wyboru rodzaju węgla użytkownik ma możliwość analizowania tego, jak kształtowały się przychody zadanego węgla zarówno pod względem ilości, jak również jakości. Po wybraniu reżimu jakościowego system generuje wykres, na którym przedstawione są wartości poszczególnych parametrów jakościowych, za wybrany okres. Przykładowo, wykres taki przedstawiono na rysunku 5,
– podgląd zasobów zgromadzonych na składowisku w aspekcie ilościowym i jakościowym. W reżimie ilościowym użytkownik uzyskuje informację o ilości zgromadzonych zasobów węglowych na poszczególnych składowiskach. Przykładowo, wykres taki przedstawiono na rysunku 6. W reżimie jakościowym, po wyborze pryzmy, użytkownik może zapoznać się z wyliczonymi wartościami parametrów jakościowych zgromadzonego na niej węgla.

Na wykresach jakościowych możliwe jest wykreślanie linii trendu, system każdorazowo podaje także wartości maksymalne i minimalne prezentowanego parametru.

Opracowując założenia dla modułu 1 przyjęto, iż jego głównym celem jest wczesna identyfikacja zakłóceń jakościowych węgla, umożliwiająca podjęcie szybkiej i skutecznej decyzji pozwalającej na uniknięcie pogorszenia jakości koksu. W związku z powyższym, zaimplementowano tutaj zestaw procedur ostrzegawczych. Dla każdej procedury ostrzegawczej parametry krytyczne są wprowadzane w module administracyjnym, a ich wartości są definiowane indywidualnie przez administratora systemu, w zależności od potrzeb danego zakładu koksowniczego. Pierwsza z procedur uruchamiana jest w sytuacji niskiego poziomu węgla na składowisku – system alarmuje użytkownika (rys. 6), jeśli ilość węgla na składowisku jest niższa od zdefiniowanego progu. Kolejna

Rys. 4. Okno główne modułu „Jakość węgla"

Fig. 4. Main window of the 'Coal quality' box



Rys. 5. Zmiany w jakości (zawartość popiołu) dostaw węgla z kopalni „Pniówek".
Żółta ikonka oznacza uruchomienie procedury ostrzegającej o zbyt dużym wzroście zawartości popiołu

Fig. 5. Changes in „Pniówek" coal supplies quality (ash content).
Yellow icon means to start the warning procedure of about too much growth of the ash content

Rys. 6. Zmiany w ilości węgla składowanego na składowisku (pryzma Pniówek).
Żółte ikonki oznaczają ostrzeżenie o zbyt małej ilości zasobów

Fig. 6. Changes in the amount of coal stored in the stockyard (Pniówek).
Yellow icons indicate a warning about insufficient resource

procedura ostrzega o zbyt niskiej/wysokiej wartości parametru jakościowego. Na potrzeby tej procedury, dla każdego parametru jakościowego zdefiniowano wartości wskaźnika Δ, który określa dopuszczalne zmiany wartości parametrów jakościowych. W sytuacji, gdy następuje zmiana bezwzględnej wartości parametru jakościowego węgla o wartość większą niż Δ, wówczas system informuje użytkownika o wystąpieniu potencjalnego pogorszenia jakości węgla lub też błędnie wpisanej wartości do bazy (np. poprzez błąd osoby wpisującej dane do systemu dyspozytorskiego). Rozwinięciem powyższego

algorytmu jest procedura ostrzegająca o bardzo dużej zmianie wartości parametru. System informuje użytkownika w sytuacji, gdy wartość bezwzględna parametru jakościowego będzie o $u\Delta$ (u – współczynnik liczbowy, oszacowany przez IChPW na podstawie analizy statystycznej danych użytych do testowania Systemu) wyższa od poprzedniej, celem zidentyfikowania dużej zmiany jakości węgla lub też błędu popełnionego podczas przeprowadzenia analiz. Ostatnia z procedur ostrzegawczych informuje o pogorszeniu jakości węgla i dotyczy ona sytuacji, gdy niekorzystna zmiana wartości parametru jakościowego utrzymuje się przez N przychodów. Algorytm ten jest uruchamiany, gdy system stwierdzi, iż trend zmian wartości parametru jakościowego jest bardziej intensywny w stosunku do założonej tendencji, tzn. gdy współczynnik nachylenia linii trendu okaże się wyższy od wartości założonej.

Moduł 2 – Prognozowanie jakości koksu

Głównym zadaniem realizowanym w module 2 jest prognozowanie wskaźników jakościowych koksu. Aktualnie prognozowane są wartości następujących parametrów:

– reakcyjność, CRI,
– wytrzymałość koksu poreakcyjnego, CSR,
– wytrzymałość mechaniczna koksu, M_{40},
– ścieralność koksu, M_{10},
– zawartość siarki w koksie, S_t^d,
– zawartość popiołu w koksie, A^d,
– zawartość fosforu w koksie, P^d,
– zawartość chloru w koksie, Cl^a,
– zawartość alkaliów w koksie, N_2O+K_2O,
– uzysk koksu.

Należy tutaj mieć na uwadze to, iż konstrukcja systemu umożliwia dodawanie kolejnych parametrów oraz modeli, które będą je prognozować. Użytkownik ma możliwość prognozowania jakości koksu zarówno dla mieszanki obowiązującej w wybranym dniu (wprowadzonej do systemu dyspozytorskiego przez służby koksowni), jak również dla mieszanki o samodzielnie skonstruowanym składzie, który oprócz węgli dostępnych w danym dniu może uwzględniać również węgle o znanych parametrach jakościowych, lecz niedostępnych danego dnia na składowisku. Jest to bardzo użyteczna funkcja, ponieważ umożliwia ona podjęcie decyzji o przydatności i zakupie takiego węgla na podstawie wiarygodnych obliczeń prognostycznych.

Prognozowanie jakości koksu realizowane jest za pomocą dwóch niezależnych metod:

– poprzez wyliczenie wartości prognozowanych w oparciu o opracowane w IChPW modele matematyczne,
– poprzez wykorzystanie historycznych wartości parametrów jakościowych mieszanek oraz wartości parametrów koksu, który z tych mieszanek był uzyskiwany.

W pierwszym przypadku, do obliczeń system pobiera:

– skład procentowy węgli w mieszance,
– uśrednione wartości parametrów jakościowych węgli na składowisku,
– informacje dotyczące technologii prowadzenia procesu (numer baterii/wieży węglowej, system obsadzania i gaszenia/chłodzenia koksu, czas koksowania i maksymalną temperaturę kanałów grzewczych).

Jako dane wejściowe, na podstawie których wyliczane są wartości wskaźników opisujących jakość koksu, wykorzystywane są wszystkie parametry jakościowe węgli, dla których prowadzone są w Koksowni Przyjaźń SA analizy laboratoryjne. Modele matematyczne wykorzystane w programie można podzielić na dwie grupy:

– klasyczne modele przedstawiane w literaturze, pozwalające prognozować skład chemiczny koksu w oparciu o ogólną zależność [1]:

$$X_{koksu} = f(V^{daf}, X_m, \tau, \rho, B, \varepsilon) \quad (3)$$

gdzie:
X_{koksu} – zawartość: popiołu, chloru, fosforów, siarki lub alkaliów w koksie, %,
X_m – zawartość: popiołu, chloru, fosforów, siarki lub alkaliów w mieszance węglowej, obliczona zgodnie z zależnością (1), %,
V^{daf} – zawartość części lotnych, %,
τ – czas koksowania, godz.,
ρ – gęstość nasypowa wsadu, kgm^{-3},
B – szerokość komory, m,
ε – poprawka, wygenerowana dla każdego parametru niezależnie, charakterystyczna dla danego typu baterii, systemu chłodzenia/gaszenia koksu itp.

– złożone modele dla wskaźników oznaczanych w testach NSC oraz Micum, pozwalające prognozować wartości tych wskaźników w oparciu o ogólne zależności:

$$CRI = f(V^{daf}, CRI_w, A^d, \tau, T, \alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (4)$$

$$CSR = f(V^{daf}, CSR_w, A^d, \tau, T, \alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (5)$$

$$M_{40} = f(V^{daf}, CS^{600}, \tau, T, \alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (6)$$

$$M_{10} = f(V^{daf}, AV, \tau, T, \alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (7)$$

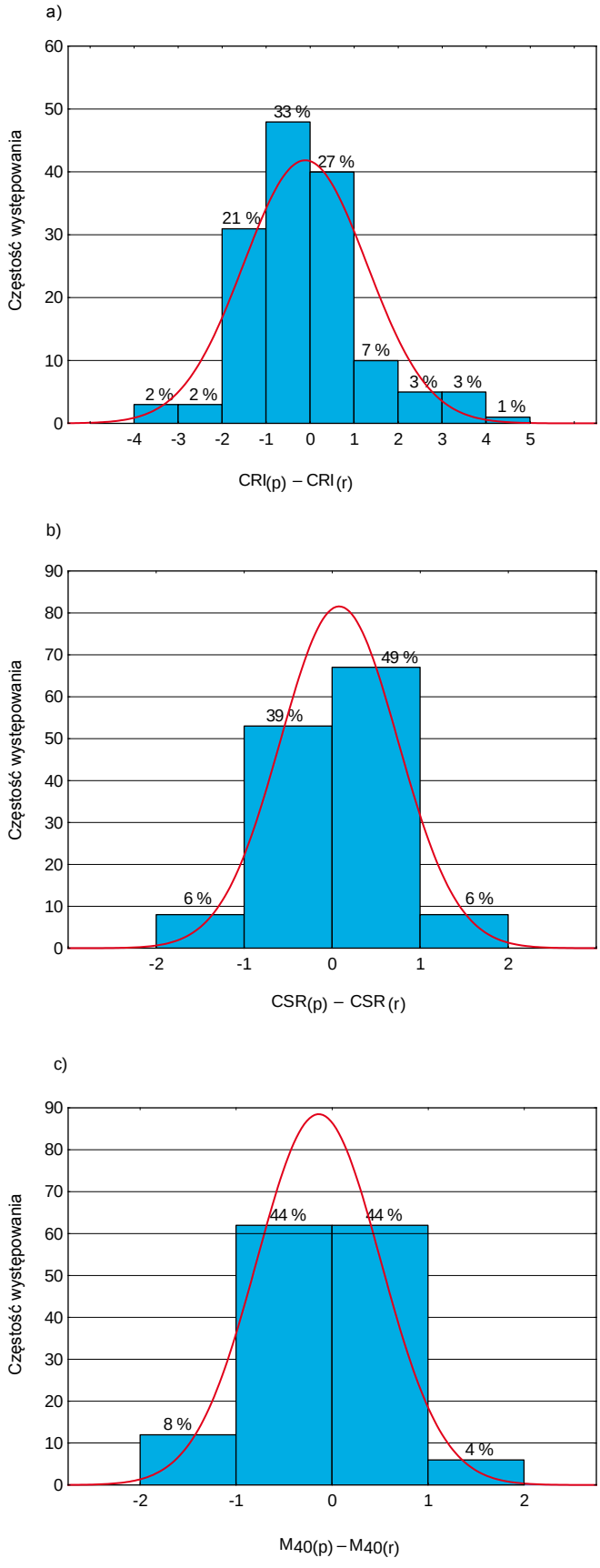
gdzie:
CRI, CSR, M_{40}, M_{10} – wartość odpowiedniego wskaźnika dla koksu, %,
CRI_w/CSR_w – wartości wskaźników CRI/CSR próbek koksu uzyskanych poprzez skoksowanie w instalacji Karbotest pojedynczych węgli wchodzących w skład mieszanki wsadowej, %,
CS^{600} – wartości wskaźników CS^{600} próbek koksu uzyskanych poprzez skoksowanie w instalacji Karbotest pojedynczych węgli wchodzących w skład mieszanki wsadowej, %. CS^{600} jest to wskaźnik odzwierciedlający wytrzymałość koksu „na zimno”, którego oznaczenie opracowane zostało w Koksowni Przyjaźń SA [12],

AV – wskaźnik ścieralności koksu uzyskanego z poszczególnych węgli wchodzących w skład mieszanki wsadowej, oznaczony zgodnie z [13], %,
V^{daf} – zawartość części lotnych, %,
τ – czas koksowania, godz.,
T – temperatura w kanałach grzewczych, °C,
α, β, γ, δ – poprawki charakterystyczne dla danego typu baterii, systemu chłodzenia/gaszenia koksu, systemu obsadzania komór itp.

W wyniku przeprowadzonych z wykorzystaniem danych historycznych Koksowni Przyjaźń SA symulacji uzyskano bardzo dużą zgodność pomiędzy wyliczanymi i rzeczywistymi wartościami parametrów jakościowych koksu. Rysunek 7 przedstawia histogramy rozkładów reszt, rozumianych jako wartości nieunormowanych różnic pomiędzy rzeczywistymi i wyliczonymi wartościami parametrów jakościowych koksu. Wykresy zostały przygotowane dla parametrów jakościowych, których zmienność wartości mieściła się w następujących przedziałach: CRI_{min}=24.0, CRI_{max}=35.6, CSR_{min}=54.8, CSR_{max}=67.6, $M_{40(min)}$=79.2, $M_{40(max)}$=84.3. Należy jednocześnie zauważyć, iż dla parametrów jakościowych węgli, które są rzadko oznaczane, tj. rzadziej niż dla co dziesiątej dostawy (dla analizowanego zbioru danych były to parametry określające zawartość chloru i fosforu), dokładność prognozy jest zdecydowanie gorsza. W przypadku drugiej metody, prognozowanie odbywa się na zasadzie wyszukania w bazie danych mieszanek o podobnych właściwościach do aktualnie obowiązującej i przyporządkowaniu do tej mieszanki wartości parametrów jakościowych koksu, uzyskanych dla wyszukanego w poprzednim kroku zbioru mieszanek. Cała procedura wykorzystuje szereg metod statystycznych, dzięki którym uzyskano jeszcze wyższą, w stosunku do metody korzystającej z modeli matematycznych, zgodność pomiędzy wyliczanymi i rzeczywistymi wartościami parametrów jakościowych koksu. W przypadku parametrów CRI oraz CSR różnice pomiędzy wartościami prognozowanymi i rzeczywistymi nie przekraczają 1.5 punktu procentowego.

W celu ułatwienia użytkownikowi kontrolowania procesu produkcyjnego, w module 2 zaimplementowano następujące procedury ostrzegawcze:

- system informuje w sytuacji, gdy wartości prognoz wyliczone zostaną w oparciu o zasymulowaną wartość parametru jakościowego a_k (wzór 2), gdzie maksymalna wartość k, powyżej której uruchamiana zostaje procedura, została określona na podstawie testów prowadzonych w IChPW i wynosi 10 (rys. 8 – wszystkie wyniki w kolumnie „wyliczone" oznaczone na czerwono, oznaczają że dany parametr jakościowy został obliczony o zasymulowane dane, spełniające wyżej opisane kryterium),
- system informuje, jaką ilość danej mieszanki o zadanym składzie można komponować w oparciu o aktualne zasoby zgromadzone na składowisku,
- system informuje użytkownika, jeśli wybrany do składu mieszanki węgiel jest niedostępny na składowisku,
- system informuje komunikatem BRAK, jeśli z jakichś powodów nie może wyliczyć wartości parametru.



Rys. 7. Różnica pomiędzy wartościami prognozowanymi (p) oraz rzeczywistymi (r) dla parametrów: a) CRI, b) CSR, c) M_{40}

Fig. 7. Difference between predicted (p) and actual (r) values: a) CRI, b) CSR, c) M_{40}

„Historyczna" – prognoza określona poprzez analizę danych historycznych zgromadzonych w bazie

„Wyliczona" – prognoza wyznaczona z wykorzystaniem modeli matematycznych

„Z dnia" – rzeczywista wartość parametru, oznaczona na drodze analizy laboratoryjnej

„Średnia" – rzeczywista wartość parametru, wyznaczona jako średnia z wszystkich wartości uzyskanych dla koksu z mieszanki, w pełnym czasie jej obowiązywania

Rys. 8. Wyniki prognozy jakości koksu

Fig. 8. A results of coke quality prediction

Moduł 3 – Optymalizacja składu mieszanki w aspekcie ilościowym i ekonomicznym

W module 3 opisywany system proponuje składy mieszanek wsadowych, z których można wyprodukować koks o zadanej jakości, przy założeniu jednego z trzech warunków:

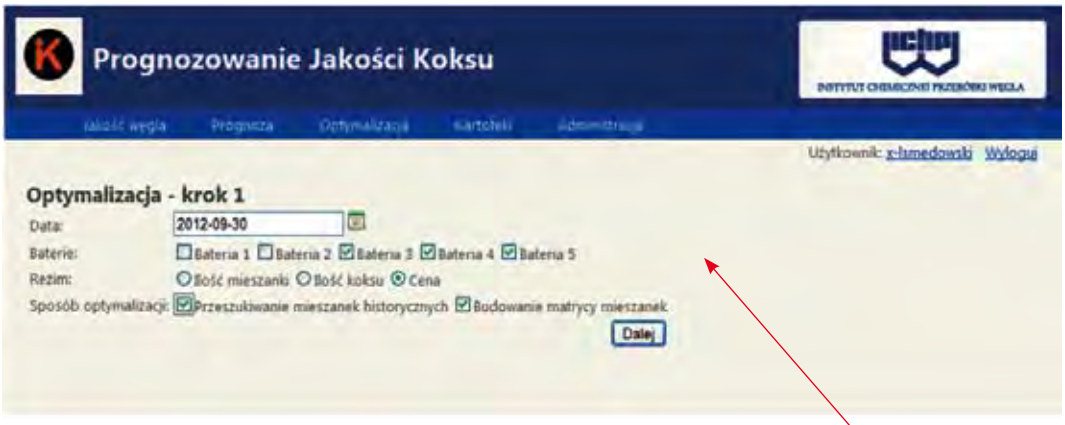
- minimalizacji ceny mieszanki,
- maksymalizacji ilości mieszanki,
- maksymalizacji ilości koksu, który można z danej mieszanki wyprodukować.

Po wybraniu baterii koksowniczych, dla których ma się tyczyć optymalizacja (rys. 9a), a także parametrów jakościowych, pod kątem których definiowana jest jakość koksu (algorytm zakłada wybór co najmniej dwóch parametrów) oraz określeniu ich pożądanej wartości (rys. 9b) użytkownik ma możliwość przeprowadzenia optymalizacji na dwa sposoby, tj.:

- poprzez analizę danych historycznych,
- poprzez funkcję, która polega na tym iż System samodzielnie konstruuje składy mieszanek.

W pierwszym przypadku, system przeszukuje bazę danych pod kątem koksu o zadanych parametrach jakościowych, następnie dla mieszanek przyporządkowanych do wyselekcjonowanych w poprzednim kroku prób przelicza prognozowaną jakość koksu w oparciu o aktualne wartości parametrów jakościowych węgli, poddaje uzyskane wyniki analizie statystycznej i wyświetla maksymalnie 10 mieszanek, które w największym stopniu spełniają zadane kryterium ilościowe lub cenowe (rys. 10). Dla każdej tak wybranej mieszanki użytkownik ma możliwość zapoznania się z prognozowanymi parametrami jakościowymi koksu, może również dokonać korekty składu (rys. 10 – korzystając z funkcji PRZELICZ), a tym samym wyniku prognozy. W przypadku drugiego sposobu optymalizacji, system sam buduje wszystkie możliwe do skonstruowania z zadanym krokiem (np. 2 %), w oparciu o dostępne na składowisku węgle, składy mieszanek a następnie wylicza dla nich prognozowane wartości parametrów koksu, który można z nich uzyskać. Jako wynik, wyświetlone zostają te mieszanki, dla których spełnione są założone parametry jakościowe uzyskiwanego koksu i jednocześnie w największym stopniu spełniają wybrane kryterium optymalizacyjne (rys. 11). W procedurze tej ponadto użytkownik ma możliwość zadeklarowania chęci wprowadzenia do mieszanki

a)



Użytkownik może wskazać chęć obsadzenia jedną mieszanką kilku baterii

b)

Rys. 9. Definiowanie sposobu optymalizacji:
a) wybór baterii, metody oraz kryterium (reżimu), b) wybór parametrów i określenie ich pożądanej wartości

Fig. 9. Defining of the optimisation rules:
a) a choice of batteries, optimisation method and optimisation standard, b) choice of quality indices and determination of their desired values

dodatkowego składnika, którego nie ma na składowisku. Jedynym warunkiem jest tutaj konieczność wprowadzenia do systemu wartości parametrów jakościowych takiego składnika. Podobnie, jak w przypadku pierwszego sposobu optymalizacji, również w tym przypadku istnieje możliwość manualnego skorygowania składu mieszanki i ponownego przeliczenia prognozowanych wartości. Ponadto, w przypadku obu funkcji optymalizujących użytkownik może wyliczyć ilość oraz koszty zakupu węgla, który należy zakupić w celu wyprodukowania określonej ilości koksu (rys. 10-11 – funkcja OBLICZ CAŁOŚĆ).

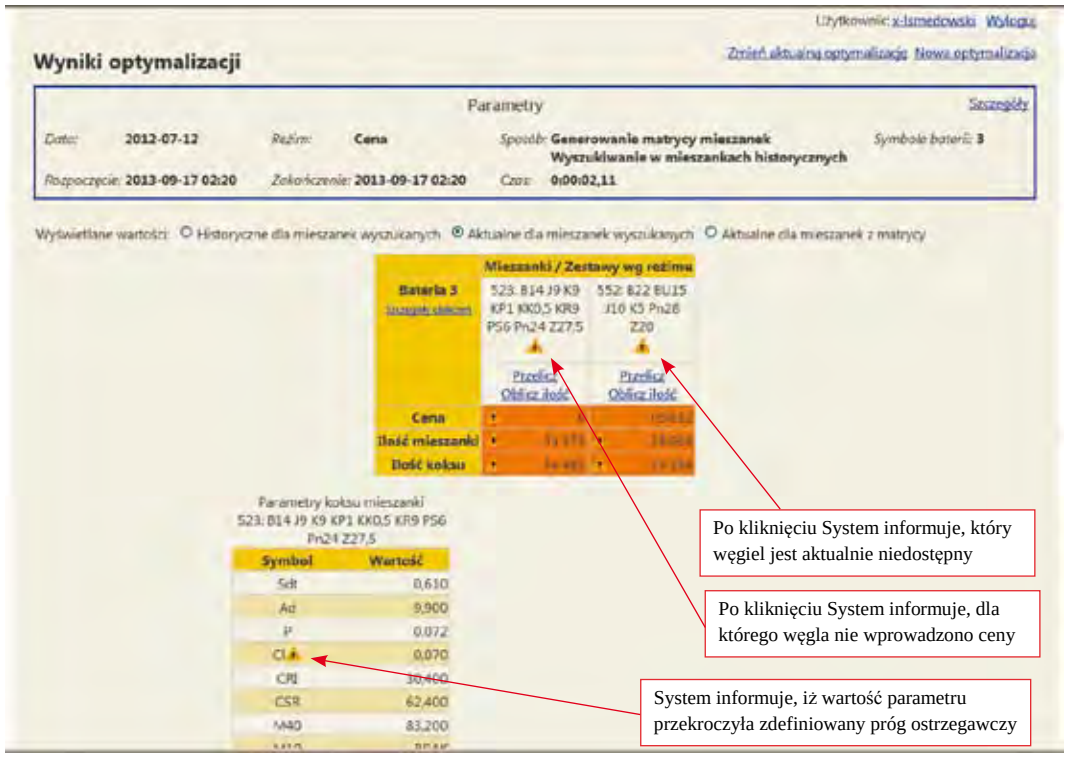
Dla modułu 3 przygotowano następujący zestaw procedur ostrzegawczych:

– system poinformuje, jeśli któryś z parametrów zoptymalizowanej mieszanki będzie zbliżony do granicznej wartości zdefiniowanej w systemie,
– system informuje, jeśli któryś ze składników mieszanki wytypowanej metodą przeszukiwania danych, jest w danym momencie niedostępny na składowisku,
– system informuje, jeśli dla któregoś ze składników nie została wprowadzona do systemu jego cena.

Moduł administracyjny

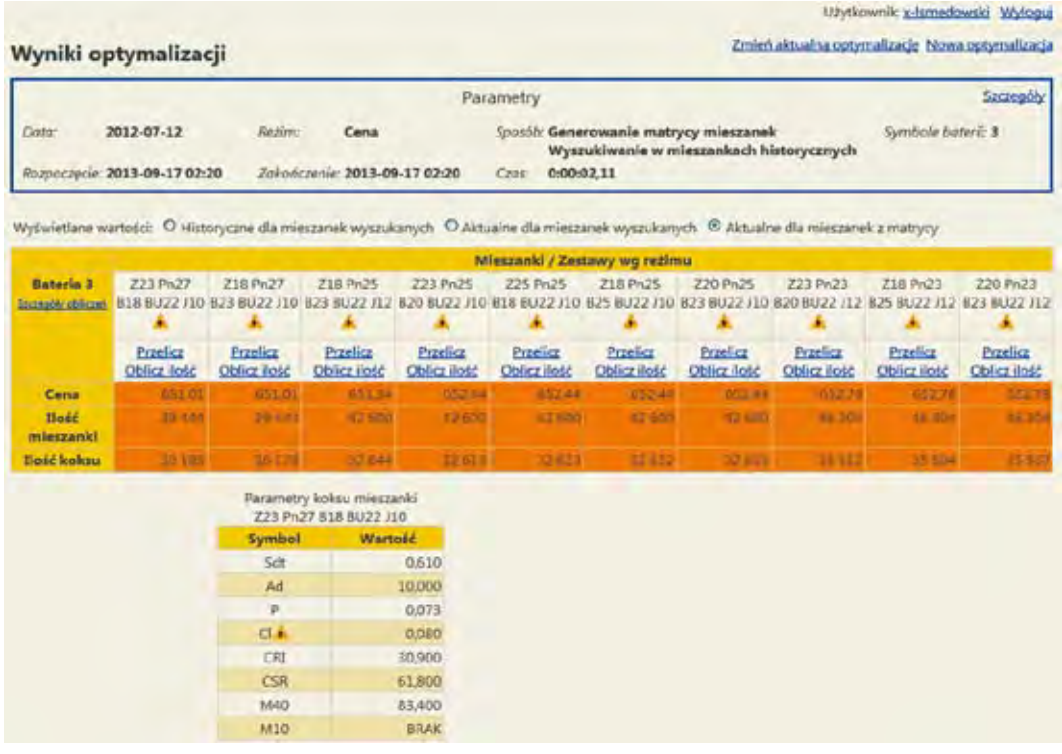
Moduł administracyjny proponowanego systemu, jest jego bardzo istotną częścią, ponieważ oprócz typowych dla każdego programu funkcji administracyjnych zawiera szereg elementów pozwalających dostosować funkcjonalność systemu do dowolnego zakładu koksowniczego. Dostępne są tutaj następujące funkcje:

– dodawanie użytkowników oraz nadawanie im uprawnień do korzystania z poszczególnych modułów i funkcji systemu,



Rys. 10. Wyniki optymalizacji przeprowadzonej metodą przeszukiwania bazy danych

Fig. 10. Results of optimization performed by searching the database method



Rys. 11. Wyniki optymalizacji przeprowadzonej metodą budowania składu mieszanki

Fig. 11. Results of optimization performed by the construction of coal blend composition method

- definiowanie ilości baterii oraz systemów technologicznych (sposób obsadzania, system gaszenia/chłodzenia itp.),
- dodawanie/usuwanie kopalń, z których dostarczany jest węgiel do koksowni,
- dodawanie dodatkowych parametrów jakościowych węgla/koksu (w sytuacji, gdy parametr taki pojawi się w systemie dyspozytorskim),
- definiowanie przesunięcia czasowego pomiędzy pojawieniem się w systemie parametrów jakościowych dla składowiska, parametrów mieszanki i parametrów koksu,
- korygowanie wartości współczynników we wzorach prognostycznych,
- definiowanie progowych wartości parametrów w oparciu o które uruchamiane są procedury ostrzegawcze,
- wprowadzanie/usuwanie z systemu danych jakościowych i cenowych węgli, które potencjalnie będzie można nabyć.

Podsumowanie

Opisane w niniejszej pracy narzędzie informatyczne jest pierwszym i jedynym polskim programem umożliwiającym precyzyjne prognozowanie jakości koksu oraz efektywne wsparcie dla procesu zarządzania produkcją. Na tle systemów pracujących w zagranicznych koksowniach wyróżnia się on dużą dokładnością i przede wszystkim uniwersalnym charakterem, dzięki czemu może zostać on wdrożony w dowolnym zakładzie. Co istotne, modułowa konstrukcja systemu pozwala na jego dalszy rozwój bez konieczności ingerencji w już istniejące elementy. Biorąc pod uwagę brak tego typu systemów informatycznych w polskich zakładach koksowniczych, prezentowany produkt zdaje się być bardzo ciekawą propozycją dla polskiego koksownictwa, ze względu na możliwość zapewnienia bardziej efektywnego i optymalnego wykorzystania krajowych zasobów surowcowych w celu produkcji koksu o pożądanej przez odbiorców jakości. W opinii autorów, system ten ponadto może stać się bardzo istotnym narzędziem integrującym zakłady koksownicze z producentami węgla oraz jednostkami odpowiadającymi za obrót tym surowcem, np. działającymi w jednej grupie kapitałowej. Dzięki możliwości pracy z tym systemem, wszystkie trzy strony będą mieć precyzyjną wiedzę na temat tego, jakie węgle i w jakiej ilości powinny być dostarczane do danej koksowni celem umożliwienia wyprodukowania przez nią koksu spełniającego wymagania ilościowe i jakościowe odbiorcy. W związku z powyższym, można pokusić się o stwierdzenie, iż proponowany system informatyczny jest oryginalnym, unikalnym i nowoczesnym narzędziem, które w niedalekiej przyszłości może zostać wdrożone w każdym krajowym zakładzie koksowniczym, stając się bardzo użytecznym elementem systemu zarządzania produkcją koksu.

Literatura

1. *Mertas B., Kosewska M., Winnicka G., Wróbelska K., Bątorek-Giesa N., Strugała A., Burmistrz P., Misztal E.,* Opracowanie matematycznego modelu prognozowania parametrów jakościowych koksu. Raport wewnętrzny IChPW, Zabrze, 2011.
2. *Bułanow E.A., Błochin W.S., Zinoviewa L.A., Cekom J.B.,* Prognozowanie wytrzymałości koksu wielkopiecowego sucho i mokro chłodzonego. Koks i Chimija, 2002, nr 1, s. 13.
3. *Machek V., Rubicek V., Kret J., Bilik J.,* Coke quality inspection and control at the Nova Hut Ostrava based on the AI-Neuron expert system. 4th International Cokemaking Congress, Paris, 2000, Proceedings, t. 1, s. 38.
4. *Arcer A.S.,* Prognoza wysokotemperaturowych właściwości koksu w oparciu o petrograficzne parametry mieszanki węglowej, Koks i Chimija, 2001, nr 11, s. 13.
5. *Zieliński H.,* Koksownictwo, Wyd. Śląsk, Katowice, 1986.
6. *Borkowski W.*, Próba wyprowadzenia algorytmu dla celów prognozowania jakości koksu na podstawie znajomości parametrów węgla wsadowego cz.I. Koks Smoła Gaz, 1972, nr 7-8, s. 197.
7. *Borkowski W.*, Próba wyprowadzenia algorytmu dla celów prognozowania jakości koksu na podstawie znajomości parametrów węgla wsadowego cz. II. Koks Smoła Gaz, 1972, nr 9, s. 251.
8. *Alvarez R., Diéz M.A., Barriocanal C., Diaz-Faes E., Cimadevilla J.*, An approach to blast furnace coke quality prediction. Fuel 2007, nr 86, s. 2159.
9. *Falk E., Plate W., Simonis W.*, Prognozowanie wytrzymałości mechanicznej M40 i ścieralności M10 koksu ubijanego systemu napełniania komór. Glückauf-Forschungshefte, 1972, nr 6, t. 33, s. 234.
10. *Eremin I.W., Gagarin S.G.*, Prognozowanie mieszanek wsadowych w oparciu o model petrograficzny. Koks i Chimija, 1992, nr 12, s. 12.
11. *Stankiewicz A.S.*, Ustalanie składu mieszanek wsadowych i prognozowanie jakości koksu. Koks i Chimija, 1988, nr 9, s. 11.
12. Praca niepublikowana „Opis badania parametru CS600 koksu z instalacji KARBOTEST" – Instrukcja własna, Koksownia Przyjaźń S.A.
13. ISO Standard 18894:2006 „Coke – Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR)".

Praca wykonana w ramach projektu kluczowego nr POIG.01.01.02-24-017/08 „Inteligentna koksownia spełniająca wymagania najlepszej dostępnej techniki", dofinansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI
UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ ROZWOJU REGIONALNEGO