

Władysław GAJEWSKI

Politechnika Częstochowska, Częstochowa

## ZASTOSOWANIA FLUIDYZACJI

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono te rozwiązania, które znalazły najszerze zastosowania, a także te, które były przedmiotem badań autora. Omówiono więc: katalityczny kraking ropy naftowej, transport fluidalny, suszarki fluidyzacyjne, obróbkę cieplną i cieplno-chemiczną metali, fluidyzacyjną nagrzewnicę dmuchu wielkopieczowego oraz kotły fluidyzacyjne.

## APPLICATIONS OF FLUIDIZATION

**Summary.** The paper includes applications commonly useful and these which have been the object of autor's research.

The following processes are also presented: catalytic cracking of petroleum, pneumatic conveying, fluidized driers, heat and heat-chemical treatment of metals, fluidized hot-blast stove and fluidized bed boilers.

### 1. Wprowadzenie

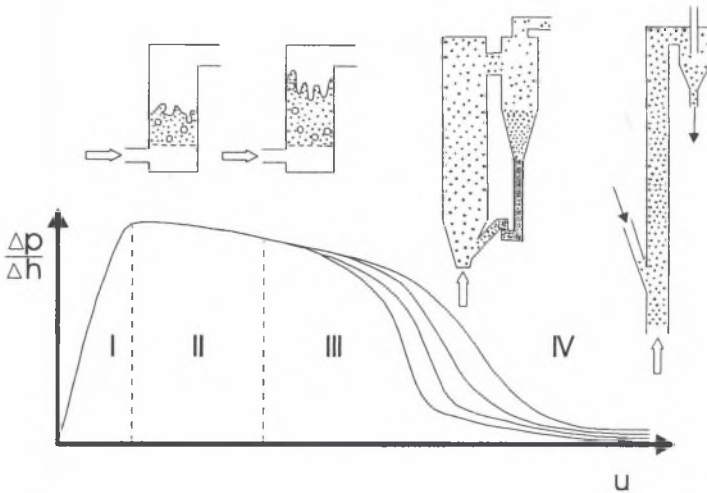
W ciągu 50 lat, jakie minęły od pierwszego przemysłowego wdrożenia fluidyzacji (katalityczny kraking ropy naftowej), znalazła ona szerokie zastosowanie w różnorodnych dziedzinach techniki [1].

Fluidyzację stosuje się przy realizacji zarówno procesów fizycznych, jak i chemicznych. Przykładem fluidalnych procesów fizycznych jest transport, suszenie oraz separacja materiałów sypkich, a także liczne zastosowania w wymianie ciepła.

Procesy chemiczne prowadzone w warstwie fluidalnej wygodnie podzielić na procesy przetwarzania ziaren materiału i procesy przetwarzania gazów. Do pierwszych można zaliczyć: zgazowanie i spalanie paliw, prażenie piritów oraz rud żelaza, produkcję wapna a także tlenków metali. Do drugich odnoszą się katalityczne i niekatalityczne procesy prowadzone w

warstwie fluidalnej z zastosowaniem fazy gazowej, np.: produkcja acetyleny, nienasyconych aldehydów, amoniaku. Technika fluidalna stosowana jest do generacji odpowiednich atmosfer wykorzystywanych do obróbki cieplno-chemicznej stopów metali.

Ostatnio obserwuje się dynamiczny rozwój zastosowań w energetyce do budowy kotłów fluidyzacyjnych [2]. Ewolucję struktury warstwy fluidalnej przedstawiono na rys. 1 [3].



Rys. 1. Ewolucja warstwy fluidalnej, ze wzrostem prędkości powietrza fluidyzującego. I-filtracja, II-fluidyzacja pęcherzowa, III-fluidyzacja cyrkulacyjna, IV-transport pneumatyczny

Fig. 1. An evolution of fluidized bed versus increasing air velocity. I-filtration, II-bubbling fluidization, III-circulating fluidization, IV-pneumatic conveying

Jak widać, wzrost prędkości powietrza podawanego do warstwy powoduje intensyfikację procesów mieszania wywołanego wzrostem pęcherzy gazowych. Wzrasta również wysokość warstwy. Przy określonej prędkości ziarna materiału sypkiego wypełniają całą kolumnę. Wzrasta przy tym intensywność unoszenia ziaren, która osiąga poziom wymagający wychwytywania ziaren na wylocie z kolumny i recyrkulację ich do warstwy. Bez takiej recyrkulacji cała masa materiału sypkiego, stanowiącego warstwę, zostałaby uniesiona z kolumny.

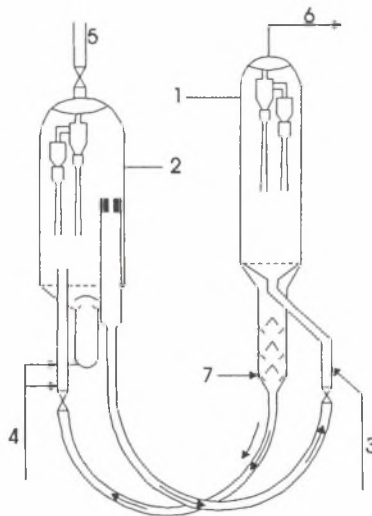
Dynamiczny ruch materiału sypkiego powoduje intensyfikację procesów wymiany ciepła i masy, stwarzając znakomite warunki realizacji szeregu procesów technologicznych.

W pracy zostaną omówione te rozwiązania, które znalazły najszersze zastosowania, a także te, które były przedmiotem badań autora.

## 2. Katalityczny kraking

Katalityczny kraking jest powszechnie stosowany przy przeróbce ropy naftowej. Do drugiej wojny światowej kraking prowadzony był w reaktorach z warstwą nieruchomą katalizatora. Olbrzymie zapotrzebowanie na paliwa ciekłe dla potrzeb trwającej wojny wymusiło opracowanie bardziej efektywnych metod. Najbardziej efektywna okazała się technologia fluidalna. Pośpieszne jej wdrożenie przyczyniło się do olbrzymiego wzrostu wydajności instalacji, przy jednoczesnym polepszeniu jakości otrzymywanego paliwa. Ten sukces stał się podstawą do zastosowania fluidyzacji w innych gałęziach przemysłu.

Schemat układu aparatury do katalitycznego krakingu ropy naftowej przedstawiono na rys.2 [4]. Ropa naftowa wstępnie podgrzana styka się w przewodzie z gorącym katalizatorem i ulega odgazowaniu. Mieszanina tych par z ziarnami katalizatora wpływa przez dno perforowane do wnętrza reaktora, gdzie następuje reakcja krakowania w gęstej fazie fluidalnej. Reakcji tej towarzyszy osiadanie koksu na katalizatorze. Gazowe produkty krakowania opuszczają aparat i kierowane są do frakcjonowania. Zatruty osadami koksu katalizator przetransportowany jest za pomocą powietrza (transport pneumatyczny) do regeneratora, gdzie następuje



Rys.2. Schemat instalacji do fluidalnego krakingu ropy naftowej: 1-reaktor, 2-regenerator, 3-doprowadzenie ropy naftowej, 4-doprowadzenie powietrza, 5-odprowadzenie produktów regeneracji, 6-odprowadzenie produktów krakingu, 7-doprowadzenie pary

Fig.2. Scheme of a plant for fluidized cracking of petroleum. 1-reactor, 2-regenerator, 3-petroleum feeder, 4-air inlet, 5-output of regeneration products, 6-output of cracking products, 7-steam input

wypalanie koksu. Zregenerowany katalizator rurą przelewową przesypuje się z regeneratora do przewodu doprowadzającego ropę do reaktora. Zarówno w reaktorze, jak i w regeneratorze zainstalowane są cyklony wewnętrzne, wyłapujące unoszony katalizator z gazów odlotowych.

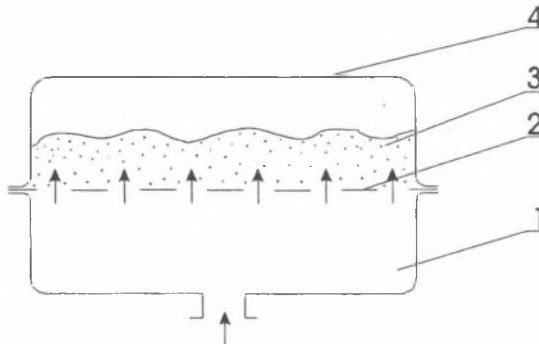
Instalacja średniej wydajności zawiera ok. 500 ton katalizatora. Możliwość łatwej cyrkulacji tak wielkich mas drobno zmielonego katalizatora stanowi główną zaletę tej technologii.

### 3. Transport fluidalny

Jednym z ważniejszych problemów w szeregu technologiach jest transport materiałów sypkich. Transport ten można z powodzeniem zrealizować przy zastosowaniu warstwy fluidalnej. Warstwa fluidalna pod wieloma względami przypomina ciecz i z tego powodu stwarza znakomite warunki organizacji transportu pionowego i poziomego materiałów sypkich. Teoria oraz praktyczne rozwiązania instalacji tego typu są tematami licznych podręczników poświęconych fluidyzacji.

Na osobną uwagę zasługują fluidyzacyjne ryny transportujące (ryny areacyjne) [5], które znalazły szerokie zastosowanie zwłaszcza w przypadkach połączenia transportu, np. z suszeniem czy innymi procesami. Zaletą takiego sposobu transportu materiału są proste konstrukcje ryny, jak i sposób regulacji, niewielkie koszty inwestycyjne, mała prędkość liniowa przemieszczającego się materiału, co oznacza małą erozję ryny, a tym samym jej długowieczność. W rezultacie otrzymujemy transport odznaczający się dużą niezawodnością i wydajnością przy niewielkim zużyciu energii.

Schemat konstrukcji ryny transportującej przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny ryny areacyjnej: 1-skrzynia powietrzna, 2-ruszt rozdzielczy gazu, 3-materiał sypki, 4-filtr tkaninowy

Fig. 3. Cross section of an aeration runner: 1-air box, 2-grate, 3-loose material, 4-cloth filter

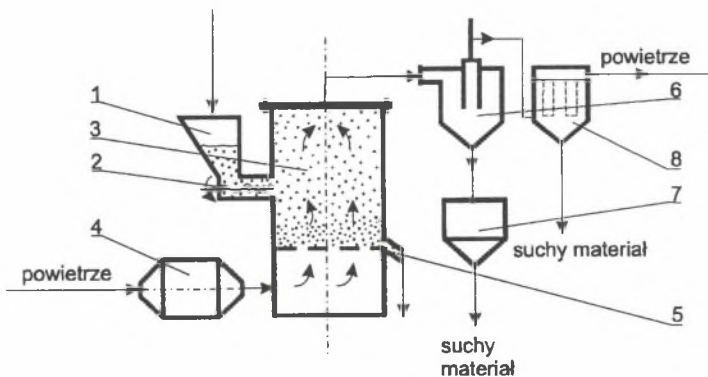
Minimalny kąt pochylenia rynny wynosi  $2,5^\circ$ , zwykle jest on bliski  $4^\circ$ . Rynna może być hermetycznie zamknięta (jeśli gaz fluidyzujący podlega dalszej obróbce) lub może być przykryta tkaniną filtracyjną na całej długości rynny. Zwykle odległość transportu nie przekracza 1000 m, przy prędkości przemieszczania się ziaren  $0,5 + 2,5$  m/s, w zależności od grubości warstwy i kąta pochylenia rynny.

#### 4. Suszarki fluidyzacyjne

Suszarki fluidyzacyjne stanowią odrębną grupę suszarek odznaczających się prostotą konstrukcji i możliwością uzyskiwania dużych wydajności, przy zachowaniu produktu o równomiernej wilgotności [6].

W zależności od liczby komór suszenia suszarki fluidyzacyjne dzielimy na jednokomorowe i wielokomorowe.

Suszarki jednokomorowe są najprostsze pod względem konstrukcji i eksploatacji - charakteryzują się najlepszymi wskaźnikami ekonomicznymi, nadają się do pełnej automatyzacji. Podstawową wadą jest nierównomierne wysuszenie materiału. Suszarki wielokomorowe eliminują tę wadę. Można je podzielić na suszarki z szeregowym przemieszczaniem się materiału suszonego, z podażą gazu suszącego osobno do każdej z komór. W suszarkach przeciwprądowych suszony materiał przepływa w przeciwprądzie do gazu suszącego. Powoduje to radykalne rozwiązanie równomierności suszenia.



Rys.4. Suszarka fluidyzacyjna: 1-kosz zasypowy, 2-podajnik, 3-komora suszarki, 4-podgrzewacz powietrza, 5-odprowadzenie wysuszonego materiału, 6-cyklon, 7-zbiornik, 8-filtr workowy

Fig.4. Fluidized drier: 1-charge basket, 2-feeder, 3-drier's chamber, 4-air preheater, 5-carrying away of dry material, 6-cyclone, 7-container, 8-bag filter

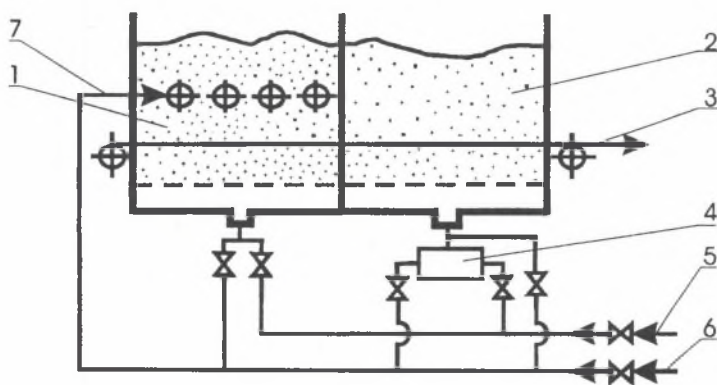
Suszarki fluidyzacyjne można również podzielić ze względu na kształt komory suszalniczej. Mogą być suszarki o stałym przekroju wzdłuż wysokości komory oraz suszarki, których przekrój poprzeczny zwiększa się wraz z wysokością. Oba typy suszarek mogą mieć przekroje kołowe lub prostokątne.

Schemat suszarki do suszenia piachu przedstawiono na rys.4.

## 5. Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna metali

Początki badań nad wykorzystaniem fluidyzacji do obróbki cieplnej sięgają 1957 roku. Znakomite warunki wymiany ciepła i masy w warstwie fluidalnej spowodowały szybki rozwój tej technologii [7].

Przy odpowiednim doborze materiału sypkiego, stanowiącego warstwę fluidalną, można zapewnić temperaturę w aparacie do 1200°C. Szybkość nagrzewania i chłodzenia można zmieniać w szerokich granicach przez zmianę wielkości ziaren i szybkości gazu fluidyzującego. Jeśli przerwać fluidyzację, to w wyniku niskiego przewodnictwa cieplnego warstwy będzie ona - jak również obrabiany cieplnie element - utrzymywana w prawie niezmienniej temperaturze. Możliwość łatwego zapewnienia warunków izotermicznych obok szybkiej zmiany temperatury w wyniku doprowadzenia lub odprowadzenia ciepła pozwala prowadzić złożone rodzaje obróbki cieplnej: nagrzewanie stopniowe, hartowanie izotermiczne, obróbkę cieplną stali szybkoctnących. W tym samym urządzeniu można przeprowadzać różne operacje obróbki cieplnej,



Rys.5. Piec dwukomorowy do patentowania drutu: 1-komora nagrzewania 950 ±1100°C, 2-komora chłodzenia 660°C, 3-drut patentowany, 4-komora spalania, 5-wlot gazu, 6-wlot powietrza, 7-wlot powietrza wtórnego

Fig.5. Two chamber oven for wire patenting: 1-heating chamber 950 ±1100°C, 2-cooling chamber 660°C, 3-patented wire, 4-combustion chamber, 5-gas inlet, 6-air inlet, 7-secondary air inlet

nawet przeciwstawne, jak nagrzewanie i hartowanie. Zastosowanie warstwy fluidalnej okazało się szczególnie efektywne przy szybkościowym nagrzewaniu wyrobów drobnych, gdyż znaczenie wysokiego współczynnika wymiany ciepła maleje ze wzrostem grubości nagrzewanych przedmiotów.

Stosując dwustopniowe spalanie gazu podawanego do warstwy fluidalnej można w niej wytwarzać odpowiednie atmosfery, co umożliwia prowadzenie obróbki cieplno-chemicznej. Przykładem zastosowania warstwy fluidalnej do obróbki cieplnej jest dwukomorowy piec do patentowania drutu, rys.5.

## 6. Fluidyzacyjna nagrzewnica dmuchu wielkopieczowego

Fluidyzacyjna nagrzewnica dmuchu wielkopieczowego składa się z dwóch kolumn fluidyzacyjnych [8]. Jedna z kolumn spełnia rolę komory spalania gazu wielkopieczowego, druga natomiast rolę komory grzejnej. Komora ta wyposażona może być w dwie komory usytuowane jedna nad drugą. W każdej komorze znajduje się warstwa materiału sypkiego, spoczywającego na porowatym dnie, przy czym obie komory połączone są przesypem dla materiału sypkiego. W ten sposób można organizować przeciwwądowną wymianę ciepła.

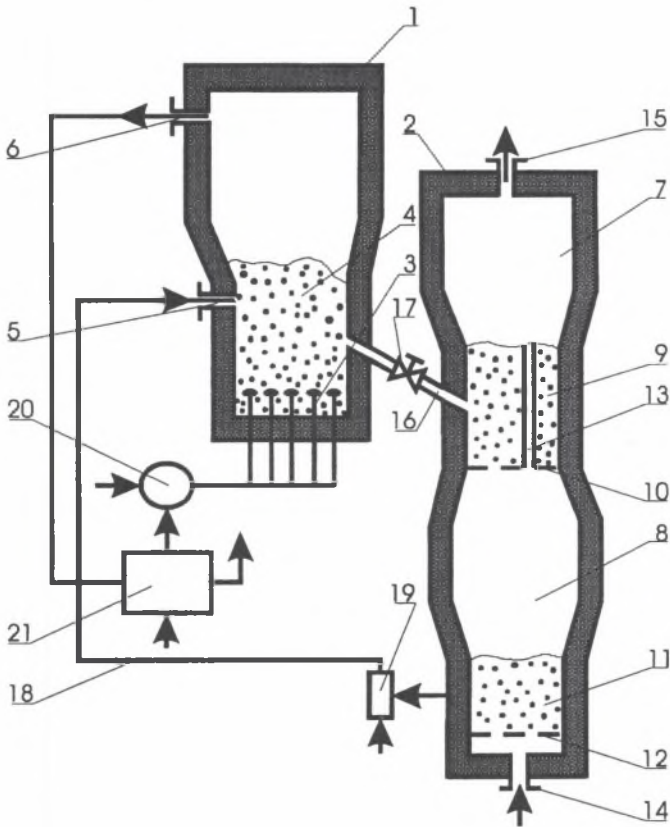
Obie kolumny połączone są ze sobą przesypem, wyposażonym w zasuwę regulującą przepływ nagrzewanego materiału sypkiego z pieca do górnej części kolumny grzejnej. Powrót oziębionego materiału sypkiego realizowany jest za pomocą transportu pneumatycznego. Tak skonstruowana nagrzewnica pracuje w sposób ciągły, produkując dmuch o niezmienniej temperaturze, wyższej od temperatury dmuchu uzyskiwanej w nagrzewnicy Cowpera.

Schemat nagrzewnicy przedstawia rys.6.

## 7. Kotły fluidyzacyjne

Kotły fluidyzacyjne umożliwiają rozwiązanie dwóch ważnych problemów polskiej energetyki [3]:

- Ograniczenie emisji zanieczyszczeń środowiska powstających w procesie spalania węgla.
- Spalanie złej jakości paliw, w tym paliw odpadowych powstających w procesie wzbogacania węgla.



Rys. 6. Fluidyzacyjna nagrzewnica dmuchu wielkopiecowego: 1-komora spalania, 2-komora grzejna, 3-kołpaki paliwowe, 4-materiał syпки, 5-króciec doprowadzający materiał syпки i powietrze wtórne, 6-króciec odprowadzający spaliny, 7,8-komory kolumny grzejnej, 9,11-materiał syпки komór grzejnych, 10,12-dna sitowe komór grzejnych, 13-rura przelewowa, 14-króciec doprowadzający zimny dmuch, 15-króciec odprowadzający gorący dmuch, 16-rura przesypu, 17-zasuwa regulacyjna, 18-rura transportu pneumatycznego, 19-ejektor, 20-mieszalnik gazu i powietrza pierwotnego, 21-przeponowy podgrzewacz powietrza

Fig. 6. Fluidized hot-blast stove: 1-combustion chamber, 2-heating chamber, fuel caps, 4-loose material, 5-pipe supplying solid phase and secondary air, 6-pipe carrying away the flue gas, 7,8-chambers of heating riser, 9,11-loose material of heating chambers, 10,12-perforated bottom of heating chambers, 13-Flow-off pipe, 14-pipe of cool blast, 15-hot blast pipe, 16-pour-off pipe, 17-control valve, 18-pneumatic conveying pipe, 19-ejector, 20-gas and primary air mixer, 21-membrane air preheater

Wśród licznych konstrukcji kotłów fluidyzacyjnych z warstwą pęcherzową można wyróżnić następujące typy instalacji:

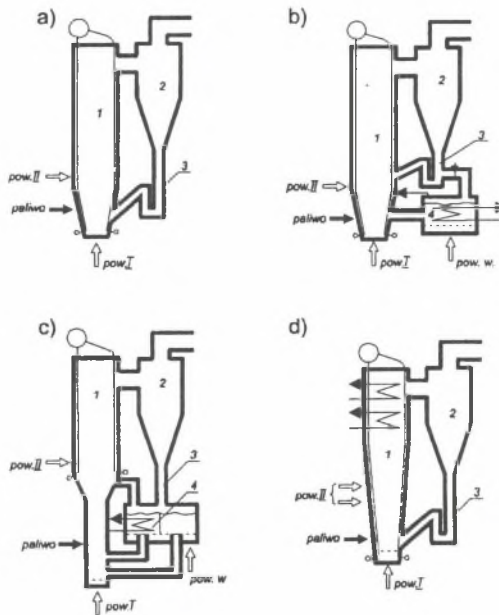
- Kotły fluidyzacyjne z wysokotemperaturową warstwą fluidalną.
- Kotły fluidyzacyjne z pęcherzową warstwą fluidalną.
- Kotły fluidyzacyjne wielowarstwowe.



Technologia spalania węgla w pęcherzowej warstwie fluidalnej ma swoje ograniczenia, odnoszące się głównie do:

- znacznych strat niecałkowitego spalania, zmuszając do stosowania kłopotliwego dopalania lotnego koksiku,
- skomplikowanego, a więc zawodnego systemu zasilania paliwem i sorbentem siarki,
- stosunkowo dużej wartości ilorazu  $Ca/S = 2,5 \div 3,5$ , wymagającego dostarczenia znacznych mas dolomitu,
- trudności z zapewnieniem dostatecznie czułej i niezawodnej regulacji paleniska.

Nowa generacja kotłów fluidyzacyjnych, opartych na technice fluidyzacji cyrkulacyjnej, pozwoliła pokonać ograniczenia warstw pęcherzowych oraz dała szereg nowych możliwości organizacji procesu spalania, spełniającego współczesne wymagania. Dotychczas rozwijane konstrukcje kotłów cyrkulacyjnych można zgrupować w cztery kategorie, schematycznie przedstawione na rys. 7.



Rys. 7. Kotły fluidyzacyjne: a-kocioł typu Ahlstrom, b-kocioł typu Lurgi, c-kocioł z binarną warstwą fluidalną, d-kocioł z paleniskiem Circofluid; 1-komora paleniskowa, 2-cyklon, 3-zamknięcie syfonowe, 4-wymiennik ciepła

Fig. 7. Fluidized bed boilers: a) Ahlstrom type, b) Lurgi type, c) Multi-Solid type, d) Circofluid type; 1- combustion chamber, 2-cyclone, 3-J-valve, 4-heat exchanger

## LITERATURA

1. Fan L.S.: Summary paper on fluidization and transport phenomena. Powder Technology, 88, 1996, pp. 245-253.
2. Kwauk M., Li J.: Fluidization regimes. Powder Technology, 87, 1996, pp.193-202.
3. Gajewski W. (red.): Ekologiczne aspekty przetwarzania energii. Ekspertyza KTiS PAN, Warszawa 1996.
4. Ciborowski J.: Fluidyzacja. PWT, Warszawa 1957.
5. Razumow J.M.: Fluidyzacja i transport pneumatyczny materiałów sypkich. WNT, Warszawa 1975.
6. Pikoń J.: Aparatura Chemiczna. PWN, Warszawa 1983.
7. Gajewski W., Jonkisz W.: Zastosowanie warstwy fluidalnej do obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej metali. Problemy projektowe nr 9, 1969.
8. Gajewski W.: Patent PRL nr 92337, Warszawa 1979.

Recenzent: Prof. dr inż. Zbigniew Piątkiewicz

Wpłynęło do Redakcji: 10.10.1997 r.

**Abstract**

The catalytic cracking has been the first successful industrial application of fluidization. Due to this process the efficiency and the quality of received fuel have increased. The pneumatic conveying is particularly useful when it can be joined up with a physico-chemical process, such as, for instance: drying, heating or cooling of loose material. The fluidized dryers have been widely applied because of their high efficiency and uniform drying. The heat treatment in the fluidized bed should be generalized because of the possibility of wide changes of heating and cooling coefficient of materials worked up. The hot-blast stove enables increasing of blast temperature without any changes of its department. The fluidized bed boilers are actually the most quickly developing technology of combustion, which enables solving of important problems in Polish energy sector.