

## SUSZENIE WYROBÓW CERAMICZNYCH W WARUNKACH NIESTACJONARNYCH

Stefan Jan KOWALSKI\*, Andrzej PAWŁOWSKI\*\*

\* Politechnika Poznańska, Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej  
Pl. Marie Skłodowskiej Curie 2, 60-965 Poznań, e-mail: Stefan.J.Kowalski@put.poznan.pl

\*\* Politechnika Poznańska, Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej  
Pl. Marie Skłodowskiej Curie 2, 60-965 Poznań, e-mail: e-mail: Andrzej.Pawlowski@doctorate.put.poznan.pl

**Streszczenie:** Praca dotyczy procesu suszenia materiałów ceramicznych przy zmiennych, ale odpowiednio sterowanych, parametrach czynnika suszącego. Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dla procesu suszenia konwekcyjnego prowadzonego zarówno przy zmiennej temperaturze jak i zmiennej wilgotności powietrza. Zaproponowano model matematyczny do opisu kinetyki suszenia niestacjonarnego, który umożliwia symulacje i eksperymenty numeryczne celem optymalizacji procesu. Otrzymane na bazie tego modelu wyniki obliczeń numerycznych wykazują dobrą korelację z danymi eksperymentalnymi. We wniosku końcowym stwierdza się, że dynamiczne warunki suszenia pozwalają otrzymać materiał lepszej jakości, nie wydłużając jednocześnie znacząco samego procesu suszenia.

**Słowa kluczowe:** suszenie w zmiennej temperaturze i wilgotności powietrza, badania eksperymentalne, modelowanie procesu, glina kaolinowa, jakość materiału.

### 1. WSTĘP

Procesowi suszenia materiałów ceramicznych towarzyszą niekorzystne zjawiska mechaniczne polegające na zmianie kształtu oraz pękaniu materiału [2, 6, 12, 15]. Aby zapobiec tym niepożądanym zjawiskom zaproponowano suszenie w okresowo zmiennych warunkach [10,14]. Pozwala to dokonywać okresowego spowalniania procesu w celu zredukowania narastających naprężeń suszarniczych, które po przekroczeniu pewnych wartości powodują pęknięcie materiału. Dzięki okresowemu spowolnieniu i przyspieszeniu procesu unika się destrukcji produktów suszonych.

Największe naprężenia w suszonych materiałach ceramicznych powstają pod koniec okresu stałej szybkości suszenia i już w tej fazie zostaje często przekroczona wartość krytyczna naprężeń [1,4,5,7,8,11,13]. Na powierzchni materiału zaczynają pojawiać się pierwsze początkowo niewielkie mikropęknięcia, które w trakcie pro-

cesu powiększają się. Zaproponowana w tej pracy metoda suszenia w okresowo zmiennych warunkach ma właśnie zapobiec dalszemu rozwojowi mikropęknięć. W okresach chwilowego spowolnienia procesu następuje bowiem wyrównanie się gradientów temperatury i wilgotności w materiale, a w konsekwencji redukcja naprężeń suszarniczych. Aby jednak taki proces był efektywny, tzn. by nie wydłużać zbytnio czasu suszenia w porównaniu do suszenia prowadzonego w stałych warunkach, należy odpowiednio dobrać okres zmian parametrów suszenia.

### 2. METODOLOGIA BADAŃ

Badania prowadzono na glince kaolinowej KOC dostarczonej przez firmę Surmin-Kaolin S.A. Pełne informacje dotyczące składu chemicznego i właściwości fizycznych tego materiału znajdują się w metryce materiału, a także na stronie internetowej producenta.

Przed badaniami kaolin wstępnie rozdrabniano, a następnie dodawano do niego wody w takiej ilości by otrzymać plastyczny materiał o zawartości wilgoci ok. 40%. Wstępne rozdrobnienie materiału podobnie, jak kolejny etap 48-godzinne go składowania materiału, miało na celu uzyskanie jednorodnego rozkładu wilgoci w całym materiale. Z tak przygotowanego kaolinu formowano próbki w kształcie walca o średnicy 5 cm i wysokości 6 cm, a następnie poddawano procesowi suszenia konwekcyjnego.

W pierwszej części badań przeprowadzono procesy suszenia w dwóch stałych temperaturach 60°C i 100°C oraz odpowiadającej im wilgotności równowagowej. Przeprowadzenie badań dla suszenia w powyższych stałych temperaturach miało na celu pokazanie, że w tych warunkach suszenie jest stosunkowo intensywne i powoduje destrukcję próbki suszonej. Te procesy miały zarazem na celu wskazanie momentu przejścia z okresu stałej do okresu

zmiennej prędkości suszenia, czyli przejścia od tzw. pierwszego do drugiego okresu suszenia. Informacje te były potrzebne do określenia momentu wprowadzenia zmian parametrów powietrza suszącego, bowiem w okresie przejściowym między pierwszym i drugim okresem suszenia pojawiają się pierwsze mikropęknięcia.

Następne badania prowadzono przy okresowych zmianach temperatury na poziomie od 65°C do 40°C i od 100°C do 50°C oraz przy zmianach wilgotności powietrza na poziomie od 4% do 12% oraz od 4% do 80%. Po każdym procesie suszenia próbkę fotografowano w celu porównania jakości powierzchni materiału. Ponadto, wysuszony materiał poddano wytrzymałościowej próbie na ściskanie, aby potwierdzić fakt, iż materiał o lepszej strukturze zewnętrznej (bez pęknięć) wykazuje lepsze właściwości mechaniczne. Badania wytrzymałościowe przeprowadzono dla dwóch procesów suszenia, a mianowicie dla próbek suszonych w stałej temperaturze 100°C oraz w zmiennej temperaturze od 100°C do 50°C. Próby te przeprowadzono na reprezentatywnej ilości dziesięciu próbek, aby uzyskane wyniki były wiarygodne. Jednocześnie, aby potwierdzić powtarzalność warunków prowadzenia procesu, próbki były suszone w oddzielnych testach.

### 3. MODEL MATEMATYCZNY

Zaproponowany model matematyczny opisuje kinetykę suszenia, czyli zmiany zawartości wilgoci i temperatury materiału suszonego w czasie procesu. Model ten różni się od tych przedstawionych w pracach [9] i [16] tym, że dotyczy kinetyki suszenia w zmiennych warunkach. Podstawę zbudowania modelu stanowiły równania bilansu masy i energii:

$$m_s \frac{dX}{dt} = -A_m J_m + \Delta m^* \quad (1)$$

$$m_s \frac{d}{dt} [(c_s + c_l X) T] = A_T J_T - A_m J_m + \Delta Q^* \quad (2)$$

gdzie  $m_s$ ,  $X$ ,  $T$ ,  $A_m$ ,  $A_T$ ,  $J_m$ ,  $J_T$ ,  $l$ ,  $c_s$  i  $c_l$  oznaczają odpowiednio: masę próbki suchej, zawartość wilgoci (stosunek masy wody do masy suchej próbki), temperaturę, powierzchnię wymiany wilgoci, powierzchnię wymiany ciepła, strumień wilgoci, strumień ciepła, ciepło parowania, ciepło właściwe masy suchej i ciepło właściwe wody. Ponadto  $\Delta m^*$  i  $\Delta Q^*$  są członami źródłowymi masy i ciepła, które mogą wystąpić podczas kondensacji pary przy suszeniu w warunkach zmiennej wilgotności powietrza.

Na bazie termodynamiki procesów nieodwracalnych [3] sformułowano związki ujmujące zależność pomiędzy strumieniami ciepła i masy a parametrami czynnika suszącego, czyli:

$$J_T = h_T (T_a - T) \quad (3)$$

$$J_m = h_m \ln \frac{\varphi|_{\partial B} p_{wn}(T)}{\varphi_a p_{wn}(T_a)} \quad (4)$$

gdzie  $h_T$ ,  $h_m$ ,  $\varphi$  i  $p_{wn}$  oznaczają: współczynniki konwekcyjnej wymiany ciepła i masy, wilgotność względną powietrza i prężność pary w powietrzu w stanie nasycenia. Końcowa postać wyprowadzonych równań przedstawia się następująco:

$$m_s \frac{dX}{dt} = -A_m h_m \ln \frac{\varphi|_{\partial B} p_{wn}(T_a)}{\varphi_a p_{wn}(T_a)} + \Delta m^* \quad (5)$$

$$m_s \frac{d}{dt} [(c_s + c_l X) T] = \quad (6)$$

$$A_T h_T (T_a - T) - A_m h_m \ln \frac{\varphi|_{\partial B} p_{wn}(T_a)}{\varphi_a p_{wn}(T_a)} + \Delta Q^*$$

Jest to układ sprzężony dwóch nieliniowych równań różniczkowych. Układ ten rozwiązywano metodą różnic skończonych przy jednorodnych warunkach początkowych:

$$X(t)|_{t=0} = X_0, \quad T(t)|_{t=0} = T_0 \quad (7)$$

Suszenie w zmiennych warunkach prowadzono przyjmując okresowe zmiany temperatury i wilgotności względnej powietrza, czyli

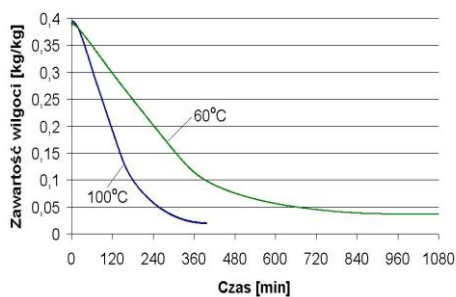
$$T_a(t) = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (t - t_{ch}) \right] \quad (8a)$$

$$\varphi_a(t) = \frac{\varphi_{\max} + \varphi_{\min}}{2} + \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2} \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (t - t_{ch}) + \pi \right] \quad (8b)$$

gdzie  $\lambda$  jest okresem zmian, a  $t_{ch}$  oznacza początek rozpoczęcia zmian parametrów suszenia.

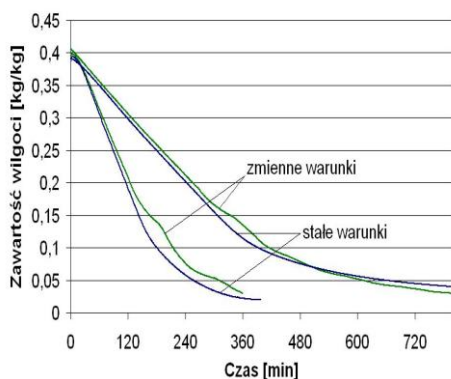
### 4. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

Na podstawie wyników doświadczeń uzyskano tzw. krzywe suszenia, które przedstawiają ubytek masy wilgoci w próbce podczas suszenia. Na rys. 1 do 3 przedstawiono krzywe suszenia dla próbek suszonych w stałych oraz okresowo zmiennych warunkach prowadzenia procesu. Wyraźnie widać na nich, iż temperatura czynnika suszącego w znaczny sposób wpływa na szybkość suszenia (Rys.1).



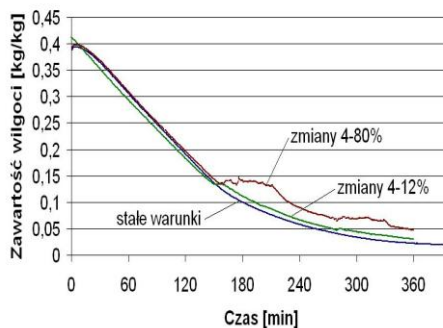
Rys. 1. Krzywe suszenia dla procesu w stałych warunkach.  
Fig. 1. Drying curves for drying process in constant conditions.

Podczas suszenia w zmiennych warunkach można zauważyć, że zmiany wilgotności czynnika suszącego powodują o wiele szybsze spowolnienie procesu (Rys.3) niż zmiany temperatury (Rys.2). Dlatego też zmiany wilgotności wprowadzano pół godziny później niż zmiany temperatury.

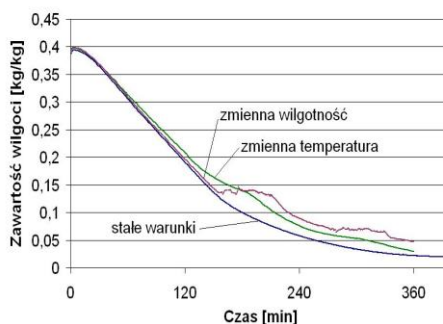


Rys. 2. Porównanie krzywych suszenia uzyskanych przy zmiennych temperaturach 100 → 50°C i 60 → 30°C oraz stałych temperaturach powietrza 100°C i 60°C.  
Fig. 2. Comparison of the drying curves for variable temperatures 100 → 50°C and 60 → 30°C and constant temperatures 100°C and 60°C of the air.

Jak widać na rys. 4 okresowe spowolnienie procesu, wywołane zmianami parametrów czynnika suszącego, nie wpływa znacząco na wydłużenie procesu.

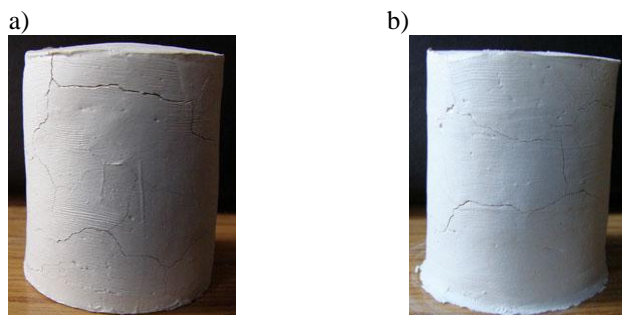


Rys. 3. Porównanie krzywych suszenia uzyskanych przy zmiennej wilgotności 4 → 12 % i 4 → 80 % oraz stałej wilgotności 4 % przy temperaturze powietrza 100°C w każdym przypadku.  
Fig. 3. Comparison of the drying curves for variable humidity 4 → 12 % and 4 → 80 % and constant humidity 4 % at the air temperature 100°C in each case.



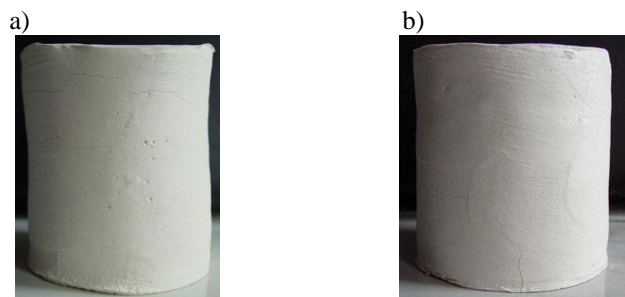
Rys. 4. Porównanie krzywych suszenia dla stałych i zmiennych warunków prowadzenia procesu suszenia.  
Fig. 4. Comparison of drying curves for stable and variable drying conditions.

Na rys. 5a przedstawiono wygląd próbki po suszeniu w stałej temperaturze 100°C, a na rys. 5b w temperaturze 60°C.



Rys. 5. Wygląd próbek suszonych: a) w stałej temperaturze 100°C, b) w stałej temperaturze 60°C.  
Fig. 5. Visualization of dried samples: a) in constant temperature 100°C, b) in constant temperature 60°C

Dla porównania na rys. 6a przedstawiono próbkę suszoną w zmiennej temperaturze  $100 \rightarrow 50^\circ\text{C}$ , a na rys. 6b próbkę suszoną w zmiennej wilgotności  $4 \rightarrow 80\%$  w temperaturze  $100^\circ\text{C}$ . Wynika stąd, że prowadząc suszenie w zmiennych warunkach uzyskuje się lepszą jakość produktów suszonych



Rys. 6. Wygląd próbek suszonych: a) przy zmiennej temperaturze  $100 \rightarrow 50^\circ\text{C}$ , b) przy zmiennej wilgotności  $4 \rightarrow 80\%$  i temperaturze  $100^\circ\text{C}$ .

Fig. 6. Visualization of dried samples: a) with variable temperature  $100 \rightarrow 50^\circ\text{C}$ , b) with variable humidity  $4 \rightarrow 80\%$  at  $100^\circ\text{C}$ .

Przeprowadzone badania mechaniczne na maszynie wytrzymałościowej wskazały, że materiał suszony w stałych warunkach w temperaturze  $100^\circ\text{C}$  wytrzymuje nacisk w granicach 480 N, a takie same próbki suszone w zmiennej temperaturze  $100 \rightarrow 50^\circ\text{C}$  wytrzymują nacisk większy o około 70N. Próbę wytrzymałościową wykonywano przy stałym przyroście siły nacisku wynoszącej 1N/s. Aparaturę do pomiaru wytrzymałości oraz ściskaną próbkę przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Maszyna wytrzymałościowa wraz ze ściskaną próbką.  
Fig. 7. Strength machine with compressed sample.

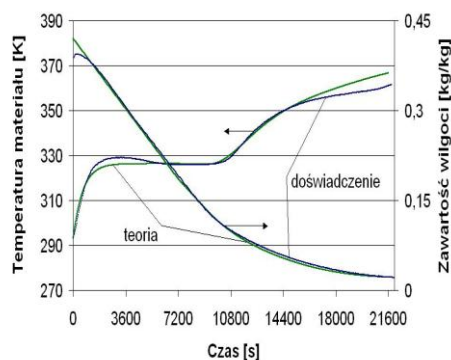
W przypadku materiału suszonego w stałych warunkach zauważono nieco większy rozrzut wyników pomiarów wytrzymałości niż dla próbek suszonych w zmiennych warunkach. Wynika z tego, iż dla materiału suszonego w stałych warunkach, określając jego wytrzymałość, należy

przyjąć większy margines błędu niż dla próbek suszonych w zmiennych warunkach.

## 5. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

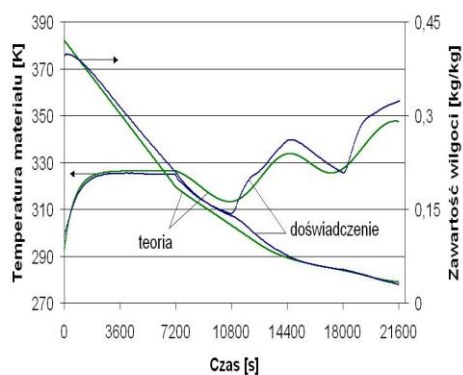
Kinetykę procesu suszenia zarówno w stałych jak i zmiennych warunkach opisują równania 5 i 6 oraz warunki początkowe (7) i okresowo zmiennie parametry suszenia (8a) i (8b). Porównując dane doświadczalne z wynikami obliczeń widać, iż zaproponowany model bardzo dobrze opisuje kinetykę procesu suszenia (Rys. 8 do 10, por. też [9]).

Dzięki modelowi można więc znacznie ograniczyć ilość wykonanych badań potrzebnych do optymalizacji procesu.



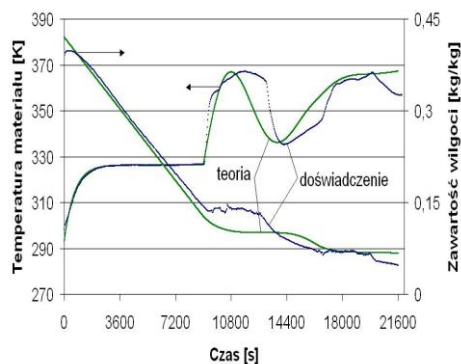
Rys. 8. Porównanie teoretycznych i doświadczalnych krzywych suszenia oraz temperatury próbek suszonych dla stałej temperatury  $100^\circ\text{C}$ .

Fig. 8. Comparison of theoretical and experimental drying and temperature curves for samples dried in constant temperature  $100^\circ\text{C}$ .



Rys. 9. Porównanie teoretycznych i doświadczalnych krzywych suszenia oraz temperatury próbki dla zmiennej temperatury powietrza suszącego  $100 \rightarrow 50^\circ\text{C}$ .

Fig. 9. Comparison of the theoretical and experimental drying curves and sample temperature for variable air temperature  $100 \rightarrow 50^\circ\text{C}$ .



Rys. 10. Porównanie teoretycznych i doświadczalnych krzywych suszenia oraz temperatury próbki dla suszenia przy zmiennej wilgotności powietrza 4 → 80 %.

Fig. 10. Comparison of the theoretical and experimental drying curves and the sample temperature for the process in air variable humidity 4 → 80 %.

## 6. WNIOSKI

Przeprowadzone badania procesów suszenia kaolinu w stałych i zmiennych warunkach suszenia wskazuje ewidentnie, że sterując w odpowiedni sposób warunkami suszenia można uniknąć negatywnych efektów w postaci pęknięć suszonych produktów, nie wydłużając jednocześnie w sposób znaczący długości procesu.

Wprowadzając zmiany parametrów powietrza suszącego należy dokładnie dobrać moment rozpoczęcia takich zmian, gdyż zbyt późne rozpoczęcie spowolnienia procesu powoduje znaczny wzrost naprężeń suszarniczych i tym samym prowadzi do destrukcji materiału.

Istotny jest również dobór amplitudy zmian danego parametru, ponieważ zbyt małe zmiany nie spowolnią wystarczająco procesu, a tym samym nie uniknie się przyrostu naprężeń suszarniczych.

Zaproponowany model kinetyki suszenia wykazuje bardzo dobrą korelację z wynikami doświadczalnymi i może skutecznie służyć do projektowania optymalnych ze względu na czas procesów suszenia w zmiennych warunkach w stosunku do ustalonych warunków suszenia. Pewna rozbieżność krzywych teoretycznych i doświadczalnych otrzymanych dla zmiennych warunków suszenia wynika z trudności uzyskania w doświadczeniach regularnej okresowości zmian temperatury i wilgotności powietrza suszącego. Okresowość zmian parametrów czynnika suszącego w niewielkim stopniu wydłuża proces suszenia, jednakże znacząco wpływa na jakość suszonego materiału.

## DRYING OF CERAMIC MATERIALS IN NON-STATIONARY CONDITIONS

### Summary:

This paper concerns both experimental and theoretical examination of drying processes of ceramic like materials in constant and controlled variable drying conditions for comparison. The drying kinetics is determined experimentally and numerically for constant and variable temperature and for stable relative humidity of the drying air. The quality of the dried samples were assessed optically and the strength of the dried samples obtained in given drying conditions was tested. The mathematical model presented in the paper allowed construction of the drying kinetics for both stable and variable parameters of the drying air. The numerical data obtained on the basis of the model show a good adherence with the experimental ones. Such a model can be used for optimization of the drying time for the processes in variable drying conditions with respect to those in constant drying conditions. It was stated that drying in variable conditions allows to obtain better quality of the dried products without significant extension of the process duration.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego BW 32-337/09 na Politechnice Poznańskiej

### Literatura

1. Banaszak J., Kowalski S.J., 2002, Drying Induced Stresses Estimated on the Base of Elastic and Viscoelastic Models, *Chemical Engng. Journal*, 86, 139-143;
2. Banaszak J., Kowalski S.J., 2005, Theoretical and experimental analysis of stresses and fractures in clay like materials during drying, *Chemical Engineering and Processing*, 44, 495-503;
3. Berry, R.S.; Kazakov, V.A.; Sieniutycz, S.; Szwast, Z.; Tsirlin, A.M., 2000, *Thermodynamic optimization of finite-time processes*. John Wiley & Sons, LTD, New York;
4. Hasatani M., Itaya, Y., 1992, Fundamental study on shrinkage of formed clay during drying. *Viscoelastic strain-stress and heat/moisture transfer, Drying Technology*, 10(4), 1013-1036;
5. Itaya Y., Okouchi K., Mori, S., 2001, Effect of heating modes on internal strain stress formation during drying of molded ceramics, *Drying Technology*, 19(7), 1491-1504;
6. Kowalski S.J., 2002, Modelling of Fracture Phenomena in Dried Materials, *Chemical Engng. Journal*, 86, 145-15;
7. Kowalski S.J., 2003, *Thermomechanics of drying processes*, Springer Verlag Heilderberg-Berlin, s.365;
8. Kowalski S.J., Banaszak J., 1999, Stresses in Viscoelastic Plate Dried Convectively, *Drying Technology*, 17, (1-2), 97-117;
9. Kowalski S.J., Musielak G., Banaszak J., 2007, Experimental validation of the heat and mass transfer

- model for convective drying, *Drying Technology*, 25, 107-121;
10. Kowalski S. J., Pawłowski A., 2008, Drying of Wet Materials in Intermittent Conditions, Proceedings 16th International Drying Symposium, India 9-12.11.2008, pp. 951-957;
  11. Kowalski S.J., Rajewska K., 2002, Drying-Induced Stresses in Elastic and Viscoelastic Saturated Materials, *Chemical Engng. Science*, 57, 3883-3892;
  12. Kowalski S.J., Rajewska K., Rybicki A., 2000, Destruction of Wet Materials by Drying, *Chemical Engineering Science*, 55 (23), 5755-5762;
  13. Kowalski S.J., Rybicki A., 1996, Drying stress formation by inhomogeneous moisture and temperature distribution. *Transport in Porous Media* 24 (2), 139-156;
  14. Musielak G., 2000, Influence of the drying medium parameters on drying induced stresses. *Drying Technology* 18(3), 561-581;
  15. Musielak G., 2001, Possibility of clay damage during drying. *Drying Technology* 18, No 8, 1645-1659;
  16. Zagrouba F., Mihoubi D., Bellagi A., 2002, Drying of clay. II. Rheological modeling and simulation, *Drying Technology*, 20 (10), 1895-1917;