PULZAČNÉ SPAĽOVANIE A JEHO VYUŽITIE V TEPLOTECHNICKÝCH AGREGÁTOCH NA EXPANDÁCIU PERLITU

JARMILA FABIANOVÁ

Výskumný ústav kovopriemyslu, 080 00 Prešov, Sídlisko 111

Došlo dňa 3. 4. 1975

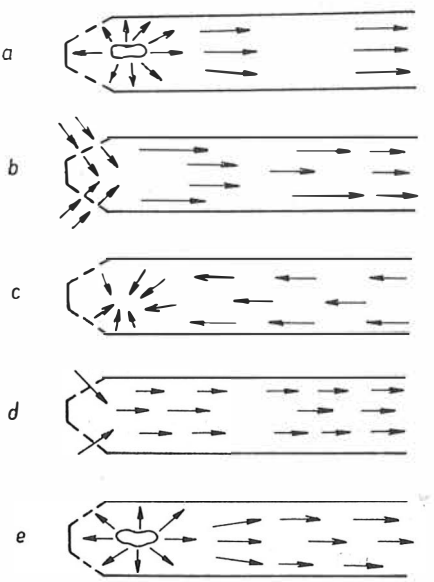
Na laboratórnej pulzačnej piecke sa sledovalo, či je výhodné použiť pulzačné spaľovanie pri expandácii perlitu. Porovnaním sypných hmotností jednotlivých frakcií (0,2—1,4 mm) expandovaných pri rôznej dĺžke pulzačnej rúry sa zistila výpočtom závislosť sypnej hmotnosti perlitu od frekvencie pulzácií. Výsledky ukázali, že kvalita perlitu sa snížením frekvencie zvýšila, i keď z teplotechnického hľadiska došlo k zníženiu koeficienta prestupu tepla.

ÚVOD

Výskumy problémov pulzačného spaľovania a najmä jeho využitie v priemyselnej praxi nie je zatiaľ komplexne doriešené. Poznatok, že pri pulzačnom spaľovaní dochádza ku zvýšeniu prestupu tepla prúdením, dáva podnet pre jeho ďalšie použitie.

Princíp pulzačného spaľovania

Pulzy vznikajú v Smidtovej trubici (obr. 1), pozostávajúcej z rúry, ktorá je na jednom konci otvorená, a na uzavretej stene je sústava ventilov pre nasá-



Obr. 1. a, b, c, d, e. Princíp Smidtovej trubice na výrobu pulzov.

vanie horľavej zmesi. Po zapálení zmesi sa tlaková vlna šíri k otvorenému koncu rúry. Po odraze od vonkajšieho pružného prostredia sa vracia ako podtlaková vlna, ktorá cez ventily znovu nasáva čerstvú zmes. Od zatvoreného konca sa odrazí a po opätovnom odrazení od prostredia sa vracia ako slabá tlaková vlna a komprimuje nasatú zmes.

Tým je ukončený jeden cyklus. Pri kompresii dôjde (podľa väčšiny autorov pôsobením aktívnych častíc z predchádzajúceho cyklu) k samozapáleniu zmesi, a preto nie je potrebný cudzí zdroj zapaľovania, s výnimkou prvého cyklu.

Vplyv pulzácií na prestup tepla

Prednosťou pulzačného spaľovania je intenzifikácia a možnosť regulácie teplotechnických procesov. Preto možno uvažovať o jeho aplikácii na ohrev zrnitých materiálov.

Intenzifikáciu teplotechnického procesu pri tomto spôsobe spaľovania zapríčiňuje pôsobenie tlakových vĺn, ktoré rozrušujú medznú vrstvu na povrchu vsádzky. Je známe, že v oblasti hodnôt Reynoldsovho čísla 3000 — 8000, pri pulzačnom pomere 1,4 je prestup tepla lepší o 70 % a že pulzačný pomer je za rovnakých podmienok rozhodujúcim činiteľom pri prestupe tepla [3]. Takisto sa pozorovalo, že koeficient prestupu tepla sa v porovnaní s normálnym spaľovaním zvyšuje na dvojnásobok. Z činiteľov určujúcich pomery pri pulzačnom spaľovaní vplýva na hodnotu α predovšetkým aplitúda kmitov a frekvencia

$$\alpha = \frac{a^2 f}{n}, \tag{1}$$

kde a — amplitúda akustických vĺn [m],
f — frekvencia vĺn [Hz],
n — empirická konštanta.

Zvýšením α sa podstatne skracuje doba ohrevu najmä u sypkých materiálov. V prípade pecí pracujúcich so zrnitým materiálom vo vznose je táto okolnosť veľmi dôležitá, pretože doba ohrevu vsádzky je obmedzená dobou letu. Vzhľadom na krátkosť pobytu čiastočky materiálu počas vznosu v pracovnom priestore nemusí pri normálnom ohreve prebehnúť požadovaný technologický proces. Pri zvýšení koeficienta prestupu tepla sa predpokladá, že tento proces prebehne úplne.

Okrem vplyvu akustickej tlakovej vlny na α dôležitú úlohu pri pulzačnom spaľovaním má účinok tlakovej vlny na pohyb častíc nachádzajúcich sa v pulzačnom poli. Vytvorenie nárazovej tlakovej vlny je podmienené dostatočne rýchlym stlačením plynu (4).

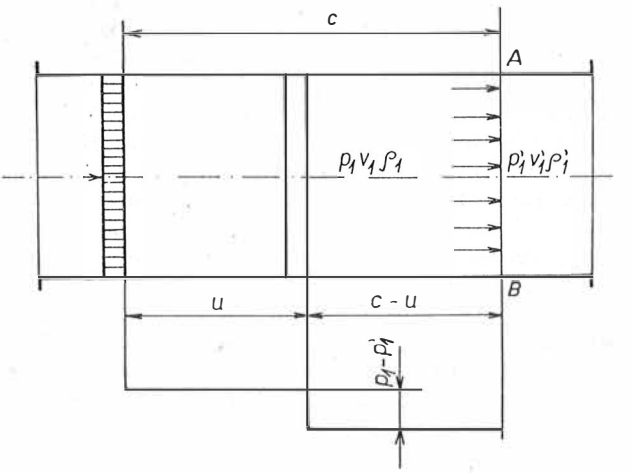
Možno to vysvetliť analógiou s pohybom piesta konštantnou rýchlosťou v dlhej rúre. Piest tlačí priľahlú vrstvu a vyvolaný rozruch sa šíri prostredím (obr. 2). Vrstva naľavo od čela vlny je charakterizovaná parametrami V_1, T_1, ϱ_1 a napravo V_1', T_1', ϱ_1',

kde V_1', V_1 — objem [m³],
T_1', T_1 — teplota [K],
ϱ_1', ϱ_1 — objemová hmotnosť [kg m^{-3}].

Nech za jednu sekundu urazí piest dráhu u, čelo vlny urazí dráhu $c \cdot u$, pričom u a c sú rýchlosti piesta a čela vlny vzhľadom na neporušenú oblasť ideálneho plynu. Rýchlosť čela vlny vzhľadom na rozrušenú oblasť plynu je $c - u$. Použitím zákonov o zachovaní hmoty o zmene hybnosti a o zachovaní energie dôjdeme k základnému vzorcu určenia rýchlosti rozruchu:

$$c^2 = kRT, \tag{2}$$

kde c — rýchlosť šírenia vlny [m^{-1}],
R — konštanta [m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}],
T — teplota pri dosiahnutí rovnovážneho stavu [K],



Obr. 2. Šírenie rozruchu v trubici;
c — u — rýchlosť čela vlny, p', p — tlak v', v — objem, ϱ, ϱ' — objemová hmotnosť,

pričom platí

$$p_1 \doteq p_1', \tag{3}$$

$$\frac{\varphi - 1}{1 - l/\varepsilon} = k, \qquad k = \frac{C_p}{C_v}, \tag{4,5}$$

kde p_1, p_1' — tlak pred čelom a za čelom vlny (Pa),
φ — pomerný tlak,
ϱ — pomerný objem,
C_p, C_v — špecifické teplo [Jkg^{-1} K^{-1}].

Tlaková vlna interferuje s postupujúcim vlnením. Ak sa udržiava zdroj kmitov a na celú dĺžku rúry sa zmestí n počet vĺn, platí:

$$l = n \cdot \lambda/4 = n/4 \cdot cTk, \tag{6}$$

pričom

$$f = 1/Tk = c/4 = 1/4 \cdot \sqrt{RTk}. \tag{7}$$

Pre rýchlosť čiastočky v pulzačnom poli platí vzťah [4]:

$$v = \frac{1{,}12 F_m \, l(p_1 - p_1')}{m}, \tag{8}$$

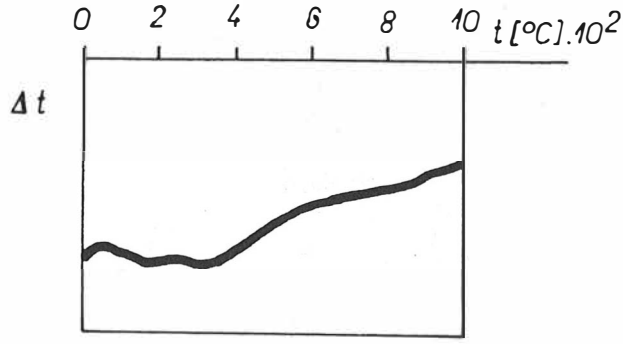
kde F_m — prierez častíc [m²],
l — dĺžka pulzačnej trubice [m].

Možnosť použitia pulzačného spaľovania v teplotechnickom agregáte na expandáciu perlitu

Pre pohyb zrnka surového perlitu v pulzačnom poli platí vzťah (8). Pomocou neho môžeme stanoviť potrebný čas pobytu zrniečka pred expandáciou peci. Súčasne môžeme zistiť ako bude zmena parametrov pulzačného prúdu vplývať na expandáciu perlitu. Keďže sa pri pulzačnom spaľovaní zvýši koeficient prestupu tepla, zintenzívni sa tým priebeh fyzikálnochemických procesov expandácie a zníži se nevyhnutný čas pobytu zrniečka v tepelnom agregáte.

Pôvodom patrí perlit medzi kyslé vulkanické sklá. Rýchlym chladnutím magmy, ktorej zloženie je blízke eutektickej zmesi kremeňa a alkalických živcov, vznikajú vulkanické sklá, líšiace sa zložením a obsahom vody [5]. Dôležitou charakteristikou perlitu je chemicky viazaná voda (4 %), ktorá je príčinou mnohonásobného zväčšenia objemu pri ohreve v dôsledku volutalizácie horniny.

Perlit má sivú, modrosivú a hnedú farbu. Merná hmotnosť je 2,346 kg m^{-3}, index lomu 1,501, objemová hmotnosť 900—1700 kg m^{-3}. Celkové množstvo vody v perlite je 2—5 % [4]. Absorpciou infračerveného žiarenia sa zistila prítomnosť monochromatickej OH skupiny, ako aj prevládajúce množstvo OH



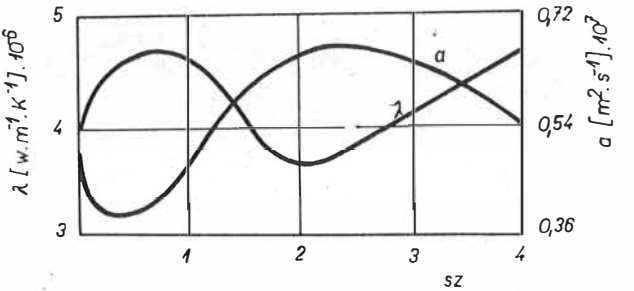
Obr. 3. Diferenciálna termická krivka perlitu, lokalita Byšťa.

skupiny viazanej vodíkom na H_2O a určité množstvo rozpustenej vody. Únik viazanej vody pri expandácii ukazujú diferenciálne termické krivky (obr. 3). Objem pri expandácii sa zväčšuje 4—15krát, čoho dôsledkom je vysoká pórovitosť a absorpčná schopnosť, malá objemová hmotnosť a nízky koeficient λ. V súčasnosti vyrábaný expandovaný perlit má zrnitosť od 0—3,15 mm.

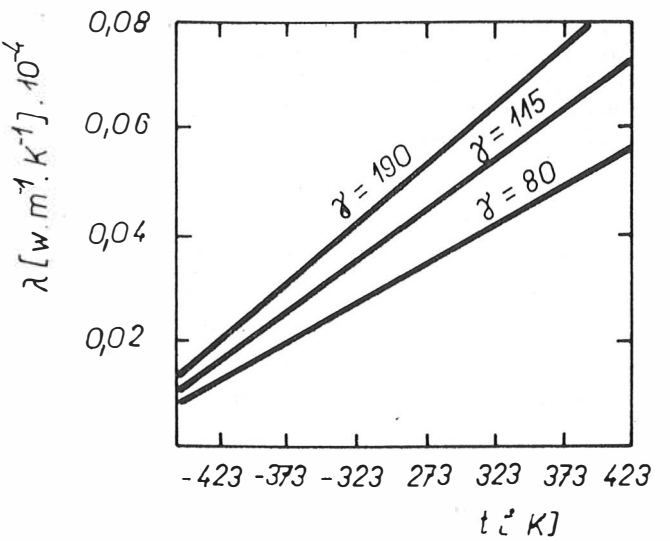
Aby sa zistil optimálny režim expandácie, treba vyriešiť nasledujúce otázky:

1. vplyv predhrievania na stupeň expandácie,
2. vhodný tepelný režim pri expandácii,
3. vhodné teplotechnické zariadenie.

Výskumy ukázali, že optimálna teplota predhrievania je 280 °C, a to v priebehu 15 min. [5] a optimálna teplota expandácie je 1350 °C, ktorá sa mení podľa zloženia.



Obr. 4. Závislosť tepelnej a teplotnej vodivosti od veľkosti častíc surového perlitu; λ, a — tepelná a teplotná vodivosť, SZ — stredný rozmer častíc.

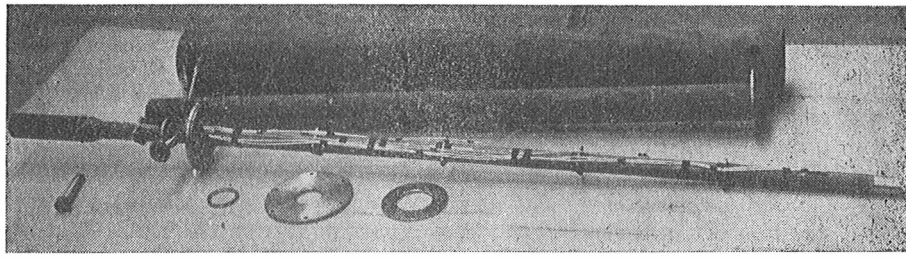


Obr. 5. Priebeh tepelnej vodivosti a teploty pri rôznej mernej hmotnosti surového perlitu; T — teplota, γ — merná hmotnosť, λ — tepelná vodivosť.

Objemová hmotnosť expandovaného perlitu závisí od veľkosti zŕn suroviny, od teploty expandácie, od doby zotrvania zrna v peci, od obsahu vody v surovine a od množstva podávanej suroviny za časovú jednotku. Obr. 4—5 znázorňujú priebeh vlastností perlitu po expandácii [5], priebeh tepelnej a teplotnej vodivosti v závislosti od veľkosti častíc, resp. priebeh tepelnej vodivosti v závislosti od teploty pre perlit s rôznou mernou hmotnosťou [6].

EXPERIMENTÁLNA METODIKA A VÝSLEDKY

Pokusy sa robili na laboratórnej pulzačnej piecke (obr. 6). Počas skúšok sa sledoval potrebný príkon vzduchu a paliva a teplota plynov pozdĺž pece, ako sa zistili teploty technickými výpočtami. Vzorka pre expandáciu sa pripravila z náleziska Lehôtka pod Brehy. Z jednotlivých frakcíi (tab. I) sa



Obr. 6. Konštrukcia laboratórnej pulzačnej piecky.

použil objem 100 ml, pričom každá frakcia bola expandovaná samostatne. Expandovaný perlit sa zachytáva na konci pulzačnej rúry. Po skončení expandácie sa zisťovala sypná hmotnosť každej frakcie krížovou metódou. Pokusy sa opakovali s pulzačnou rúrou predĺženou o 1 m.

Sypné hmotnosti jednotlivých frakcií expandovaných pri normálnej dĺžke pece L a s nástavcom $L1$ sú porovnané v tabuľke II. Obidve série experimentov sa robili bez predhrievania suroviny.

Tabuľka I

Frakcie surového perlitu z Lehôtky pod Brehy

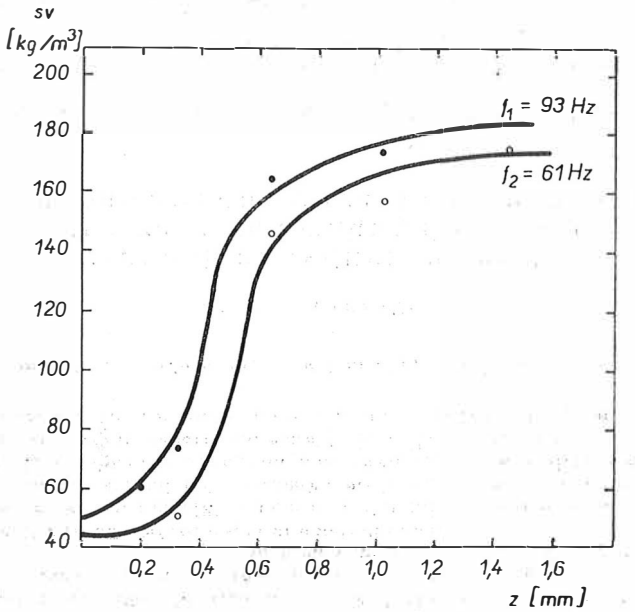
Označ.	a	b	c	d	e	f
Zrnitosť mm	nad 1,4	1—1,4	0.63—1	0.3 —0.63	0.2—0.32	pod 0.2

ZÁVER

Pri pokusoch sa sledoval predovšetkým vplyv zmeny frekvencie na kvalitu perlitu. Namerané hodnoty sypných hmotností expandovaného perlitu pri rôznych dĺžkach pulzačnej rúry (pri rôznej frekvencii) sú na obr. 7. Zakreslenú krivku môžeme považovať iba za predpokladaný priebeh závislosti. Hodnoty sypných hmotností pri väčšej frekvencii (normálnej dĺžke pece) sú väčšie ako pri menšej frekvencii. Kvalita perlitu sa znížením frekvencie zvýšila, hoci podľa vzťahu:

$$\alpha = g\left[\frac{a^2 f}{n}, \ldots\right] \tag{9}$$

došlo k zníženiu koeficienta prestupu tepla. Zmena frekvencie nespôsobuje zrejme len zmenu α, ale ovplyvňuje aj dobu zotrvávania perlitu v pulzačnom prostredí, ďalej rýchlosť odvodu plynov z povrchu expandovaných čiastoček perlitu a pod., o čom by sa bolo treba v budúcnosti presvedčiť. Keďže použitý model nebol dostatočne izolovaný, nedala sa vyhodnotiť tepelná bilancia. Na novej konštrukcii sa pracuje.



Obr. 7. Závislosť sypnej hmotnosti expandovaného perlitu od dĺžky pulzačnej rúry; f_1, f_2 rekvencia — SV — sypná hmotnosť, Z — zrnitosť.

Tabuľka II

Vplyv dĺžky pece na veľkosť sypnej hmotnosti

Zrnitosť [mm]	Sypná hmotnosť kg/m³	
	bez nástavca	s nástavcom
f pod 0.20	48,04	44,52
e 0,2 —0,32	60,33	46,92
d 0,3 —0,63	73,71	52,10
c 0,63—1,00	162,63	144,30
b 1,00—1,40	171,2	155,63
a nad 1,40	182,54	173,84

Okrem využitia pulzačného spaľovania pri expandácii perlitu sa počíta s jeho využitím i v keramickom priemysle, zlievarenstve, potravinárskom priemysle a pod. Z uvedeného vyplýva, že oblasť skúmania možnosti použitia pulzačného spaľovania je široká a má budúcnosť.

Literatúra

[1] Kremer R., Klika R., Obroučka K.: *Tepelná technika*, 1. vyd., SNTL, Praha 1970.
[2] Kazancev E. I.: *Promyšlennyje peči*. Izdateľstvo Nauka, Moskva 1963.
[3] Lomoga M.: Diplomová práca, Vysoká škola technická, Košice 1969.
[4] Rybička J.: *Pohyb častíc pri pulzačnom spaľovaní* (Kandidátska dizertačná práca). Vysoká škola technická, Košice 1969.
[5] Šalát J., Ončáková P.: *Perlity, ich výskyt, petrochémia a praktické použitie*. SNTL, Bratislava 1964.
[6] Zborník prednášok z III. medzinárodnej konferencie o využívaní expandovaného perlitu v ČSSR a v zahraničí. Keramické závody, n. p., Košice, Dom techniky, Košice 1969.
[7] Tomčová J.: Diplomová práca, Vysoka škola technická, Košice 1971.

ПУЛЬСАЦИОННОЕ СГОРАНИЕ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕРМОТЕХНИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ ДЛЯ ЭКСПАНДАЦИИ ПЕРЛИТА

Ярмила Фабианова

Научно-исследовательский институт металло промышленности, Прешов

В приводимой статье вкратце описывается принцип пульсационного сгорания и влияние пульсации на теплопередачу. Далее описываются физические и химические свойства перлита-сырца и рассматриваются получаемые свойства экспандированного перлита. Подробно описывается и рассматривается эксперимент, проводимый с помощью модели пульсационной печки, при котором экспандировал перлит в разных фракциях *a—f* согласно табл. I, которые экспандировали самостоятельно при длине пульсационной трубки L и $L + 1$ м, т. е при разной частоте.

Целью предлагаемой работы является рассмотрение насыпного веса отдельных фракций в зависимости от частотности. Результаты, приводимые в табл. II и на рисунке 7 показывают, что насыпной вес перлита с понижением частотности повышается, хотя и величина коэффициента теплопередачи понижается.

Рис. 1a, b, c, d, e. Принцип трубки Шмидта, служащей для получения пульсов.
Рис. 2. Распространение возмущения в трубке; c—u — скорость фронта волны, P', p — давление, V'—V — объем, ϱ'—'ϱ — объемный вес.
Рис. 3. Дифференциально термическая кривая, основная масса Быштя.
Рис. 4. Зависимость тепло- и температуропроводности от размера частиц перлита-сырца; λ, a — тепло- и температуропроводность, SZ — средний размер частиц.
Рис. 5. Ход теплопроводности и температуры при разном удельном весе перлита-сырца; T — температура, γ — удельный вес, λ — теплопроводность.
Рис. 6. Схема лабораторной пульсационной печки.
Рис. 7. Зависимость насыпного веса экспандированного перлита при разной длине пульсационной трубки; f_1, f_2 — частота, SV — насыпной вес, Ž — размер зерна.

PULSATING COMBUSTION AND ITS UTILIZATION IN THE PRODUCTION OF EXPANDED PERLITE

Jarmila Fabianová,
Research Institute of Metalworking Industry, Prešov

A brief description of the principle of pulsating combustion is presented together with that of the effects of the pulses on heat transfer. Physical and chemical properties of raw perlite (volcanic glass) are specified and the properties of expanded perlite currently achieved are evaluated. The author has carried out experiments on a pulsating furnace model, in which perlite in various grain size fractions a—f was expanded (Table I) using various lengths of the pulsating tube and thus various frequencies.

The bulk weight of the individual fractions was evaluated in terms of the frequency employed. The results listed in Table II and Fig. 7 show that the bulk weight of perlite increased with increasing frequency, although the heat transfer coefficient decreased.

Fig. 1. a, b, c, d, e. The principle of the Smidt tube for the generation of pulses.
Fig. 2. Propagation of the pulse through the tube;
c — u — wave face velocity, p, p' — pressure, v, v' — volume, ϱ, ϱ' — bulk density.
Fig. 3. DTA curve of the Byšta raw perlite.
Fig. 4. Thermal and temperature conductivity in terms of raw perlite grain size;
λ, a — thermal and temperature conductivity SZ — mean grain size.
Fig. 5. The courses of thermal and temperature conductivity at various specific densitities of raw perlite,
T — temperature, γ — specific density, λ — thermal conductivity,
Fig. 6. Schematic diagram of the laboratory pulsating furnace.
Fig. 7. Bulk weight of expanded perlite in terms of pulsating tube length
f_1, f_2 — frequency, SV — bulk weight, Z — grain size.