

# VLIV ZMĚN FYZIKÁLNÍCH PARAMETRŮ FLUIDNÍCH VRSTEV NA CHARAKTERISTIKY TLAKOVÝCH FLUKTUACÍ

OTAKAR TRNKA a MILOSLAV HARTMAN

Ústav chemických procesů, AV ČR, Rozvojová 135, 165 02  
Praha 6  
trnka@icpf.cas.cz

Došlo 29.6.06, přijato 7.12.06.

Klíčová slova: tlakové fluktuace, pracovní režimy fluidních vrstev, flukuační charakteristiky

## Úvod

Fluidační technika se používá v chemických zařízeních již poměrně dlouho. Mezi první technologie, ve kterých byla fluidní vrstva úspěšně aplikována, patří např. fluidní krakování uhlovodíků a zplyňování nebo spalování hnědého uhlí<sup>1,2</sup>. Způsob fluidizace nebo hydrodynamický režim fluidních vrstev je velice proměnlivý. Je ovlivňován hlavně fyzikální charakteristikou částic a rychlostí proudění fluidačního média. Významný je také vliv geometrie fluidní kolony či reaktoru. Rozdílné režimy fluidní vrstvy lze podle rostoucí rychlosti plynu rámcově seřadit následovně: nehybná vrstva, bublinové fluidace, pístová fluidace, turbulentní případně rychlá fluidace a pneumatický transport. Podrobně jsme se stavy v systémech tuhá látka – plyn zabývali ve svých dřívějších pracích<sup>3,4</sup>.

Při provozu zařízení s fluidními vrstvami v systému tuhá látka – plyn má na výsledky procesů, které jsou ve vrstvách realizovány, podstatný vliv to, jaké fluidační režimy zde panují. Proto je sledování aktuálních fluidních režimů probíhajících ve vrstvě důležitou podmínkou úspěšné kontroly a řízení chemických procesů provozovaných ve fluidních vrstvách. Definice jednotlivých fluidačních režimů jsou udávány většinou popisně a režimy samy se těžko určují na základě objektivních kvantitativních ukazatelů. Také členění fluidačních režimů při rostoucím průtoku není v literatuře uváděno zcela jednoznačně. Užitečné informace o hydrodynamice systému lze získat ze studia fluktuací tlaku uvnitř vrstvy. Je zřejmé, že tlakové fluktuace jsou vyvolávány vznikem a pohybem bublin (plynných kapes) a shlukem částic ve vrstvě. Na druhé straně řada detailů kolem šíření tlakových vln ve vrstvě zůstává nejasná<sup>5-8</sup>. V dalším textu použijeme členění užitého v pracích<sup>8,10</sup> a uvedeného přehledně v tabulce I. V práci<sup>10</sup> jsou také definovány prahové rychlosti jednotlivých skupin (tříd) fluidačních režimů:  $U_{mf}$  (prah fluidace),  $U_{turb}$

(prah turbulencí),  $U_{dil}$  (prah řídkých vrstev) a  $U_{out}$  (prah trvalého úletu).

Jedním ze způsobů, jak odhadovat aktuální režimy fluidací, je sledování a vyhodnocování tlakových fluktuací uvnitř vrstvy. Tento postup vede k objektivně měřitelným výsledkům, které lze obdržet metodami spektrální analýzy časových řad naměřených tlaků.

## Flukuační model fluidní vrstvy

V např. předchozí práci<sup>8</sup> je na základě měření tlakových fluktuací navržen flukuační model fluidní vrstvy. Ten je postaven na zpracování časových řad metodou diskrétní Fourierovy transformace (dále FFT), která je uvedena např. v cit<sup>9</sup>. Pro danou modelovanou fluidní vrstvu je postupně po časových úsecích dané délky 64 s zvyšován průtok plynu ( $U$ ) od nulové hodnoty až po maximálně provozovaný průtok  $U_{max}$ . V každém časovém úseku je změřena řada diskrétních hodnot tlaku plynu ( $P$ ) ve vrstvě a to s frekvencí 512 vzorků za vteřinu. Podél sekvence hodnot tlaku  $P$  délky 64 s ( $U$  konstantní) je postupně posouváno časové okno o délce 4 s, a to s krokem posuvu 1 s. Původních 2048 vzorků připadajících na časový interval 4 s je redukováno postupným průměrováním na počet 512 vzorků. Na datovou řadu každého okna je aplikován algoritmus FFT. Obdržíme 256 hodnot  $c_i$  (komplexních čísel), která reprezentují hodnoty spektrálních čar z oboru frekvencí  $f_i \in [f_{min}, f_{max}]$ , kde  $f_{min}=0,25$  Hz a  $f_{max}=64$  Hz. Komplexní spektrum je přepočteno na spektrum amplitudové ( $a_i = |c_i|$ ). Amplitudy  $a_i$  jsou následně seřazeny sestupně podle svých hodnot. V pracích<sup>8,10</sup> jsou definovány dva parametry, které charakterizují tlakové fluktuace v daném časovém okně. Jsou to parametry označené jako  $E$  a  $M$  a stručně definované následujícími algoritmy a vzorci:

Medián  $f_M$  seřazeného spektra je definován jako

$$f_M = f_{i_M} \quad (1)$$

kde  $i_M$  splňuje podmínku

$$\sum_{i=1}^{i_M} a_i = \sum_{i=i_M+1}^{256} a_i \quad (2)$$

Výkon spektra  $W$  je dán vzorcem

$$W = \frac{4}{256} \cdot \sum_{i=1}^{256} a_i^2 \quad (3)$$

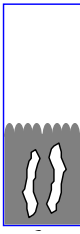
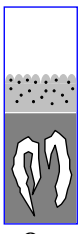
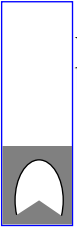
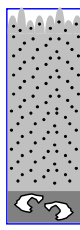
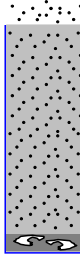
Fluktuace tlaku v daném časovém okně jsou charakterizovány dvojicí hodnot  $M$  a  $E$  definovaných vztahy:

$$M = 1 - \frac{f_M}{f_{max}} \quad (4)$$

$$E = \sqrt{W} \quad (5)$$

Tabulka I

Přehled režimů vrstvy zrnitého materiálu vertikálně protékané plynem<sup>a</sup>

| Statické vrstvy                                                                                                                               | Bublinové vrstvy                                                                                                                          | Turbulentní vrstvy                                                                                                          | Řídké vrstvy                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>nehybná vrstva</p> <p><b>1</b></p>                       |  <p>četné bubliny, částice v pohybu</p> <p><b>2+</b></p> |  <p>střední turbulence</p> <p><b>6</b></p> |  <p>začínající úlet částic</p> <p><b>8</b></p>      |
|  <p>sporadické bubliny, částice v klidu</p> <p><b>2–</b></p> |  <p>velké bubliny</p> <p><b>3</b></p>                    |  <p>plná turbulence</p> <p><b>7</b></p>    |  <p>řídká vrstva</p> <p><b>9</b></p>                |
|                                                                                                                                               |  <p>explodující bubliny</p> <p><b>4</b></p>            |                                                                                                                             |  <p>transportní řídká vrstva</p> <p><b>10</b></p> |
|                                                                                                                                               |  <p>pístování</p> <p><b>5</b></p>                      |                                                                                                                             |                                                                                                                                        |

<sup>a</sup> Rychlost plynu a mezerovitost vrstvy stoupají shora dolů a zleva doprava

Veličina  $M$  nabývá hodnot z intervalu  $[0,66, 1]$  a lze ji chápat jako míru dominantnosti spektra. Pro náhodný signál  $M \rightarrow 0,66$ , pro signál s jedinou (dominantní) frekvencí  $M \rightarrow 1$  (cit.<sup>8,10</sup>).

Hodnoty  $M(U)$  a  $E(U)$ , přiřazené určitému experimentálnímu bodu  $U$ , definujeme jako výsledek průměrování

hodnot  $M$  a  $U$  každého 4-sekundového okna podél jeho posuvu naměřenou 64-sekundovou sekvencí dat.

Trojici hodnot  $\mathbf{p} = [E(U), M(U), U]$  z třírozměrného prostoru  $\mathbf{F} \equiv E \times M \times U$  nazýváme „flukтуаčním bodem“ (stavem) fluidní vrstvy při rychlosti  $U$  proudícího plynu. Pro danou fluidní vrstvu je  $\mathbf{p}$  funkcí průtokové rychlosti plynu

$U$ , t.j.  $\mathbf{p} = \mathbf{p}(U)$ . Pro  $U \in [0, U_{\max}]$  reprezentuje  $\mathbf{p}(U)$  křivku v prostoru  $\mathbf{F}$ , kterou nazýváme fluktuální charakteristikou (fluidní vrstvy). Projekci křivky do rovin  $E \times M$  a  $E \times U$  obdržíme graf „fluktuální charakteristiky“. Do tohoto grafu zaneseme změřené body  $\mathbf{p}(U_i)$  pro  $i = 1, 2, \dots, n_{\text{exp}}$ , kde  $n_{\text{exp}}$  je počet experimentálních bodů daného experimentu.

Jestliže se během provozu nemění žádný jiný provozní parametr fluidní vrstvy kromě rychlosti průtoku  $U$ , nazýváme tuto skutečnost „konkrétní realizací fluidní vrstvy“. Fluktuální charakteristika konkrétní realizace fluidní vrstvy je reprezentována křivkou neměnnou v čase. Změnou realizace fluidní vrstvy dochází obecně ke změně průběhu její charakteristické křivky. Fluidní vrstvu s neměnnou fluktuální charakteristikou nazýváme vrstvou stacionární. Vrstvu, jejíž fluktuální charakteristika se mění s časem, nazveme vrstvou nestacionární.

### Obecné transformace charakteristik

Jakákoliv změna materiálových a fyzikálních vlastností fluidní vrstvy je vždy provázána změnou průběhu příslušné fluktuální charakteristiky. Platí také ale opačné tvrzení: změna průběhu charakteristické křivky upozorňuje na to, že se vlastnosti fluidní vrstvy změnily. Nás bude především zajímat, jaký je vzájemný vztah mezi původní charakteristikou a charakteristikou po změně fyzikálních vlastností dané vrstvy. Cílem je ze způsobu změn charakteristických křivek odhadnout, k jakým změnám fyzikálních vlastností zkoumané vrstvy dochází. Ke srovnání dvou různých fluktuálních charakteristik použijeme metodu transformace jedné křivky na druhou, t.j. transformace souřadnic  $U$ ,  $E$  a  $M$ , při níž originální křivka přejde v křivku druhou resp. v křivku s nejmenší odchylkou (ve smyslu nejmenších čtverců) od originálu.

Dvě charakteristické křivky mohou být na sebe transformovány nejrůznějšími, obecně nelineárními transformacemi souřadnic  $U$ ,  $E$ ,  $M$ . Nejjednodušší transformací je transformace lineární. Lineární transformace popisují celou řadu důležitých a častých změn fluidních vrstev. Jednotlivé případy budou popsány dále.

### Lineární transformace charakteristik

Předpokládejme, že symbol  $E_0$  reprezentuje úroveň šumu pozadí, to je úroveň fluktuací, které vykazuje fluidní vrstva v klidovém stavu. Dále předpokládejme, že daná fluidní vrstva je popsána charakteristickou křivkou

$$[U, E(U), M(E)] \quad (6)$$

Nechť symboly  $\Delta$ ,  $a$ ,  $b$  značí tři konkrétní reálná čísla. Budeme říkat, že charakteristická křivka

$$[\underline{U}, \underline{E}(U), \underline{M}(E)] \quad (7)$$

je lineárně podobná (lineárně transformována z) křivce  $(I)$ , jestliže platí vztahy:

$$\underline{U} \cong \beta \cdot (U - \Delta) \quad , \quad \underline{E} - E_0 \cong \alpha \cdot (E - E_0) \quad , \quad (8) \\ \underline{M} = M$$

Jak uvidíme dále, lineárně podobné si jsou charakteristické křivky v případě některých důležitých základních změn ve fluidních vrstvách. Po určení parametrů  $\Delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  mohou tato čísla kvantitativně určovat velikost dotyčných změn. Máme tak dán jistý nástroj nejen pro určení typů změn vrstvy, ale i pro odhad velikostí těchto změn. V následujících kapitolách budou rozebrány některé konkrétní případy takových změn a jejich promítnutí do změn fluktuálních charakteristik.

### Experimentální část

#### Změna množství materiálu ve vrstvě při konstantním průměru částic

Změna množství materiálu ve fluidní vrstvě je jednou z velice častých a poměrně jednoduchých změn parametrů vrstev, které vedou ke změně jejich chování a také odpovídajícím změnám fluktuálních charakteristik. Pojmem „množství materiálu ve vrstvě“ míníme v rámci tohoto článku klidový (sypný) objem vrstvy udaný v prostorových objemových jednotkách (ml).

Při změně množství materiálu v dané realizaci fluidní vrstvy zachovává fluktuální charakteristika veškeré prahové rychlosti tříd režimů ( $U_{\text{mf}}$ ,  $U_{\text{turb}}$ ,  $U_{\text{dil}}$ ), rychlosti počátků jednotlivých režimů  $U_i$ ,  $i=1, \dots, 10$ , jakož i polohu  $U_M$ , maxima křivky  $E(U)$ . Na základě experimentálních dat lze uvést pro vztah mezi množstvím materiálu a hodnotami  $E$  empirický vzorec:

$$\frac{E_1(U) - E_0}{E_2(U) - E_0} = \left( \frac{m_1}{m_2} \right)^2 \quad (9)$$

pro všechna  $U$  z intervalu  $0 \leq U < U_{\text{out}}$

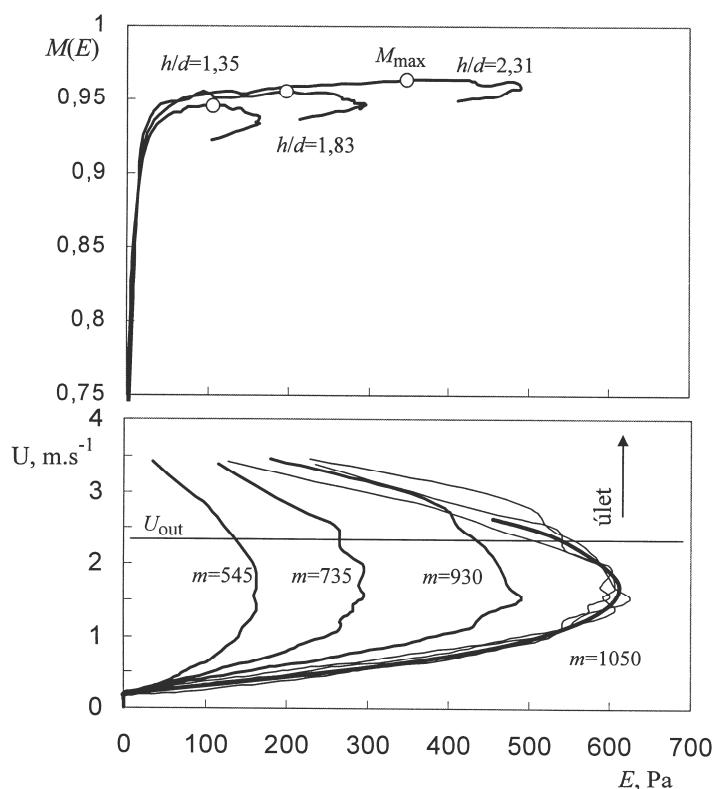
Přitom  $m_1$  a  $m_2$  značí dvě různá množství materiálu,  $E_1(U)$  a  $E_2(U)$  jim odpovídající hodnoty veličin  $E(U)$ . Symbolem  $E_0$  rozumíme hodnotu šumu pozadí. Situaci při změně množství materiálu ve vrstvě ilustruje obr. 1.

Ve vzorci (9) uvedená relace zůstává v platnosti i v případě, že bychom množstvím materiálu ve vrstvě definovali jako hmotnost nebo výšku fluidní vrstvy v klidovém stavu.

Platnost vzorce (9) byla prověřena pro vrstvy s hodnotami podílu  $h/d$  výšky a průměru vrstvy (kde  $h$  je sypná výška vrstvy a  $d$  její průměr) z intervalu  $1 \leq h/d \leq 3$ . Vztah je v praxi použitelný např. pro odhad množství materiálu, který během provozu nevratně ulétne z fluidní vrstvy, resp. množství, které bylo do vrstvy během provozu přidáno či z ní odebráno.

Jak je patrné z obr. 1, se snižováním výšky vrstvy klesá hodnota  $M_{\text{max}}$  (maximálně dosažená hodnota veličiny  $M(E)$ ), reprezentující schopnost vrstvy pístovat. Pro podíl  $h/d \in <1 \text{ až } 3>$  lze veličinu  $M_{\text{max}}$  aproximovat lineárně vztahem:

$$M_{\text{max}} = a \cdot (h/d) + b \quad (10)$$



Obr. 1. Vliv množství částic ve fluidní vrstvě na její flukтуаční charakteristiku; charakteristické křivky pro fluidní vrstvy vápence s frakcí částic 0,5–0,65 mm. Uvedeny křivky pro vrstvy s klidovým objemem  $m=545$  ml ( $h/d=1,35$ ),  $m=735$  ml ( $h/d=1,85$ ) a  $m=930$  ml ( $h/d=2,31$ ). Soustava tří slabších křivek označená množstvím  $m=1050$  ml zobrazuje přepočet tří předchozích křivek na vyznačené množství využitím vztahu (9). Silná křivka znázorňuje střední hodnotu všech tří přepočtů. Dělicí hranice se souřadnicí  $U=U_{\text{out}}$  značí začátek úletu částic mimo fluidní prostor (režim 10). Body označené značkou reprezentují maxima funkce  $M(E)$

kde  $a$  a  $b$  jsou konstanty, charakteristické pro zvolený fluidní prostor a daný materiál tvořící pevnou složku vrstvy.

Na obr. 1 je znázorněna změna flukтуаční charakteristiky pro fluidní vrstvu s částicemi vápence o frakci 0,5 až 0,65 mm. Charakteristiky jsou zobrazeny pro vrstvy o klidovém objemu 545, 735 a 930 ml, což je ekvivalentní podílům výšky a průměru vrstvy s hodnotami 1,35, 1,85 a 2,31. Pro ilustraci platnosti vztahu (9) jsou znázorněny také tři průběhy funkce  $E(U)$ , které odpovídají přepočtu původních funkcí na předpokládaný průběh při fiktivním množství 1050 ml. Křivka znázorněná silnou čarou je grafem průměrné hodnoty všech tří přepočtů. Na první pohled je patrná poměrně dobrá shoda všech tří přepočtů, a to až k meznímu průtoku  $U_{\text{out}}$ , který označuje začátek trvalého úletu z vrstvy. Naopak pro průtoky  $U > U_{\text{out}}$  je shoda podstatně menší, což je důkazem nestacionarity fluidní vrstvy po překročení prahu  $U_{\text{out}}$ . Velké rozdíly v oblasti nad prahem  $U_{\text{out}}$  jsou důsledkem různých časových průběhů měření během jednotlivých experimentů a tudíž rozdíl-

ným množstvím materiálu, který v daném časovém úseku nevratně ulétl mimo fluidní prostor.

Vztah (9) je velmi dobře využitelný pro určení změny množství materiálu v případě, že do fluidní vrstvy je vsypán materiál původních vlastností nebo k určení množství materiálu, které se z vrstvy ztratilo během provozu.

Právě popisovaná změna fluidní vrstvy je nejjednodušším případem vedoucím k lineární transformaci charakteristických flukтуаčních křivek. V tomto speciálním případě je dána vztahy (8) po dosazení parametrů:

$$\Delta = 0, \beta = 1 \quad a \quad \alpha = \left( \frac{m_1}{m_2} \right)^2 \quad (11)$$

Hystereze po částečném úletu pevného materiálu během provozu

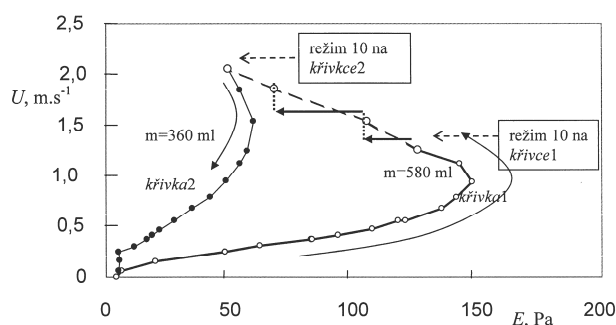
V tomto odstavci se věnujeme jevu, který nazýváme hysterezí flukтуаční charakteristiky. Efekt vzniká tak, že

v zařízení je postupně zvyšován průtok plynu od  $0 \text{ m s}^{-1}$  až po průtok, který přesáhne prah  $U_{\text{ent}}$  trvalého úletu (t.j. počátek režimu 10 z tabulky I). Přitom určíme pro toto rozpětí  $U$  průběh flukuační charakteristiky. Jestliže je potom určována charakteristika vrstvy pro postupně se snižující průtoky plynu, výsledná křivka není identická s původní. Příčinou je skutečnost, že po přestoupení průtoku nad mez  $U_{\text{ent}}$  jistá část pevných částic opustí trvale fluidní prostor a navíc odlétnou z vrstvy spíše částice menších velikostí. To ale znamená, že vrstva nemá původní vlastnosti a tedy podle již zavedené definice se změnila jedna konkrétní realizace vrstvy v druhou. A k oběma realizacím pak pochopitelně patří různé charakteristické křivky.

Příklad jednoho takového experimentu znázorňuje obr. 2.

Pro fluidní vrstvu o klidovém objemu 580 ml s frakcí 0,1 mm až 0,65 mm síranu vápenatého je postupně zvyšována průtoková rychlost vzduchu od  $0 \text{ m s}^{-1}$  přes její prah fluidace ( $0,11 \text{ m s}^{-1}$ ) až k prahu  $U_{\text{ent}}$  trvalého úletu. Tomuto ději přísluší průběh křivky, označené jako *křivka1*. Při rychlosti  $U_{\text{ent}}=1,25 \text{ m s}^{-1}$  již dochází k trvalému úletu nekontrolovatelného množství částic menších rozměrů, a to po obecně nedefinované dobu. Při zachování konstantního  $U$  hodnota  $E(U)$  postupně klesá, což je znázorněno na grafu šipkou. Pokles se po dostatečně dlouhé době zastaví, a to tehdy, když z vrstvy ulétnou všechny částice menších velikostí. Po skokovém zvýšení  $U$  pokračuje charakteristická křivka v dalším poklesu s novou souřadnicí  $U$ . Charakteristická křivka tak má v oblasti třídy 10 schodovitý charakter, závislý na časovém rozvrhu skokových změn rychlosti  $U$ . Při dosažení rychlosti  $U=2,06 \text{ m s}^{-1}$  bylo zvyšování průtoku ukončeno.

Zpětné snižování rychlosti  $U$  se začalo provádět až po čase, kdy již z vrstvy prakticky neulétal žádný materiál. Charakteristická funkce  $E(U)$  této fáze experimentu je označena jako *křivka2*. Jde o křivku zcela jiné realizace fluidní vrstvy, než byla realizace počáteční. Zmenšil se



Obr. 2. Hysteréze flukuační křivky při nevratném úletu části materiálu z fluidní vrstvy; materiál vrstvy tvoří částice síranu vápenatého. ○ křivka 1 – charakteristická křivka pro vrstvu 580 ml s frakcí 0,1 až 0,65 mm, s prahem fluidace  $0,11 \text{ m s}^{-1}$  a prahem nevratného úletu  $1,25 \text{ m s}^{-1}$ . ● křivka 2 – charakteristika vrstvy po nevratném úletu části materiálu, objem vrstvy 360 ml, frakce 0,5 až 0,65 mm, prah fluidace  $0,27 \text{ m s}^{-1}$ , prah nevratného úletu  $2,06 \text{ m s}^{-1}$

objem vrstvy, změnila se frakčnost. Důležitým momentem je, že hodnota  $U=2,06 \text{ m s}^{-1}$  je pro tuto novou realizaci jejím prahem úletu, t.j. nové  $U_{\text{ent}}=2,06 \text{ m s}^{-1}$ . Po ukončení experimentu byly zjištěny parametry nové vrstvy. Výsledná vrstva obsahovala částice v intervalu od 0,5 mm až do 0,65 mm. Nový klidový objem této realizace byl určen na 360 ml.

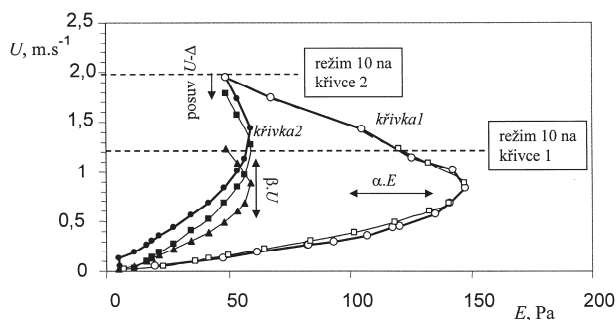
Z hysteréze flukuační křivky, která vzniká při postupném snižování průtokové rychlosti po nevratném úletu drobnějších částic mimo fluidační prostor, lze poměrně spolehlivě odhadnout prahové rychlosti jednotlivých fluidačních tříd nové (zbytkové) fluidní vrstvy, hlavně pak ale určit množství materiálu, který fluidní prostor během provozu opustil. Možný je také odhad změny frakčnosti originální vrstvy a vrstvy po částečném úletu. K tomu je však nutno použít poznatků uváděných v následující kapitole. Obě křivky lze vzájemně převést obecně lineární transformací souřadnic. Postup při transformaci je znázorněn na obr. 3. Sestává z následujících kroků:

Krok 1: Posuv *křivky2* podél souřadnice  $U$  tak, aby došlo k zákrytu prahů fluidace obou charakteristik. Délka posuvu  $\Delta$  je dána vztahem:

$$\Delta = U_{mf}^{(křivka2)} - U_{mf}^{(křivka1)} \quad (12)$$

Přitom horní indexy u veličin  $U$  označují původní vrstvu resp. vrstvu po hysterézi, dolní index *mf* označuje, že jde o prahy fluidace.

Krok 2: Lineární dilatace *křivky2* ve směru osy  $U$ . Koeficient dilatace  $\beta$  určíme tak, aby obě křivky dosahovaly svého maxima  $E(U)$  „zhruba“ pro stejnou hodnotu  $U$ . Transformaci souřadnice  $U$ , složenou z obou dílčích, mů-



Obr. 3. Postup při transformaci *křivky2* na křivku, srovnatelnou s původní *křivkou1*; ○ křivka 1 – charakteristická křivka pro vrstvu 580 ml s frakcí 0,1 až 0,65 mm, po posuvu podél osy  $U$  o hodnotu  $\Delta U = -0,11 \text{ m s}^{-1}$ , prah fluidace v tomto zobrazení je  $0 \text{ m s}^{-1}$ . ● křivka 2 – charakteristická křivka vrstvy po nevratném úletu části materiálu, objem vrstvy 360 ml, frakce 0,5 až 0,65 mm. Křivka posunuta podél osy  $U$  o hodnotu  $\Delta U = -0,11 \text{ m s}^{-1}$ , prah fluidace v tomto zobrazení je  $0,16 \text{ m s}^{-1}$ . Postup lineární transformace: ■ posunutá křivka 2 ve směru  $U$  o její prah fluidace  $\Delta=0,16 \text{ m s}^{-1}$ . ▲ dilatace souřadnice  $U$  parametrem  $\beta=0,65$ . □ dilatace souřadnice  $E$  násobením parametrem  $\alpha=2,49$ . Tato křivka velice dobře aproximuje originální křivku 1

žeme zapsat ve tvaru:

$$\bar{U} = \Delta + \beta \cdot (U - \Delta) \quad (13)$$

Krok 3: Lineární dilatace souřadnice  $E$ :

$$\bar{E} = E_0 + \alpha \cdot (E - E_0) \quad (14)$$

kde  $\alpha$  je určeno tak, aby maximum funkce  $E^{(křivka1)}(U)$  a maximum funkce  $E^{(křivka2)}(U)$  po transformaci (14) byly „pokud možno“ shodná. Přitom hodnota  $E_0$  ve vztahu (14) reprezentuje úroveň pozadí veličiny  $E$ .

Hledáme tedy lineární transformaci souřadnic tak, aby výsledná funkce  $\bar{E}(U)$  co nejlépe aproximovala (ve smyslu minima sumy čtverců odchylek) ji odpovídající úsek originální funkce  $E(U)$ . Požadavkem je tak definován optimalizační proces určený pro fitování tří parametrů  $\Delta$ ,  $\beta$  a  $\alpha$ . V našem případě byly optimalizací určeny parametry s hodnotami:  $\Delta=0,16 \text{ m s}^{-1}$ ,  $\beta=0,7$  a  $\alpha=2,49$ .

Interpretací parametrů obdržíme následující vlastnosti nové fluidní vrstvy:

1) Parametr  $\Delta$  určuje, že prah fluidace nové vrstvy po úletu je  $\bar{U}_{mf} = U_{mf} + \Delta = 0,27 \text{ m s}^{-1}$ . Tento prah skutečně velmi dobře odpovídá experimentálně určeným hodnotám po ukončení provedeného experimentu.

2) Použitím vztahů (11) můžeme určit dosazením hodnoty  $\alpha=2,49$  množství hmoty zbylé ve vrstvě po úletu:

$$m^{(křivka2)} = m^{(křivka1)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\alpha}} = 580 \cdot \frac{1}{\sqrt{\alpha}} = 367 \text{ ml} \quad (15)$$

což se dobře shoduje s množstvím, skutečně zjištěným jako zbytek po ukončení experimentu (zjištěno 360 ml).

3) Ze skutečnosti, že transformovaná křivka  $\bar{E}(U)$  aproximuje původní charakteristickou křivku *křivka1* (viz obr. 3), je možno konstatovat, že veškeré prahy mezi třídami a režimy mají tyto funkce shodné. Inverzí vztahu (13) a použitím (12) je možno odvodit vztah pro výpočet prahů tříd i režimů výsledné vrstvy v závislosti na hodnotách těchto prahů pro vrstvu původní:

$$U_{prah}^{(křivka2)} = \frac{U_{prah}^{(křivka1)} - U_{mf}^{(křivka1)}}{\beta} + U_{mf}^{(křivka1)} \quad (16)$$

kde dolní index *prah* udává název třídy resp. číslo daného režimu.

### Vliv velikosti částic

Velikost částic fluidní vrstvy je jedním z důležitých parametrů, který určuje chování fluidních vrstev a má rozhodující vliv na jejich fluidační režimy. Proto se také rozhodujícím způsobem podílí na tvaru příslušných fluktuálních charakteristik dané vrstvy. Charakteristiky se v souvislosti s tím velice citlivě mění např. při rozměňování materiálu během delšího provozu dané vrstvy nebo v případě aglomerace částic ve vrstvě.

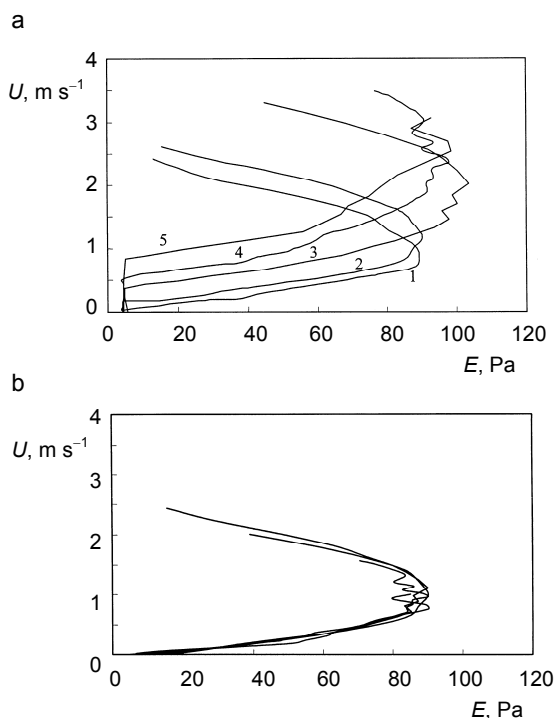
Předpokládáme stejná objemová množství (v klidovém stavu, v ml) částic téhož materiálu. Vrstvy se budou lišit pouze velikostí použitých částic. Ke studiu výše zmíněného vlivu byly provedeny experimenty na dvou materiálech, které se od sebe podstatně liší jak tvarem částic,

Tabulka II

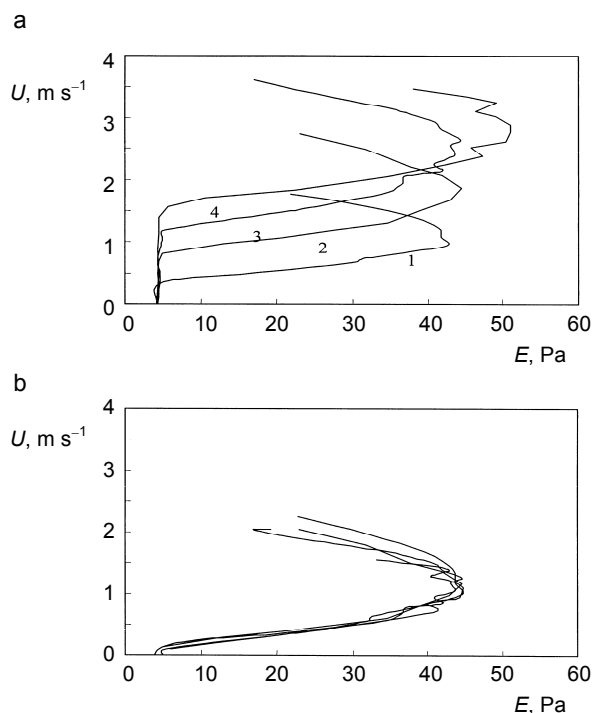
Přehled velikostí částic  $d_p$  při experimentech a závislost jejich vlivu na parametry lineárních transformací fluktuálních charakteristik

| Materiál – balotina <sup>a</sup> $\rho=1,58 \text{ g ml}^{-1}$         |                       |          |         |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------|---------|
| $d_p$ [mm]-průměr                                                      | $\Delta \cong U_{mf}$ | $\alpha$ | $\beta$ |
| 0,28                                                                   | 0,10                  | 0,99     | 1,10    |
| 0,56                                                                   | 0,18                  | 1,00     | 1,00    |
| 0,77                                                                   | 0,43                  | 1,15     | 0,70    |
| 0,90                                                                   | 0,53                  | 1,09     | 0,53    |
| 1,30                                                                   | 0,84                  | 1,09     | 0,45    |
| Materiál – čistírenské kaly <sup>b</sup> $\rho=0,52 \text{ g ml}^{-1}$ |                       |          |         |
| $d_p$ [mm]-průměr                                                      | $\Delta \cong U_{mf}$ | $\alpha$ | $\beta$ |
| 0,65                                                                   | 0,32                  | 0,956    | 1,55    |
| 1,30                                                                   | 0,69                  | 1,000    | 1,00    |
| 2,40                                                                   | 1,07                  | 0,995    | 0,80    |
| 4,50                                                                   | 1,39                  | 1,145    | 0,75    |

<sup>a</sup> Balotina – přísně kulové skleněné částice s velkou sypnou hustotou  $\rho$ ; <sup>b</sup> čistírenské kaly – tvarově velice různorodé částice malé sypné hustoty



Obr. 4. Vliv velikosti částic na průběh fluktuálních charakteristik fluidní vrstvy s balotinou. a) průběhy fluktuálních charakteristik pro různé frakce; 1: frakce 0,25–0,315 mm; 2: frakce 0,5–0,63 mm; 3: frakce 0,65–0,9 mm; 4: frakce 0,8–1 mm; 5: frakce 1,2–1,4 mm. b) průběhy charakteristik po lineárních transformacích; všechny křivky lineárně deformovány na průběh křivky 2. Průběh této křivky v obou grafech označen silnější čarou



Obr. 5. Vliv velikosti částic na průběh fluktuálních charakteristik fluidní vrstvy s čistírenskými kaly. a) průběhy fluktuálních charakteristik pro různé frakce; 1: frakce 0,5–0,8 mm; 2: frakce 1–1,6 mm; 3: frakce 2–2,8 mm; 4: frakce 4–5 mm; b) průběhy charakteristik po lineárních transformacích; všechny křivky lineárně deformovány na průběh křivky 2. Průběh této křivky v obou grafech označen silnější čarou

tak i některými fyzikálními parametry. Tím by měla být dostatečně zaručena možnost posouzení obecnější platnosti získaných poznatků. Použity byly částice balotiny (přísně kulovité částice s velkou specifickou hmotností) a částice sušených čistírenských kalů (poměrně lehké částice velice rozmanitých tvarů). Pro oba materiály bylo zkoumáno několik velikostních frakcí. Na základě experimentálních dat byly zobrazeny pro jednotlivé případy příslušné fluktuální charakteristiky a tyto srovnány mezi sebou. Závěrem byly formulovány dále prezentované poznatky pro deformace charakteristik v závislosti na změnách velikosti částic. Přehled použitých materiálů je uveden společně s dalšími údaji v tabulce II.

Podrobné prozkoumání obdržených charakteristických křivek umožňuje shrnout jejich vlastnosti do následujících tezí.

Charakteristické funkce  $E(U)$  pro fluktuální charakteristiky vrstev stejného materiálu při odlišné velikosti částic jsou na sebe vzájemně dobře transformovatelné pomocí v úvodu popsaných lineárních transformací souřadnic  $U$  a  $E$ , daných parametry  $\alpha$ ,  $\Delta$  a  $\beta$ . Výsledky transformací jsou názorně na obr. 4 a 5. Z těchto obrázků a hodnot parametrů uvedených v tab. II plynou následující poznatky:

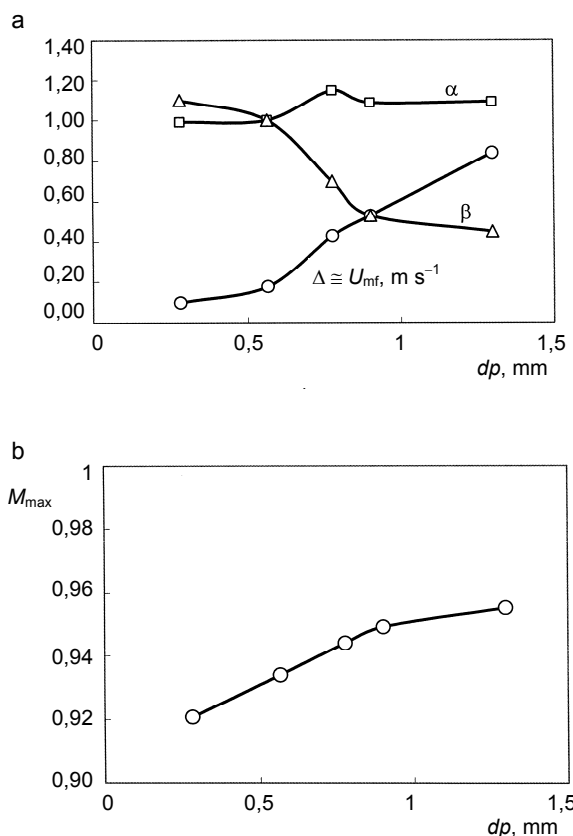
Parametr  $\Delta$  je silně závislý na průměrné velikosti  $d_p$  částic ve vrstvě a reprezentuje změnu práhů fluidace  $U_{mf}$  dané vrstvy pro různé velikosti částic.

Parametr  $\beta$  reprezentující dilataci souřadné osy  $U$  je také na  $d_p$  závislý poměrně výrazně.

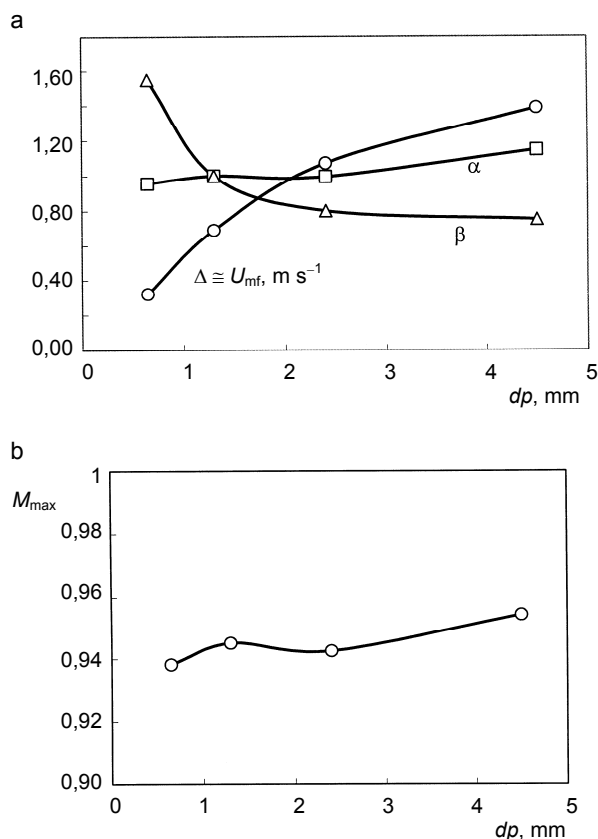
Parametr  $\alpha$ , reprezentující dilataci souřadné osy  $E$  se mění s průměrnou velikostí částic  $d_p$  relativně málo (v obou případech mezi hodnotami 0,95 až 1,14). To lze jinými slovy vyjádřit jako skutečnost, že maximum funkce  $E(U)$  pro daný materiál závisí na  $d_p$  poměrně slabě.

Závislosti diskutovaných parametrů na  $d_p$  pro oba prozkoumané materiály jsou znázorněny na obr. 6 a 7. Pro úplnost je znázorněna také závislost maximální hodnoty  $M_{\max}$  charakteristické funkce  $M(E)$ . Z grafu je patrné, že i toto maximum se s  $d_p$  mění poměrně málo, a to tak, že s rostoucím průměrem částic roste. Jinak řečeno schopnost vrstvy pístovat roste s velikostí částic.

Poznamenejme na závěr, že z lineární podobnosti charakteristických funkcí  $E(U)$  pro různé průměry částic zůstávají na charakteristických křivkách zachovány poměry práhů jednotlivých tříd fluktuálních režimů  $U_{mf}$ ,  $U_{\text{turb}}$ ,  $U_{\text{dil}}$  a  $U_{\text{emax}}$  a samozřejmě i práhů samotných fluidních režimů.



Obr. 6. Závislosti parametrů  $\Delta$ ,  $\alpha$  a  $\beta$  lineárních transformací flukтуаčních charakteristik na velikosti částic ve vrstvě s balotinou. a) Parametry  $\Delta$ ,  $\alpha$  a  $\beta$ ; b) Závislost maxima veličiny  $M(U)$



Obr. 7. Závislosti parametrů  $\Delta$ ,  $\alpha$  a  $\beta$  lineárních transformací flukтуаčních charakteristik na velikosti částic ve vrstvě s čistírenskými kaly; a) parametry  $\Delta$ ,  $\alpha$  a  $\beta$ ; b) závislost maxima veličiny  $M(U)$

## Závěry

V našich předchozích pracích<sup>8,10</sup> byla zavedena metoda pro zjišťování okamžitého stavu fluidace na základě zpracování tlakových fluktuací vrstvou proudícího plynu a popsán způsob identifikace konkrétních fluidních režimů. V právě předkládaném textu pak jsou popsány způsoby, jak ze změn flukтуаčních charakteristik odhadovat některé základní změny, ke kterým může během provozu fluidačního procesu často docházet. V obou právě zmíněných publikacích jsou tak obsaženy důležité poznatky, které umožňují vypracovat řadu algoritmů a programů pro výpočetní techniku sloužící k automatizované identifikaci stavu fluidních vrstev, varování v případě přiblížení provozu k havarijním stavům a k odhadu některých změn fluidace za provozu fluidní vrstvy. Takové prostředky mohou být přínosem a zkvalitněním prací spojených s řízením a obsluhou fluidních reaktorů. Prezentované poznatky již byly aplikovány při řízení poloprovozního fluidního reaktoru o rozměrech 0,3×0,3×5(m), přičemž nebyly zjištěny žádné podstatné odchylky od chování v článku popisovaném experimentálním zařízením.

*Předkládaný text vznikl na základě experimentálních prací v rámci grantového projektu IAA400720701 Grantové agentury Akademie věd ČR.*

## Seznam symbolů

|            |                                                                                              |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a_i$      | amplituda $i$ -té spektrální čáry                                                            |
| $c_i$      | komplexní hodnota $i$ -té spektrální čáry (příslušné frekvenci $f_i$ ), Pa                   |
| $d$        | průměr vrstvy, cm                                                                            |
| $d_p$      | průměrná velikost částic ve vrstvě, mm                                                       |
| $E_0$      | hodnota $E$ pro šum pozadí                                                                   |
| $E(U)$     | charakteristická veličina tlakových fluktuací při rychlosti $U$ , definovaná vztahem (5), Pa |
| <b>F</b>   | trojrozměrný prostor $E \times M \times U$                                                   |
| FFT        | rychlá Fourierova transformace                                                               |
| $f_i$      | frekvence spektrální čáry, Hz                                                                |
| $f_M$      | medián setříděného spektra, Hz                                                               |
| $f_{\max}$ | maximální frekvence diskrétního Fourierova spektra, Hz                                       |
| $f_{\min}$ | minimální frekvence diskrétního Fourierova                                                   |

|                   |                                                                                                       |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | spektra, Hz                                                                                           |
| $h$               | výška vrstvy, cm                                                                                      |
| $m$               | množství částic ve vrstvě (klidový objem vrstvy), ml                                                  |
| $M(U)$            | charakteristická veličina tlakových fluktuací při rychlosti $U$ , definovaná vztahem (4), bezrozměrná |
| $P$               | tlak plynu ve vrstvě, Pa                                                                              |
| $\mathbf{p}$      | vektor $[E(U), M(U), U]$ , fluktuační stavový vektor                                                  |
| $\Delta P$        | tlaková ztráta, Pa                                                                                    |
| $U$               | rychlost plynu ve volném průřezu kolony, $\text{m s}^{-1}$                                            |
| $U_{\text{dil}}$  | práh třídy řídkých režimů fluidní vrsrvy, $\text{m s}^{-1}$                                           |
| $U_{\text{out}}$  | práh trvalého úletu fluidní vrsrvy (režimu 10), $\text{m s}^{-1}$                                     |
| $U_{\text{max}}$  | maximum provozované průtokové rychlosti, $\text{m s}^{-1}$                                            |
| $U_{\text{mf}}$   | práh fluidace fluidní vrsrvy, $\text{m s}^{-1}$                                                       |
| $U_{\text{turb}}$ | práh třídy turbulentních režimů fluidní vrsrvy, $\text{m s}^{-1}$                                     |
| $W$               | výkon spektra, $\text{Pa}^2$                                                                          |

## Ř e c k é s y m b o l y

|          |                                                           |
|----------|-----------------------------------------------------------|
| $\beta$  | dilatace souřadnic osy $U$                                |
| $\alpha$ | dilatace souřadnic osy $E$                                |
| $\Delta$ | posuv počátku os charakteristické křivky ve směru osy $U$ |
| $\rho$   | sypná hustota, $\text{kg m}^{-3}$                         |

## LITERATURA

1. Yates J. G.: *Fundamentals of Fluidized-Bed Chemical Processes*. Butterworths, London 1983.
2. Yates J. G., Simons S. J. R.: *Int. J. Multiphase Flow* 20, Suppl., 297 (1994).
3. Hartman M., Svoboda K., Veselý V., Ziolkowski D.: *Chem. Listy* 81, 1233 (1987).
4. Hartman M., Beran Z., Svoboda K., Veselý V.: *Collect. Czech. Chem. Commun.* 60, 1 (1995).
5. Svoboda K., Čermák J., Hartman M., Drahoš J., Selucký K.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 22, 514 (1983).
6. Svoboda K., Čermák J., Hartman M., Drahoš J., Selucký K.: *AIChE J.* 30, 513 (1984).
7. Zhao G.-B., Zang Z.-R.: *AIChE J.* 49, 869 (2003).
8. Trnka O., Veselý V., Hartman M., Beran Z.: *AIChE J.* 46, 509 (2000).
9. Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T.: *Numerical Recipes in Pascal*. Cambridge Univ. Press, Cambridge 1992.
10. Trnka O., Hartman M., Veselý V.: *Chem. Listy* 99, 330 (2005).

**O. Trnka and M. Hartman** (*Institute of Chemical Process Fundamentals, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague*): **Influence of Changes in Physical Parameters of Fluidized Beds on Its Characteristics of Pressure Fluctuations**

Fluctuation characteristics are effective tools for determination of the type and state of fluidization during the operation of a fluid layer. They are based on monitoring and processing of fluctuation spectra of a gas in which a solid is fluidized. A method of evaluation of changes in operation parameters of the layers during a long operation of a fluid device, based on assessment of changes in corresponding fluctuation characteristics is proposed.