

СТРУКТУРА ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СЛОЯ

Докт. техн. наук, проф. БОКУН И. А.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: fes@bntu.by

Предложена структура пульсирующего слоя, представляющего собой состояние дисперсного материала, который продувается прерывистым газовым потоком со скоростью, достаточной, чтобы привести его в состояние движения. При этом слой в течение одного цикла находится во взвешенном, падающем и неподвижном состояниях, что изменяет укладку частиц, пути прохода газа через слой, позволяет осуществить эффективный межфазовый теплообмен даже несыпучих непсевдоожигающихся зернистых материалов.

Рассмотрены процесс образования ударных струй и их влияние на образование пузырей в пульсирующем слое. При включении дутья нарушается баланс между силой гидродинамического сопротивления, с одной стороны, и силами тяжести, инерции частиц и их сцепления со стенками – с другой. Слой переходит в состояние пульсирующего псевдоожигения, представляющего собой газодисперсную смесь, внутри которой импульсное повышение давления в каком-либо месте распространяется во все стороны в виде волн давления (сжатия). Эти волны являются источником образования ударных струй, сила действия которых в два раза больше, чем при стационарном потоке.

Волны давления в зависимости от скорости движения в газодисперсной системе подразделяются на слабые и сильные. Слабые волны давления движутся со скоростью звука, сильные – распространяются в газодисперсной системе в активной фазе пульсирующего слоя со скоростью, превышающей скорость звука. Особенность сильной волны давления состоит в том, что параметры системы (давление, плотность и др.) изменяются скачком.

Рассмотрен режим падения слоя в пассивной стадии цикла, который наступает после прекращения действия газового импульса. При этом взвешенный слой зернистого материала, движущийся вверх, переходит в состояние падения, в процессе которого изменяется структура самого слоя.

Ключевые слова: пульсирующий слой, структура, ударная струя.

Ил. 1. Библиогр.: 10 назв.

STUCTURE OF PULSED BED

BOKUN I. A.

Belorussian National Technical University

The structure of pulsed layer is proposed which can be suggested as a state of particulates that is blown by intermittent gas flow with speed which has the force to start material moving. Layer during one cycle is in a suspension, falling down and immobile state resulting in changes of particles arrangement as well as ways of gas flowing through layer. Moreover, it allows carrying out effective interphase heat exchange even adamant real granulation.

The process of formation of impact flows is considered as well as their influence on formation of air bubbles in pulsed layer. At startup of air blast the balance between the force of hydro-dynamic resistance is broken, on one side, and forces of gravity, particles inertia and their links with walls on the other side. The layer is transferred in the state of pulsed pseudo-fluidization, and presents gas-disperse mixture, inside of which impulse of pressure increasing is spreading to all sides as

pressure waves (compression). These waves are the sources of impact flows' formation, the force of which is two times more than during the stationary flow.

The waves of pressure are divided into weak and strong ones depending on movement velocity within gas-disperse system. Weak waves are moving with a sound speed and strong ones in active phase of pulsed layer are moving over the speed of sound limit within gas-disperse system. The peculiarity of strong wave is that parameters of system (pressure, density and others) are changing in discrete steps.

The article describes the regime of layer's falling down in the passive stage of cycle, which begins after finishing of gas impulse action. And suspension layer of moving up granular material is transferred in the state of falling resulting in change of the layer structure.

Keywords: pulsed bed, structure, crushing wave.

Fig. 1. Ref.: 10 titles.

Псевдооживление зернистого материала как особый технологический прием получило широкое распространение в различных отраслях промышленности. Это вызвано уникальной особенностью взвешенных слоев дисперсных материалов к саморегулированию гидродинамических характеристик слоя, а также поддержанию постоянного уровня потерь напора в широком диапазоне изменения скорости газа. Создаются благоприятные условия для увеличения поверхности контакта взаимодействующих фаз без значительного изменения гидродинамического сопротивления слоя. В псевдооживленных системах достигаются высокие коэффициенты теплоотдачи между слоем и погружаемыми теплообменными поверхностями. Однако реализация ряда технологических процессов в псевдооживленном слое не только неэффективна, но в ряде случаев невозможна из-за каналообразования, комкования, образования неподвижных агломератов, повышенного уноса частиц зернистого материала из слоя.

Как показали исследования [1, 2], эти недостатки преодолеваются путем продувания слоя плохо сыпучих зернистых материалов пульсирующим (прерывистым) газовым потоком со скоростью, достаточной для того, чтобы привести его в состояние движения. При этом слой в течение одного цикла находится во взвешенном, падающем и неподвижном состояниях, что изменяет укладку частиц, пути прохода газа через слой, позволяет осуществить эффективный межфазовый теплообмен даже нессыпучих непсевдооживляющихся зернистых материалов.

Кроме того, пульсирующий слой представляет практический интерес не только для обработки плохо сыпучих и непсевдооживляющихся материалов, но и в ряде случаев при полной возможности их псевдооживления позволяет получать высокие коэффициенты теплообмена с поверхностями нагрева или охлаждения при расходах газа, намного меньших, чем при псевдооживлении того же слоя [3]. Это важно при проведении целого ряда технологических процессов, требующих максимального подвода или отвода теплоты от материалов при возможно меньшем количестве газов.

После включения дутья нарушается баланс между силой гидродинамического сопротивления, с одной стороны, и силами тяжести, инерции частиц и их сцепления со стенками – с другой. Слой переходит в состояние пульсирующего псевдооживления, представляющего собой газодисперсную смесь, внутри которой импульсное повышение давления в каком-либо ме-

сте распространяется во все стороны в виде волн давления (сжатия). Эти волны являются источником образования ударных струй, сила действия которых в два раза больше, чем при стационарном потоке [4].

Волны давления в зависимости от скорости движения в газодисперсной системе подразделяются на слабые и сильные. Слабые волны давления движутся со скоростью звука, которая в псевдооживленных системах рассчитывается по формуле [5]

$$c = \sqrt{\frac{k}{k+1}gh_0}, \quad (1)$$

где k – показатель адиабаты; g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ; h_0 – высота неподвижного слоя, м.

Волны давления, движущиеся в газодисперсных системах со скоростью звука, создают скачки уплотнения и газовые пузыри. При этом в активной фазе цикла скачки уплотнения вместе с волнами давления со скоростью звука перемещаются к поверхности слоя.

Сильные волны давления распространяются в газодисперсной системе в активной фазе пульсирующего слоя со скоростью, превышающей скорость звука. Как отмечено в газовой динамике [6], особенность сильной волны давления состоит в том, что параметры системы (давление, плотность и др.) изменяются скачком.

Механизм образования сильных (ударных) волн (рис. 1) в активной фазе пульсирующего слоя состоит в следующем: под влиянием импульсной подачи газа в слой через подрешеточную камеру, газораспределительную решетку (сечение 0) формируются сильные волны давления, которые вызывают расширение слоя на величину Δh в объеме $H-H_0$ и повышают давление от величины p_n (давление невозмущенного газа), в котором отсутствует газодисперсная среда, до величины p_1 (давление за фронтом волны сжатия) и вызывают повышение плотности газа на величину $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_n$ (где ρ_1 – плотность газа в волне сжатия; ρ_n – начальная плотность газа в объеме $H-H_0$). В этом случае количество газа, равное $dG = (\rho_1 - \rho_n)gFdx$, перетечет из объема $0-H_0$ в объем $H-H_0$ (F – площадь поперечного сечения камеры).

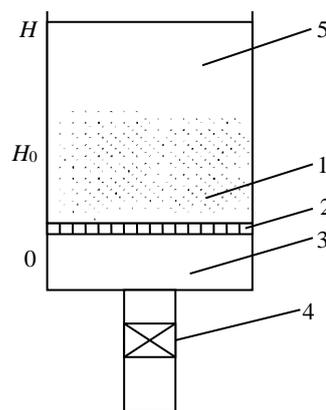


Рис. 1. Схема распространения ударной волны в пульсирующем слое:
1 – слой дисперсного материала; 2 – газораспределительная решетка;
3 – подрешеточная камера; 4 – пульсатор; 5 – надслоевое пространство

При распространении сильной волны сжатия в газодисперсной системе поток газа следует за волной сжатия (газовым пузырем), т. е. в том же направлении, что и ударная волна сжатия. Скорость газодинамического потока w_H за время dt_a можно определить из уравнения неразрывности

$$dG = \rho_1 g F w_H dt_a, \quad (2)$$

тогда

$$w_H = \frac{\rho_1 - \rho_H}{\rho_1} \frac{dh}{dt_a},$$

где dh/dt_a – скорость движения волны сжатия в активной фазе цикла; t_a – продолжительность действия импульса газового потока в активной фазе цикла.

Изменение гидравлического сопротивления пульсирующего слоя в зависимости от скорости пульсации $\Delta p = f(w)$ носит такой же характер, как и в псевдооживленном слое [7]. Вначале с увеличением скорости фильтрации сопротивление в пульсирующем слое возрастает, затем достигает максимума, после чего, незначительно снизившись, остается практически неизменным, однако всегда ниже, чем в псевдооживленном слое.

Для условий максимума гидравлическое сопротивление пульсирующего слоя описывается эмпирической зависимостью

$$\Delta p_{\text{нmax}} = [(\rho_m - \rho_T)(1 - \varepsilon_0)gH_0 - \rho_T c w] [1 - \exp(-0,8 - f)] \quad (3)$$

при $0,5 \leq f < \infty$,

где f – частота пульсации.

После прекращения действия газового импульса взвешенный слой зернистого материала, движущийся вверх, переходит в состояние падения. Падение однородной смеси в гравитационном поле описывается с помощью следующих соотношений [8]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho w}{\partial h} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial \rho_p w_p}{\partial h} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\rho_p \partial w_p}{\partial t} = \frac{\rho_p w_p \partial w_p}{\partial h} = -\rho_p \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_p} \right) g + \rho_p F_0 (w - w_p) - \frac{\rho_p}{\bar{\rho}} \frac{\partial P}{\partial h}; \quad (6)$$

$$\frac{\rho \partial w}{\partial t} + \frac{\rho w \partial w}{\partial h} + \frac{\rho_p \partial w_p}{\partial t} + \frac{\rho_p w_p \partial w_p}{\partial h} = -\frac{\partial P}{\partial h} - (\rho_p + \rho) g, \quad (7)$$

где ρ_p – плотность дисперсной среды в многофазной системе; $\bar{\rho}_p$ – плотность зернистого материала в многофазной системе; F_0 – постоянная времени обмена количеством движения между частицей и газовой фазой; w , w_p – скорость потока и падения слоя соответственно; h – координата, направленная противоположно ускорению силы тяжести g ; $\frac{\partial P}{\partial h}$ – градиент давления.

Уравнения (4) и (5) показывают, как в процессе оседания твердых частиц конечного объема газ вытесняется вверх. Характер сил, действующих

на твердые частицы, включая подъемную силу, силу сопротивления газа и градиент давления, описывается уравнением (6). Общее количество движения системы представлено уравнением (7).

В тех случаях, когда оживающим агентом является газ, а частицы достаточно крупные или плотные, происходит процесс образования газовых пузырей, не содержащих частиц. Причины образования таких пузырей до конца не выяснены [9, 10].

ВЫВОД

Предложена структура пульсирующего слоя. Рассмотрены процесс образования ударных струй и их влияние на образование пузырей в пульсирующем слое, а также режим падения слоя в пассивной стадии цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р а с ч е т расширения слоя дисперсного материала при его импульсном псевдооживлении / А. В. Федоров [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2012. – Т. 53, № 3. – С. 105–116.
2. З а б р о д с к и й, С. С. Теплообмен пульсирующего слоя влажного тетрациклина с поверхностью нагрева / С. С. Забродский, И. А. Бокун // Исследование тепло- и массообмена в технологических процессах и аппаратах. – Минск: Наука и техника, 1966. – С. 135–140.
3. Б о к у н, И. А. Теплообмен между пульсирующим слоем и пучком погруженных в него труб / И. А. Бокун // Известия АН БССР. Серия физико-энергетических наук. – 1977. – № 2. – С. 37–40.
4. Ф о р х г е й м е р, Ф. Гидравлика / Ф. Форхгеймер. – М.; Л., 1935. – 615 с.
5. Т о р р е, С. Die Theorie des Flussbettes / С. Torre // Östern Ing. Z. – 1964. – Vol. 7, No 5.
6. А б р а м о в и ч, Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М.; Л.: ГИТТЛ, 1951. – 824 с.
7. Б о р о в с к и й, В. Р. Исследование гидродинамики фонтанирующего слоя полимерного материала / В. Р. Боровский, Л. М. Мишнаевский, Н. А. Шаркова // Теплофизика и теплотехника. – Киев: Наук. думка, 1971. – Вып. 19. – С. 80–83.
8. С о у, С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. – М.: Мир, 1971. – 530 с.
9. У о л л и с, Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
10. Д э в и д с о н, И. Ф. Псевдооживление твердых частиц / И. Ф. Дэвидсон, Д. Харрисон. – М.: Химия, 1965. – 184 с.

REFERENCES

1. F e d o r o v, A. V., Fedorchenko, I. A., Vasilishin, M. S., Karpov, A. G., & Ivanov, O. S. (2012) Calculation of Bed Extension of Particulates During its Impulse Pseudo-Fluidization. *Prikladnaia Mekhanika i Tekhnicheskaiia Fizika* [Applied Mechanics and Engineering Physics], 53 (3), 105–116 (in Russian).
2. Z a b r o d s k y, S. S., & Bokun, I. A. (1966) Heat Exchange of Pulsed Bed of Moisty Tetracyclin with the Surface of Heating. *Investigation of Heat-Mass Exchange in Technological Processes and Apparatuses*. Minsk, Nauka i Tehnika. 135–140 (in Russian).
3. B o k u n, I. A. (1977) Heat Exchange Between Pulse Bed and Series of Tubes in It. *Izvestiia AN BSSR. Seriiia Fiziko-Energeticheskikh Nauk* [News of Academy of Science of BSSR. Series of Physical Sciences and Energy], 2, 37–40 (in Russian).
4. F o r g h e y m e r, F. (1935) *Hydraulics*. Moscow; Leningrad. 615 p. (in Russian).
5. T o r r e, C. (1964) Die Theorie des Flussbettes. *Östern Ing. Z.*, 7 (5) (German).
6. A b r a m o v i c h, G. N. (1951) *Applied Gas Dynamics*. Moscow; Leningrad: State Publication of Technical and Theoretical Literature. 824 p. (in Russian).
7. B o r o v s k y, V. R., Mishnaevsky, L. M., & Sharkova, N. A. (1971) Investigation of Hydro-dynamics of Spotting Bed of Polymeric Material. *Teplotfizika i Teplotekhnika* [Heat Physics and Heat Engineering]. Kiev, Nauk. Dumka, 19, 80–83 (in Russian).
8. S o u, S. (1971) *Hydro-Dynamics multi-Phase Systems*. Moscow, Mir. 530 p. (in Russian).
9. U o l l i s, G. (1972) One-Dimensional Two-Phase Flow. Moscow, Mir. 440 p. (in Russian).
10. D e v i d s o n, I. F., & Harrison, D. (1965) Pseudo-Fluidization of Solid Particles. Moscow, Chemistry. 184 p. (in Russian).

Представлена кафедрой экономики
и организации энергетики

Поступила 07.04.2014