

## ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОГО СЛОЯ КРУПНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ В СЛОЕ

Р.Л. Исьемин, С.Н. Кузьмин, А.Т. Зорин, А.В. Милованов, Е.В. Кариб,  
Н.Б. Кондуков

*ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» (ИДО), г. Тамбов; ГОУ ВПО «Московская государственная Академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

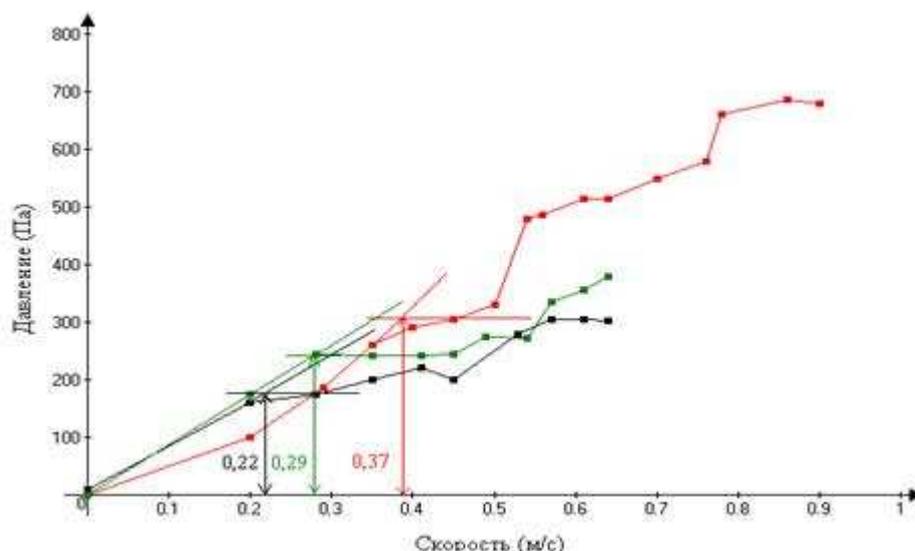
**Ключевые слова и фразы:** биогранулы; минимальная скорость псевдооживления; пульсации перепада давления.

**Аннотация:** Рассматривается возможность использования в качестве топлива отходов растениеводства. На основе проведенных экспериментов (с использованием опилок, шелухи орехов, лузги проса, пшеницы и риса) делаются выводы о преимуществах и недостатках применения данной биомассы для обработки дисперсных материалов в псевдооживленном слое.

В последние годы технология обработки дисперсных материалов в псевдооживленном слое получает все большее промышленное применение, в основном, за счет реализации технологии сжигания различного рода органических продуктов. Причем вырос интерес к использованию в качестве топлива отходов растениеводства, т.к. эта биомасса имеет достаточно высокую теплоту сгорания, не требует предварительной сушки, а ее использование не приводит к росту цен на продовольствие и не подрывает кормовую базу животноводства. Однако, эти виды биомассы содержат значительное количество легкоплавкой золы, соли щелочных металлов и соединения хлора, вызывающих коррозию поверхностей теплообмена котлов. Причем способность золы биомассы при сжигании образовывать на поверхностях нагрева отложения и вызывать коррозию находится в прямой зависимости от способности золы этой биомассы образовывать агломераты шлака в топке котла [1], которые, при сжигании этой биомассы в кипящем слое, приводят к дефлюидизации и остановке котла. Для преодоления шлакообразования нами было предложено эти виды биомассы сжигать в виде гранул в кипящем слое, образованном самими гранулами и твердыми продуктами их горения (зола и частицы коксового остатка) [2].

Для расчета топочного устройства необходимо, прежде всего, определить значение минимальной скорости псевдооживления составляющих слой частиц, однако, для крупных частиц несферической формы это невозможно сделать хорошо известным методом по графику зависимости перепада давления в слоях от скорости продуваемого через слой газа.

К примеру, на рис. 1 представлены графики зависимости перепада давления в слое опилок, лузги риса и шелухи орехов от скорости воздуха, продуваемого через слой [3]. Авторы указанной работы утверждают, что слои указанных выше частиц переходят в псевдооживленное состояние при скоростях газа 0,22; 0,29 и 0,37 м/с. Очевидно, такое утверждение авторы делают на основе своих визуальных наблюдений, т.к. на основании рис. 1 такие выводы сделать невозможно. Подобные выводы о невозможности использования графика зависимости перепада давления в слое от скорости продуваемого через слой газа для определения минимальной скорости псевдооживления были получены в работе [4] при исследовании процесса псевдооживления частиц, полученных при измельчении отходов древесины (мебели, строительных конструкций, рам картин и т.п.) и в работе [5] при исследовании псевдооживления хлопковых отходов (средний диаметр 5 мм, средняя длина 25 мм).



**Рис. 1. Зависимость перепада давления в слое от скорости воздуха для слоя: опилок (а), рисовой шелухи (б) и кожуры орехов (с) [3]**

В работе [6] минимальную скорость псевдоожижения предложено оценивать по результатам анализа случайного процесса пульсаций перепада давления в слое. В частности было установлено, что величина среднеквадратичного отклонения ( $\sigma$ ) этого случайного процесса линейно меняется с изменением скорости газа ( $U$ ), продуваемого через слой:

$$\sigma = A + B U$$

В момент псевдоожижения, согласно [6],  $\sigma = 0$ , что позволяет легко оценить значение  $U_{mf}$ .

Однако, данный метод оценки минимальной скорости псевдоожижения, очевидно, применим только для слоев относительно мелких частиц (диаметром 0,175–3,86 мм [6; 7]). Для крупных частиц или их смеси с мелкими частицами (в работе [8] исследован процесс псевдоожижения смеси частиц сои, диаметром 7,68 мм, и силикагеля, диаметром 1,5–3,09 мм) зависимость  $\sigma = f(U)$  носит нелинейный характер и использовать ее для оценки минимальной скорости псевдоожижения невозможно.

Таким образом, задачей настоящего исследования является разработка метода оценки минимальной скорости псевдоожижения для полидисперсных слоев крупных частиц несферической формы.

Исследованию подвергались слои гранул, изготовленных из соломы озимой пшеницы, лузги проса и пшеницы (табл. 1). Высота неподвижного слоя пеллет составляла во всех опытах 220 мм.

Исследования проводились в аппарате прямоугольного поперечного сечения 194 x 485 мм и высотой 1500 мм, который опирался на воздухораспределительную решетку с долей «живого сечения» 5 %.

Таблица 1

### Характеристики гранул

Наименование характеристики	Гранулы из соломы	Гранулы из лузги проса	Гранулы из лузги подсолнечника
Диаметр, мм	7,0	8,0	10,0
Отношение диаметра гранулы к средней длине	0,59	0,39	0,83
Плотность гранулы, $\rho$ кг/м <sup>3</sup>	1190	1250	1211
Порозность слоя в состоянии минимального псевдоожижения	0,59	0,55	0,46

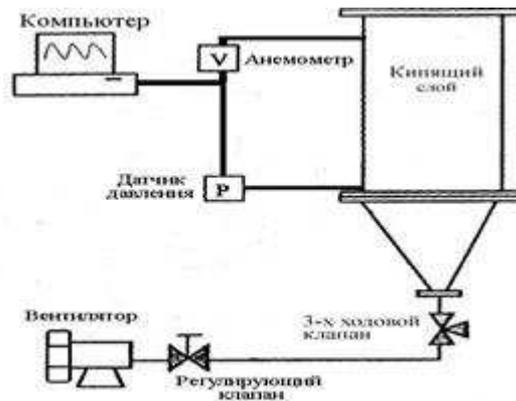


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Скорость воздуха измерялась на выходе из аппарата термоанемометром типа «Testo 405-V1». В каждом опыте проводилось не менее 50 измерений скорости воздуха. Измерение перепада давления в слое производилось с помощью дифференциального микроманометра «Testo – 525». Первичный датчик, выполненный в виде иглы от шприца с внутренним диаметром 0,5 мм и длиной 60 мм, размещался в непосредственной близости от воздухораспределительной решетки. Микроманометр был соединен с первичным датчиком пластмассовой трубкой внутренним диаметром 4 мм и длиной 200 мм. Цифровой сигнал от микроманометра «Testo – 525» подавался на персональный компьютер. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

Обычно в слое располагается несколько датчиков давления на разной высоте, но в работах [8; 9] показано, что для слоев крупных частиц величина среднеквадратичного отклонения пульсации перепада давления не зависит от высоты расположения датчика над решеткой.

В ходе предварительных опытов было установлено, что без уменьшения точности измерения более, чем на 10 %, измерения пульсации перепада давления надо производить через каждые 0,05 с. в течение 60 секунд. Таким образом, измерения перепада давления производились с частотой 20 Гц, тогда, как, согласно [9], доминантная частота пульсаций в слое крупных частиц не превышает 3 Гц.

Полученное множество случайных значений перепада давления в слое подвергалось статистической обработке. При этом определялись:

1) Математическое ожидание случайного процесса (среднее значение перепада давления в слое за время наблюдения)

$$P_m = \sum P_i / N,$$

2) Среднеквадратичное отклонение пульсации перепада давления

$$\sigma = [\sum (P_i - P_m)^2 / (N-1)]^{1/2}$$

3) Безразмерная амплитуда пульсации перепада давления

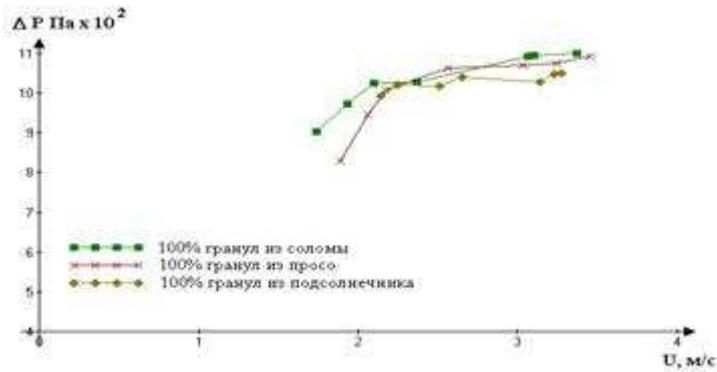
$$\delta = \sigma / P_m$$

Также определялась абсолютная величина изменения безразмерной амплитуды перепада давления при уменьшении скорости воздуха, продуваемого через слой:

$$\Delta\delta = \delta_i - \delta_{i-1}.$$

Кроме того, изменение состояния слоя фиксировалось видеокамерой типа Panasonic DVC 30. Затем каждая секунда видеосъемки разбивалась на 50 видеок кадров, что позволяло получить последовательные изображения состояния слоя через каждые 0,02 секунды.

На рис. 3 представлено изменение величины математического ожидания перепада давления в слое от скорости воздуха, продуваемого через слой.



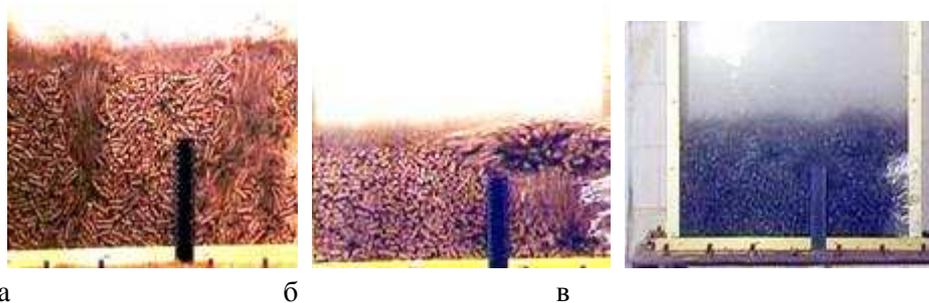
**Рис. 3. Зависимость перепада давления в слое от скорости продуваемого через слой воздуха**

Из рис. 3 следует, что для слоя гранул из соломы полное псевдооживление наступает при скорости воздуха, равной 2,4 м/с, для слоя гранул из лузги проса – при скорости воздуха 2,6 м/с, для слоя гранул из лузги подсолнечника – при скорости воздуха 2,3 м/с.

Однако, визуальные наблюдения показывают, что при скорости воздуха, равной 2,4 м/с, в слое соломенных гранул наблюдаются две гетерогенные струи, которые выходят на поверхность слоя, при этом весь остальной слой остается неподвижным (рис. 4 а). Т.е. при этой скорости воздуха процесс псевдооживления слоя гранул из соломы только начинается.

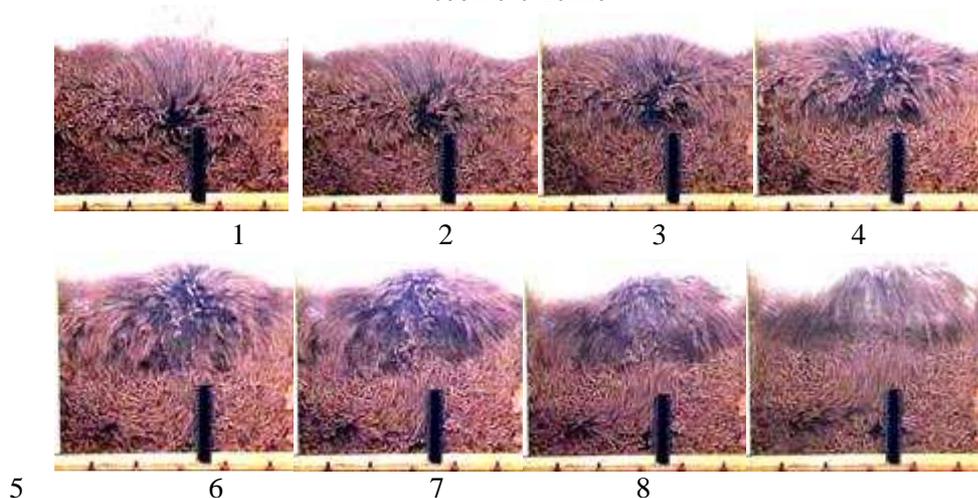
Это относится и к слою гранул из лузги проса: при скорости воздуха 2,6 м/с две вертикальные струи вблизи стенок пробивают слой на всю высоту, но остальной слой неподвижен (рис. 4 б). Слой гранул из лузги подсолнечника при скорости воздуха 2,3 м/с также только начинает переходить в псевдооживленное состояние: его пробивают три струи – две по краям и одна в центре, остальная же масса частиц слоя неподвижна (рис. 4 в).

Полное псевдооживление слоя соломенных гранул происходит при скорости воздуха 3,09 м/с (рис. 5), слоя гранул из лузги проса – при скорости воздуха равной 3,24 м/с (рис. 6), гранул из лузги подсолнечника – 3,14 м/с (рис. 7). Однако, это не находит отражение на кривой изменения  $\sigma = f(U)$  (рис. 8).



**Рис. 4. Вид слоя гранул:**

из соломы (а), из лузги проса (б) и лузги подсолнечника (в) при скорости воздуха 2,4 м/с, 2,6 м/с и 2,4 м/с соответственно



**Рис. 5. Вид слоя гранул из соломы при полном псевдооживлении (U = 3,09 м/с)**

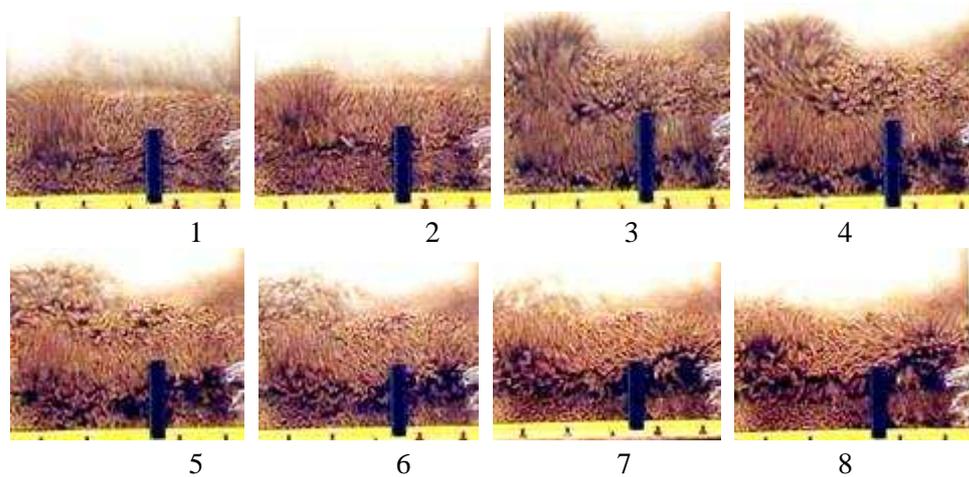


Рис. 6. Вид слоя гранул из лузги проса при полном псевдоожигении ( $U = 3,24$  м/с)

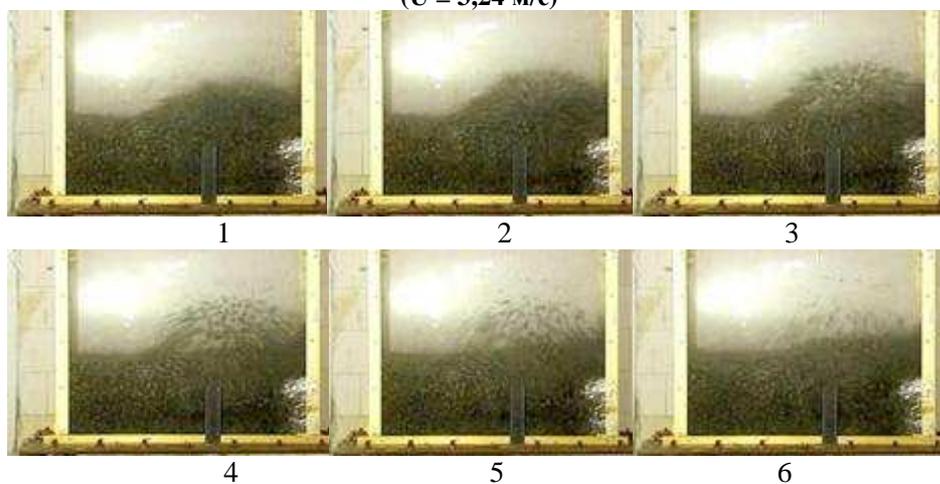


Рис. 7. Вид слоя гранул из лузги подсолнечника при полном псевдоожигении ( $U = 3,14$  м/с)

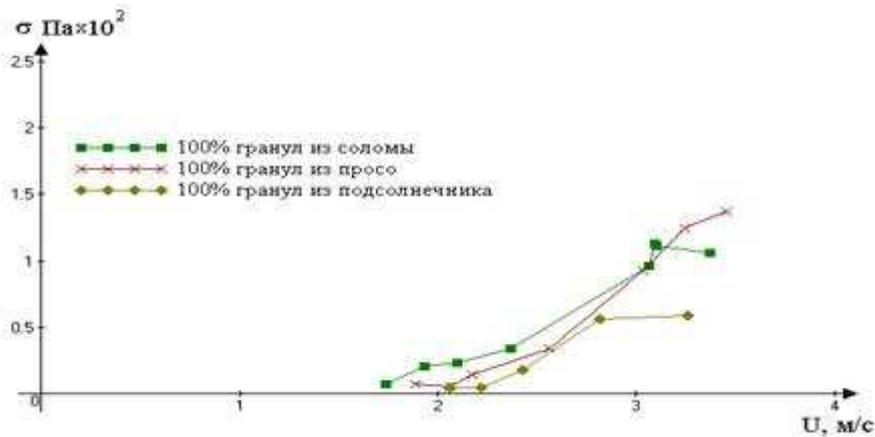
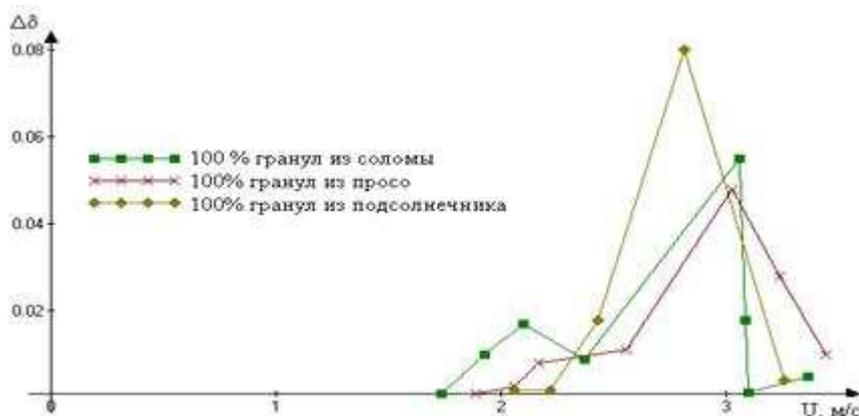


Рис. 8. Кривые изменения среднеквадратичного отклонения пульсации перепада давления от скорости воздуха

Следовательно, для слоев частиц такой формы и размера, как примененные в настоящей работе, нельзя использовать изменение функции  $\sigma = f(U)$  для оценки минимальной скорости псевдоожигения.

Для оценки значений скорости минимального псевдоожигения слоя гранул можно использовать графики изменения абсолютной величины  $\Delta\delta$  от скорости воздуха (рис. 9): для слоя гранул наблюдается монотонный рост  $\Delta\delta$  до тех пор, пока слой не станет полностью псевдоожигенным. При полном псевдоожигении слоя абсолютная величина  $\Delta\delta$  резко падает. Такое падение для слоя гранул из лузги проса наблюдается при скорости воздуха 3,2 м/с, для

соломенных гранул – при скорости воздуха 3,0 м/с, для гранул из лузги подсолнечника – 3,1 м/с. Необходимо отметить, что характер изменения  $\Delta\delta = f(U)$  одинаков для гранул с различным отношением диаметра к средней длине. Следовательно, графики этой зависимости могут быть использованы для оценки минимальной скорости псевдоожижения крупных цилиндрических частиц.



**Рис. 9. Графики зависимости приращения (по модулю) безразмерной амплитуды пульсации перепада давления от скорости воздуха**

Настоящая статья является частью научно-исследовательской работы, выполняемой при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках государственного контракта № 02.516.11.6199.

#### *Список литературы*

1. Barišić, V. Prediction of Agglomeration, Fouling and Corrosion Tendency of Fuels in CFB Co-combustion / V. Barišić, E.C. Zabetta, J. Sarkki // Proceeding of 20<sup>th</sup> International Conference on Fluidized Bed Combustion. Edited by G. Yue, H. Zhang, Z. Luo. Tsinghua University Press-Springer, Beijing, 2009. – pp. 416–421.
2. Isemin, R.L. Investigation of Agropellet Combustion in the Fluidized Bed / R.L. Isemin, V.V. Konayahin, S.N. Kuzmin, A.T. Zorin, A.V. Mikhalev / Proceeding of 20<sup>th</sup> International Conference on Fluidized Bed Combustion. Edited by G. Yue, H. Zhang, Z. Luo. Tsinghua University Press-Springer, Beijing, 2009. – pp. 110–1115.
3. Abdullah, M.Z. Analysis of cold fluidization test results for various biomass fuels / M.Z. Abdullah, Z. Husain, S.L. Yin Pong // Biomass and Bioenergy, 2003. – pp. 487–494.
4. Riena, J. Predicting the Minimum Fluidization Velocity of Polydisperse Mixtures of Scarp-wood Particles / J. Riena, E. Velo, L. Puigjanger // Powder technology. – 2000. – v. 111. – pp. 245–251.
5. Zhang, Y. Fluidization Characteristics of Stalk-shaped Biomass in Binary Particle System / Y. Zhang, B.S. Jin, W.Q. Zhong // Proceeding of 20<sup>th</sup> International Conference on Fluidized Bed Combustion. Edited by G. Yue, H. Zhang, Z. Luo. Tsinghua University Press-Springer, Beijing, 2009. – pp. 311–316.
6. Punóchář, M. Evaluation of Minimum Fluidization Velocity in Gas Fluidized Bed from Pressure Fluctuations / M. Punóchář, J. Drahoš, J. Čermák, K. Selucký // Chemical Engineering Communication, 1985. – v. 35. – pp. 81–87.
7. Leu, L.-P. Measurement of Pressure Fluctuation in Two-Dimensional Gas-Solid Fluidized Beds at Elevated Temperatures / L.-P. Leu, C.-W. Lan // Journal of Chemical Engineering of Japan. – 1990. – v. 23. – № 5. – pp. 555–562.
8. Li, Z. Sorption drying of soybean seeds with silica gel. 1. Hydrodynamics of fluidized bed dryer / Z. Li, N. Kobayashi, A. Nishimura, M. Hasatani // Drying technology. – 2002. – № 20(6). – pp. 1193–1213.
9. Li, Z. Characteristics of pressure fluctuations in a fluidized bed of binary mixture / Z. Li, N. Kobayashi, M. Hasatani // Journal of Chemical Engineering of Japan. – 2005. – v. 38. – № 12. – pp. 960–968.