

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 677.074

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-5-13-19

ПСЕВДООЖИЖЕНИЕ СЕМЯН ПРОСА И ГОРОХА

БАБИЧЕВА ЕЛЕНА ЛЕОНИДОВНА , *ст. преподаватель*¹
ebabicheva@rgau-msha.ru **РУДОБАШТА СТАНИСЛАВ ПАВЛОВИЧ**, *д-р техн. наук, профессор*¹
rudobashta@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3129-8562>**СИДЕЛЬНИКОВ ИВАН ИВАНОВИЧ**, *канд. техн. наук, доцент*²
paht@land.ru¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49² Московский политехнический университет; 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38

Аннотация. Одним из способов конвективной сушки зернистых материалов, позволяющим интенсифицировать процесс, является их сушка в аппарате с псевдоожженным слоем. Важными преимуществами сушилок с псевдоожженным слоем являются равномерность сушки всех частиц, находящихся в слое, и легкость загрузки и выгрузки материала. Целью работы являлось экспериментальное исследование гидродинамики псевдоожженного слоя семян проса и гороха и определение на основе этих данных первой критической скорости (скорости начала псевдоожжения). В эксперименте исследованы семена малого и большого размера (просо и горох). По полученным экспериментальным данным построены кривые псевдоожжения $\Delta P = f(v)$ для проса и гороха, по которым определены первые критические скорости псевдоожжения (0,73 м/с для проса и 1,68 м/с для гороха). Найденные экспериментально значения первой критической скорости псевдоожжения сопоставлены со значениями, рассчитанными по уравнениям О.М. Тодеса, Вэнь и Ю. Грейс. Показано, что все указанные уравнения обеспечивают приемлемую точность вычислений, но точность расчетов по уравнению О.М. Тодеса несколько выше, поэтому она рекомендована авторами для инженерных расчетов. Значение первой критической скорости псевдоожжения, рассчитанное по формуле О.М. Тодеса, для проса составило 0,69 м/с, для гороха – 1,60 м/с. Исследования показали хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных по первым критическим скоростям псевдоожжения (относительная погрешность для проса составила 5,5%, для гороха – 4,8%), что обусловлено правильной геометрической формой исследованных семян, близкой к сферической. Доказана применимость формулы О.М. Тодеса для расчета первой критической скорости псевдоожжения исследуемых семян в процессе сушки.

Ключевые слова: псевдоожжение, скорость, семена проса, семена гороха, сушка.

Формат цитирования: Бабичева Е.Л., Рудобашта С.П., Сидельников И.И. Псевдоожжение семян проса и гороха // Агринженерия. 2021. № 5(105). С. 13-19. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-5-13-19>.

© Бабичева Е.Л., Рудобашта С.П., Сидельников И.И., 2021



ORIGINAL PAPER

FLUIDIZATION OF MILLET AND PEA SEEDS

ELENA L. BABICHEVA, *Senior Lecturer*¹
ebabicheva@rgau-msha.ru**STANISLAV P. RUDOBASHTA** , *DSc (Eng), Professor*¹
rudobashta@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-3129-8562>**IVAN I. SIDELNIKOV**, *PhD (Eng), Associate Professor*²
paht@land.ru¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation² Moscow Polytechnic University; 38 Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow, 107023, Russian Federation

Abstract. One of the convective drying methods used to intensify the process of drying granular materials is the use of a device with a fluidized bed. The essential advantages of fluidized bed dryers are the uniform drying of all the particles in the bed and the ease of loading and unloading the material. The study goal was to conduct an experimental study of the hydrodynamics of the fluidized bed of millet and pea seeds and the determination of the first critical velocity (the rate of the beginning of fluidization) based

on these data. The authors took small (millet) and large (pea) seeds for the experiment. Based on the experimental data obtained, they constructed pseudo-liquefaction curves – $\Delta P = f(v)$ for millet and peas to determine the first critical fluidization rates (0.73 m/s for millet and 1.68 m/s for peas). The experimentally found values of the first critical fluidization rate were compared with the values calculated by the equations of O.M. Todes, Wen and Yu, and Grace. The study showed that all the equations provide an acceptable accuracy of calculations, but the accuracy of using the equation of O.M. Todes is somewhat higher. Therefore it can be primarily recommended for engineering analysis. The first critical fluidization rates, calculated according to the formula of O.M. Todes, were, accordingly: 0.69 m/s for millet and 1.60 m/s for pea. The calculation and experimental data on the first critical fluidization rates for millet and peas agree satisfactorily (the relative error for millet is 5.5%, for peas – 4.8%). The sufficiently high accuracy of the first critical fluidization rates is explained by the correct geometric shape of the studied seeds, which is close to spherical. Therefore, the first critical fluidization speed of the studied seed material can be determined using the formula of O.M. Todes.

Key words: fluidization, speed, millet seeds, pea seeds, drying.

For citation: Babicheva E.L., Rudobashta S.P., Sidelnikov I.I. Fluidization of millet and pea seeds. *Agricultural Engineering*, 2021; 5 (105): 13-19. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-5-13-19>.

Введение. Семена – основа производства продукции растениеводства. Снижение энергоёмкости и повышение конкурентной способности продукции растениеводства требуют производства высококачественных семян. При их сушке в результате тепломассообменного процесса важно не только снизить влажность семян до требуемого значения, но и сохранить их посевные свойства. При уменьшении влажности семян понижается интенсивность их дыхания, подавляется жизнедеятельность микроорганизмов и вредителей в семенах¹, что приводит к повышению стойкости семян при хранении. В настоящее время для сушки семян, в частности, семян проса и гороха, используются различные типы конвективных сушилок². Признаком современных способов сушки является интенсивное протекание процессов тепло- и массообмена, которое можно достичь различными путями: повышением скорости перемещения высушиваемого материала и сушильного агента относительно друг друга [1, 2], увеличением поверхности контакта между высушиваемым материалом и сушильным агентом [3], созданием вакуума в рабочей камере сушилки [4], снижением относительной влажности сушильного агента, применением комбинированного подвода тепла или комбинированных, или совмещенных процессов [5, 6]. Одним из способов конвективной сушки зернистых материалов, позволяющим интенсифицировать процесс, является их сушка в аппарате с псевдооживленным слоем [7-9]. Сушилки с псевдооживленным слоем отличаются непрерывным и беспорядочным движением и перемешиванием частиц в определенном объеме по высоте аппарата, большей поверхностью соприкосновения материала с нагретым воздухом по сравнению с другими зерносушилками. Поскольку каждая частица равномерно омывается со всех сторон потоком нагретого воздуха, то к материалу более равномерно подводится тепло, а испаряющаяся влага быстро удаляется, что значительно сокращает процесс сушки. При этом уменьшается тепловое воздействие на продукт, лучше сохраняются свойства продукта². Важными преимуществами сушилок с псевдооживленным слоем являются равномерность сушки всех частиц, нахо-

дящихся в слое, и легкость загрузки и выгрузки материала. Применение сушилок с псевдооживленным слоем для семян возможно в фермерских хозяйствах при небольших объемах высушиваемого материала. При этом важно сохранить посевные качества материала [9]. Такого рода семенами, производимыми в хозяйствах небольшими партиями, являются семена проса и гороха, с которыми и проводились исследования в данной работе. Необходимый технологический режим можно подобрать, применяя математическое моделирование [10].

Применение аппаратов с псевдооживленным слоем особенно эффективно в случае сушки дисперсных материалов, протекающей в первом периоде (периоде постоянной скорости сушки), потому что в этом случае скорость сушки полностью контролируется внешним тепло- и массообменом^{3,4,5} [11-14].

Кинетика сушки в первом периоде описывается уравнениями тепло- и массоотдачи, имеющими вид:

$$q = \alpha(t_{c,n} - t_c); \quad (1)$$

$$i = \beta_c(C_{c,n} - C_c), \quad (2)$$

где q – плотность теплового потока, подводимого конвективно к высушиваемому материалу, Вт/м²; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²с); $t_{c,n}$, t_c – температура сушильного агента у поверхности испарения и в ядре потока, °С; i – плотность потока испаряемой влаги, кг/(м²с); β_c – коэффициент массоотдачи, м/с; $C_{c,n}$, C_c – концентрация пара у поверхности испарения влаги и в ядре потока сушильного агента, кг/м³.

Для коэффициентов теплоотдачи α и массоотдачи β , входящих в уравнения (1) и (2), многими авторами получены критериальные уравнения^{3,4,5} [11-14], чтобы выполнить кинетический расчет сушилки с псевдооживленным слоем. Важным фактором в этом расчете является определение первой критической скорости псевдооживления, которую называют также скоростью начала

³ Гельперин Н.И., Айенштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления / Под ред. Н.И. Гельперина. М.: Химия. 1967. 664 с.

⁴ Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. Изд. 3-е, перераб. и доп. Л.: Химия, 1979. 272 с.

⁵ Плановский А.Н., Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. М.: Химия, 1979. 288 с.

¹ Малин Н.И. Технология хранения зерна. М.: КолосС, 2005. 280 с.

² Атаназевич В.И. Сушка пищевых продуктов. М.: ДеЛи, 2000. 295 с.

псевдооживления [15], что соответствует ее физическому смыслу. По величине первой критической скорости выбирают рабочую скорость сушильного агента, задавая число псевдооживления. Отметим, что от рабочей скорости сушильного агента при сушке дисперсного материала в псевдооживленном слое зависят значения коэффициентов тепло- и массоотдачи, входящие в уравнения (1) и (2). От рабочей скорости газа зависят также высота и порозность слоя^{6,7}.

В литературе приводится ряд зависимостей для расчета первой критической скорости^{8,9} [16], основными из которых являются уравнение О.М. Тодеса⁸

$$Re_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (5)$$

и уравнение Вэнь и Ю [16]

$$Re_{кр} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408Ar} - 33,7, \quad (6)$$

где $Ar = \frac{g(d_3)^3 \rho_r - \rho_g}{\nu_r^2 \rho_r}$ – число Архимеда; $Re_{кр} = \frac{v_{кр} \cdot d_3}{\nu_r}$ – число Рейнольдса для первой критической скорости; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; d_3 – эквивалентный диаметр псевдооживляемых частиц, м; ν_r – кинематическая вязкость газа, м²/с; ρ_r , ρ_g – плотность твердой и газовой фазы соответственно, кг/м³.

Грейс утверждает, что замена числа 33,7 на 27,2 в уравнении (6) больше подходит для системы «газ-твердое тело»⁹, тогда

$$Re_{кр} = \sqrt{27^2 + 0,0408Ar} - 27,2. \quad (7)$$

Вывод формул (5) и (6) основывается на уравнении Эргуна для расчета перепада давления в слое, когда газ проходит через уплотненный материал [17].

В литературе также приводятся зависимости для расчета первой критической скорости псевдооживления применительно к аппарату с конической камерой [19–25], поскольку эти камеры имеют ряд преимуществ перед камерами с вертикальными стенками при псевдооживлении дисперсных материалов фармацевтической промышленности [21].

В данной работе исследования проведены с сельскохозяйственными культурами (семена проса и гороха), для которых факторы, присущие материалам фармацевтической промышленности, не существенны, поэтому для исследования была выбрана камера цилиндрической формы.

Цель исследований: экспериментальное исследование гидродинамики псевдооживленного слоя семян проса и гороха и определение на основе этих данных первой критической скорости (скорости начала псевдооживления) с целью проверки применяемых для ее расчета формул.

⁶ Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Изд. 10-е, перераб. и доп. Л.: Химия, 1987. 567 с.

⁷ Thermal Processing of Bio-materials edited by T. Kudra and C. Strumillo; published by Gordon and Breach Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands, 1998. 669 p.

⁸ Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. 510 с.

⁹ Grace J.R. Handbook of Multiphase Systems. 1982. Chapter 8.

Материалы и методы. Для расширения диапазона эксперимента взяты семена малого и большого размера (просо и горох).

Исследование гидродинамики слоя семян проса и гороха проводилось на лабораторной установке, изображенной на рисунке 1.

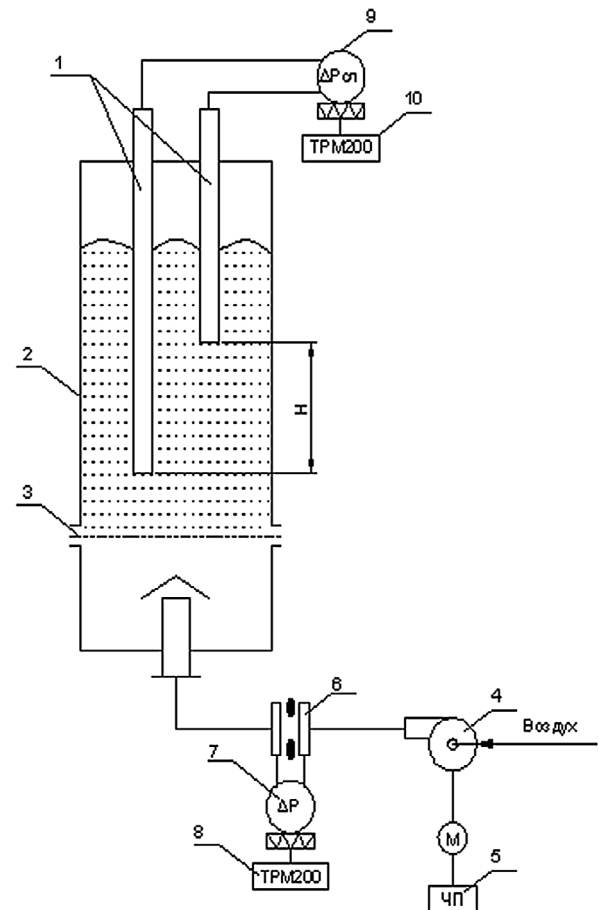


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – пьезометрические трубки; 2 – стеклянная царга;
- 3 – газораспределительная решетка; 4 – газодувка;
- 5 – частотный преобразователь; 6 – измерительная диафрагма;
- 7 – преобразователь давления для расхода воздуха;
- 8 – вторичный прибор; 9 – преобразователь давления ΔP ;
- 10 – вторичный прибор для ΔP

Fig. 1. Diagram of the experimental installation:

- 1 – piezometric tubes; 2 – glass tube; 3 – gas distribution grid;
- 4 – gas purge; 5 – frequency converter; 6 – measuring diaphragm;
- 7 – pressure converter for air flow; 8 – secondary device;
- 9 – pressure converter ΔP ; 10 – secondary device for ΔP

В установку, состоящую из стеклянной царги 2, имеющей внутренний диаметр $D_{ан} = 150$ мм, помещали семена проса или гороха с высотой неподвижного слоя 110 мм. Внизу аппарата находилась газораспределительная решетка 3, конструкция которой исключала провал семян. В качестве оживляющего агента использовали атмосферный воздух, который подавали под газораспределительную решетку с помощью газодувки 4. Температура воздуха в эксперименте составляла 20°C. Расход воздуха регулировали изменением числа оборотов двигателя газодувки с помощью частотного преобразователя 5. Объемный расход воздуха определяли

по перепаду давления ΔP_d на измерительной диафрагме 6. Перепад давления на диафрагме подавался на преобразователь 7, который трансформировал этот перепад в электрический сигнал 4...20 мА, замеряемый и масштабируемый вторичным прибором 8. В слой были опущены две пьезометрические трубки 1 отбора давления, расстояние между концами которых составляло $H = 60$ мм. Пьезометрические трубки были соединены с дифференциальным преобразователем давления 9, который превращал разность давлений в электрический сигнал 4...20 мА, замеряемый вторичным прибором 10. В ходе эксперимента устанавливали минимальный расход воздуха, измеряли перепад давления на диафрагме ΔP_d и перепад давления в слое ΔP , одновременно наблюдая состояние слоя. Затем увеличивали расход воздуха и повторяли измерения. Таким образом «прогоняли» весь диапазон расходов воздуха. Значения перепада

давлений на диафрагме пересчитывали в расход воздуха ($\text{м}^3/\text{ч}$) по уравнению⁶:

$$V = 2,8\sqrt{\Delta P_d}, \tag{8}$$

где 2,8 – калибровочный параметр.

По найденному таким образом расходу воздуха рассчитывали его фиктивную, (отнесенную к полному сечению аппарата) скорость воздуха в слое v (м/с):

$$v = \frac{4V}{\pi \cdot D_{\text{ан}}^2}. \tag{9}$$

Результаты и обсуждение. По полученным экспериментальным данным были построены кривые псевдооживления – графики зависимости $\Delta P = f(v)$ для проса и гороха (рис. 2, 3), на основе которых определена скорость начала псевдооживления для проса 0,73 м/с (рис. 2), для гороха – 1,68 м/с (рис. 3).

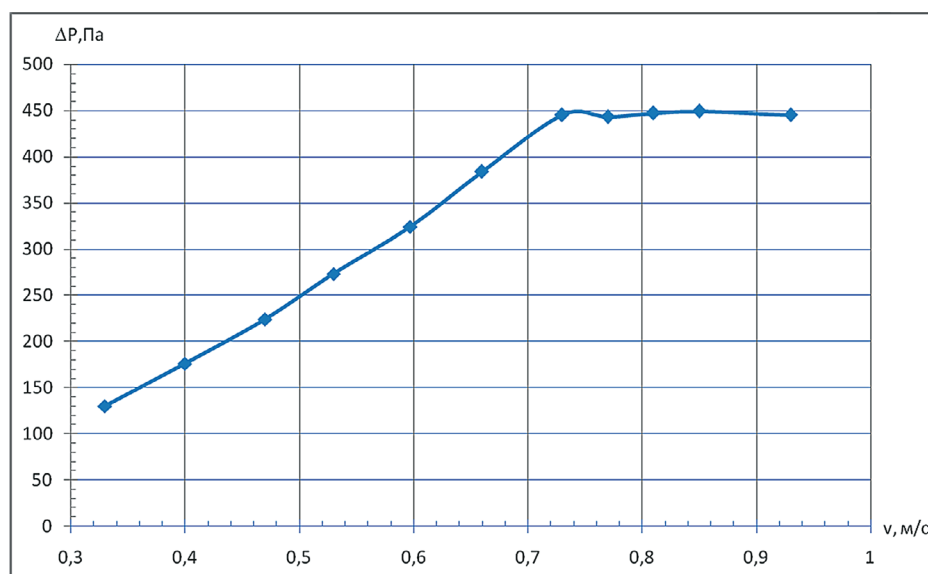


Рис. 2. График зависимости $\Delta P = f(v)$ для проса
 Fig. 2. Graph of the relationship $\Delta P = f(v)$ for millet

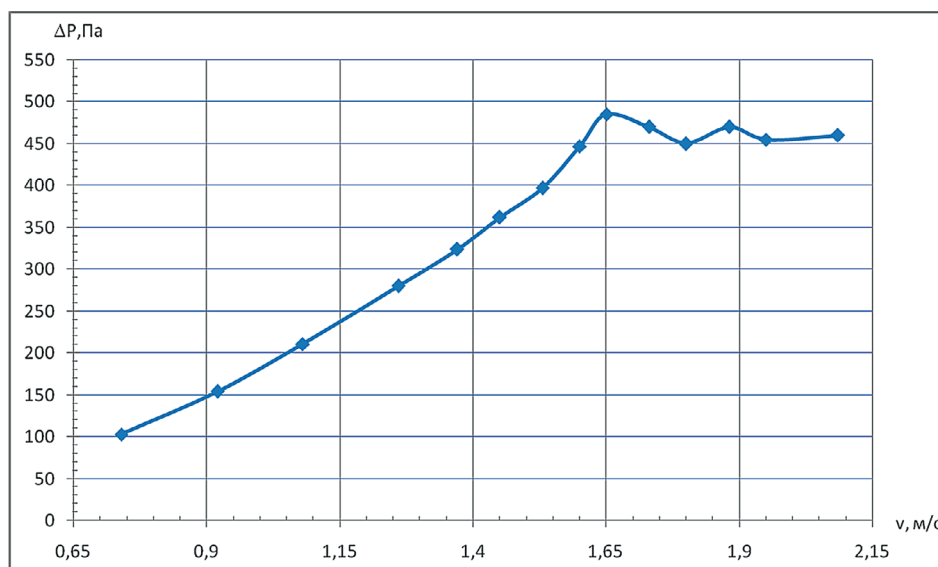


Рис. 3. График зависимости $\Delta P = f(v)$ для гороха
 Fig. 3. Graph of the relationship $\Delta P = f(v)$ for peas

Представляет практический интерес проверка точности расчетов $v_{кр}$ по уравнениям (5), (6) и (7) при псевдооживлении исследуемых семян. Поэтому полученные

опытные значения $v_{кр}$ были сопоставлены с результатами расчетов по этим уравнениям. Результаты сопоставления приведены в таблице.

Таблица

Сопоставление опытных и расчетных значений $v_{кр}$

Table

Comparison of experimental and analytical values of critical speed

Материал <i>Material</i>	Эквивалентный диаметр d_s , мм <i>Equivalent diameter, mm</i>	Плотность материала, кг/м ³ <i>Density material, kg/m³</i>	Значение первой критической скорости $v_{кр}$, м/с <i>Value of the first critical speed, m/s</i>			
			опытное <i>experimental</i>	расчетное <i>estimated</i>	по уравнению <i>by equation</i>	относительная погрешность $v_{кр}$, % <i>relative error, %</i>
Просо <i>Millet</i>	2,2	1360	0,73	0,69	(5)	-5,5
				0,80	(6)	9,6
				0,84	(7)	15,1
Горох <i>Peas</i>	7,5	1281	1,68	1,62	(5)	-3,6
				1,75	(6)	4,2
				1,76	(7)	4,8

Уравнение (5) выведено для сферических частиц при средней порозности неподвижного слоя $\varepsilon = 0,4$ и согласно источнику⁷ дает погрешность до $\pm 20\%$.

В расчетах эквивалентный диаметр частиц, согласно результатам собственных измерений, проведенных с помощью кронциркуля Крoерлин С220, приняли для проса $d_s = 2,2$ мм, для гороха $d_s = 7,5$ мм. Плотность семян проса и гороха зависит от их влажности, поэтому для обеспечения точности расчета экспериментально определяли их плотность пикнометрическим методом. Плотность проса составила $\rho_t = 1360$ кг/м³, гороха $\rho_t = 1281$ кг/м³. Результаты расчета первой критической скорости по уравнениям (5), (6) и (7) приведены в таблице. Все три формулы дают приемлемую точность расчетов $v_{кр}$, но уравнение О.М. Тодеса является все же несколько более точным. Поэтому именно оно может быть рекомендовано в первую очередь для инженерных расчетов. Достаточно высокая точность расчета $v_{кр}$ объясняется правильной геометрической формой исследованных семян, близкой к сферической. Задача расчета первой критической скорости семян на практике возникает в связи с тем, что оживаемые семена могут иметь иной размер (не такой, как в эксперименте) вследствие различий в сорте семян, а также иную плотность, вызванную разной влажностью семян.

По принятой в инженерном расчете сушилки с псевдооживленным слоем скорости начала псевдооживления

$v_{кр}$ далее принимают рабочую скорость воздуха $v = v_{кр}\psi$, где ψ – число псевдооживления. По расходу воздуха, требующемуся на сушку, находят поперечное сечение сушилки и осуществляют кинетический расчет сушилки (расчет периодически действующей сушилки с псевдооживленным слоем изложен С.П. Рудобаштой [26]).

Выводы

1. Экспериментально получены кривые псевдооживления семян проса и гороха для камеры с цилиндрическими стенками, из которых определены первые критические скорости: 0,73 м/с для проса, 1,68 м/с для гороха.

2. Расчеты первой критической скорости для проса и гороха по уравнениям, имеющимся в литературе, показали, что они обеспечивают приемлемую точность вычислений. Относительная погрешность вычисления $v_{кр}$ для проса по формуле О.М. Тодеса составляет 5,5%, по формуле Вэнь и Ю – 9,6%, по формуле Грейс – 15,1%; для гороха соответствующие значения составляют: по формуле О.М. Тодеса – 3,6%; по формуле Вэнь и Ю – 4,2%; по формуле Грейс – 4,8%.

3. Формула О.М. Тодеса дает для $v_{кр}$ несколько более высокую точность, поэтому именно она может быть рекомендована в первую очередь для инженерных расчетов первой критической скорости при псевдооживлении проса и гороха.

Библиографический список

1. Svinarev V.A., Planovskii A.N., Rudobashta S.P. et al. Study of mass transfer between a spherical body and a turbulent gas stream. *Journal of Engineering Physics*, 1970; 12 (1): 5-7. <https://doi.org/10.1007/BF00829406>
2. Rudobashta S.P., Planovskii A.N., Svinarev V.A. An investigation of mass transfer in a spherical capillary-porous body under drying conditions. *Journal of Engineering Physics*, 1971; 13 (3): 160-164. <https://doi.org/10.1007/BF00831464>

References

1. Svinarev V.A., Planovskii A.N., Rudobashta S.P. et al. Study of mass transfer between a spherical body and a turbulent gas stream. *Journal of Engineering Physics*, 1970; 12 (1): 5-7. <https://doi.org/10.1007/BF00829406>
2. Rudobashta S.P., Planovskii A.N., Svinarev V.A. An investigation of mass transfer in a spherical capillary-porous body under drying conditions. *Journal of Engineering Physics*, 1971; 13 (3): 160-164. <https://doi.org/10.1007/BF00831464>

3. Рудобашта С.П., Климов А.М., Паничкин В.И. Вакуумная сушилка для листового материала // Авт. свид. SU600361 А1, 30.03.1978. Заявка № 2127676 от 24.04.1975. БИ № 12 от 06.04.1978.
4. Рудобашта С.П., Климов А.М., Паничкин В.И. Способ сушки листовых материалов // Авт. свид. SU601540 А1 от 05.04.1978. Заявка № 2400544 от 24.08.1976. БИ № 13 от 14.03.1978.
5. Rudobashta S.P., Tsetovich A.N., Kartashov E.M. Theory of combined granulation/drying process. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1991; 24 (5): 419-425.
6. Зуев Н.А., Рудобашта С.П., Зуева Г.А. и др. Совмещенный процесс сушки и стимуляции семян с помощью импульсного инфракрасного излучения // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2013. № 3 (59). С. 7-9.
7. Рудобашта С.П., Зуева Г.А. Математическое моделирование процесса сушки материала в аппарате с псевдооживленным слоем // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2019. Т. 8. С. 77-80.
8. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Муравлева Е.А. Фермерская зерносушильная установка с тепловым насосом и ее расчет // Российский химический журнал. 2018. Т. 62. № 4. С. 22-27.
9. Кашменский Д.С., Рудобашта С.П. Влияние технологических параметров осциллирующей инфракрасной сушки семян на эффект стимуляции // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: Сб. научных трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского. 2016. С. 48-52.
10. Рудобашта С.П., Зуева Г.А. Моделирование динамики нагрева частиц в псевдооживленном слое при осциллирующем инфракрасном энергоподводе // Современные задачи инженерных наук: Сб. научных трудов Международного научно-технического симпозиума. 2017. С. 75-76.
11. Ciesielczyk W., Stojiljkovic M., Ilic G. et al. Experimental study on drying kinetics of solid particles in fluidized bed. *University of NIS, Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 1997; 1 (4): 469-478.
12. Alvarez P.I., Shene C. Experimental study of the heat and mass transfer during drying in a fluidized bed dryer. *Drying Technology*, 1996; 14 (3-4): 701-718. <https://doi.org/10.1080/07373939608917121>
13. Kumaresan R., Viruthagiri T. Simultaneous heat and mass transfer studies in drying ammonium chloride in a batch-fluidized bed dryer. *Indian Journal of Chemical Technology*, 2006; 13 (5): 440-447.
14. Roy P., Vashishtha M., Khanna R. et al. Heat and mass transfer study in fluidized bed granulation – Prediction of entry length. *Particuology*, 2009; 7 (3): 215-219.
15. Biswal K.C., Bhowmik T., Roy G.K. Prediction of minimum fluidization velocity for gas-solid fluidization of regular particles in conical vessels. *Chemical Engineering Journal*, 1985; 30 (1): 57-62.
16. Wen C.Y., Yu Y.H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. *Aiche Journal*. 1966; 12: 610-612. <https://doi.org/10.1002/aic.690120343>
17. Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 1952; 48 (2): 89-94.
3. Rudobashta S.P., Klimov A.M., Panichkin V.I. Vakuumnaya sushilka dlya listovogo materiala [Vacuum dryer for sheet material]. Authorship certificate SU600361 A1, 30.03.1978, 1978. (In Rus.)
4. Rudobashta S.P., Klimov A.M., Panichkin V.I. Sposob sushki listovykh materialov [Method of drying sheet materials]. Authorship certificate SU601540 A1 dated 24.08.1976, 1978. (In Rus.)
5. Rudobashta S.P., Tsetovich A.N., Kartashov E.M. Theory of combined granulation/drying process. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1991; 24 (5): 419-425.
6. Zuev N.A., Rudobashta S.P., Zueva G.A. et al. Sovmestshchenniy protsess sushki i stimulyatsii semyan s pomoshch'yu impul'snogo infrakrasnogo izlucheniya [Combined process of seed drying and stimulation using pulsed infrared radiation]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2013; 3 (59): 7-9. (In Rus.)
7. Rudobashta S.P., Zueva G.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa sushki materiala v apparate s psevdoozhivlennym sloyem [Mathematical modeling of the material drying process in a fluidized bed unit]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT*, 2019; 8: 77-80. (In Rus.)
8. Rudobashta S.P., Zueva G.A., Muravleva E.A. Fermer-skaya zernosushil'naya ustanovka s teplovym nasosom i ee rashchet [Farm grain dryer with a heat pump and its design analysis]. *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal*, 2018; 62(4): 22-27. (In Rus.)
9. Kashmenskiy D.S., Rudobashta S.P. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov ostsiliruyushchey infrakrasnoy sushki semyan na effekt stimulyatsii [Influence of the technological parameters of oscillating infrared seed drying on the stimulation effect]. In: *Povysheniye effektivnosti protsessov i apparatov v khimicheskoy i smezhnykh otraslyakh promyshlennosti: Sb. nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchonnoy 105-letiyu so dnya rozhdeniya A.N. Planovskogo*, 2016: 48-52. (In Rus.)
10. Rudobashta S.P., Zueva G.A. Modelirovanie dinamiki nagreva chastits v psevdoozhivlennom sloye pri ostsiliruyushchem infrakrasnom energopodvode [Modeling the dynamics of particle heating in a fluidized bed with an oscillating infrared power supply]. In: *Sovremennye zadachi inzhenernykh nauk: Sb. nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo simpoziuma*, 2017: 75-76. (In Rus.)
11. Ciesielczyk W., Stojiljkovic M., Ilic G. et al. Experimental study on drying kinetics of solid particles in fluidized bed. *University of NIS, Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 1997; 1 (4): 469-478.
12. Alvarez P.I., Shene C. Experimental study of the heat and mass transfer during drying in a fluidized bed dryer. *Drying Technology*, 1996; 14 (3-4): 701-718. <https://doi.org/10.1080/07373939608917121>
13. Kumaresan R., Viruthagiri T. Simultaneous heat and mass transfer studies in drying ammonium chloride in a batch-fluidized bed dryer. *Indian Journal of Chemical Technology*, 2006; 13 (5): 440-447.
14. Roy P., Vashishtha M., Khanna R. et al. Heat and mass transfer study in fluidized bed granulation – Prediction of entry length. *Particuology*, 2009; 7 (3): 215-219.
15. Biswal K.C., Bhowmik T., Roy G.K. Prediction of minimum fluidization velocity for gas-solid fluidization

18. Peng Y., Fan L.T. Hydrodynamic characteristics of fluidization in liquid-solid tapered beds. *Chemical Engineering Science*, 1997; 52 (14): 2277-2290. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00061-4)
19. Jing S., Hu Q.Y., Wang J.F. et al. Fluidization of coarse particles in gas-solid conical beds. *Chemical Engineering Progress*, 2000; 39(4): 379-387. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(99\)00103-8](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(99)00103-8)
20. Jing S., Cai G.B., Mei F. et al. Fluidization of fine particles in conical beds. *Powder Technology*, 2001; 118 (3): 271-274. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00385-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00385-5)
21. Sheng Fang, Yanding Wei, Lei Fu et al. Modeling of the minimum fluidization velocity and the incipient fluidization pressure drop in a conical fluidized bed with negative pressure. *Applied Sciences*. 2020; 10 (24): 8764-8783. <https://doi.org/10.3390/app10248764>
22. Kaewklum R., Kuprianov V.I. Theoretical and experimental study on hydrodynamic characteristics of fluidization in air-sand conical beds. *Chemical Engineering Science*, 2008; 63(6): 1471-1479. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.11.033>
23. Sau D.C., Mohanty S., Biswal K.C. Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas-solid tapered fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, 2007; 132 (1-3): 151-157. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2007.01.036>
24. Khani M.H. Models for prediction of hydrodynamic characteristics of gas-solid tapered and mini-tapered fluidized beds. *Powder Technology*, 2011; 205 (1): 224-230. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.018>
25. Rasteh M., Farhadi F., Ahmadi G. Empirical models for minimum fluidization velocity of particles with different size distribution in tapered fluidized beds. *Powder Technology*, 2018; 338 (6): 563-575.
26. Rudobashta S.P., Zueva G.A. On-farm heat pump – assisted fluidized bed dryer and its kinetics calculation. *Drying technology*, 2020; 38 (1-2): 6-18. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1591436>

Критерии авторства

Бабичева Е.Л., Рудобашта С.П., Сидельников И.И. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Бабичева Е.Л., Рудобашта С.П., Сидельников И.И. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.04.2021

Одобрена после рецензирования 15.07.2021

Принята к публикации 15.07.2021

of regular particles in conical vessels. *Chemical Engineering Journal*, 1985; 30 (1): 57-62.

16. Wen C.Y., Yu Y.H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. *Aiche Journal*, 1966; 12: 610-612. <https://doi.org/10.1002/aic.690120343>

17. Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 1952; 48 (2): 89-94.

18. Peng Y., Fan L.T. Hydrodynamic characteristics of fluidization in liquid-solid tapered beds. *Chemical Engineering Science*, 1997; 52 (14): 2277-2290. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00061-4)

19. Jing S., Hu Q.Y., Wang J.F. et al. Fluidization of coarse particles in gas-solid conical beds. *Chemical Engineering Progress*, 2000; 39(4): 379-387. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(99\)00103-8](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(99)00103-8)

20. Jing S., Cai G.B., Mei F. et al. Fluidization of fine particles in conical beds. *Powder Technology*, 2001; 118 (3): 271-274. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00385-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00385-5)

21. Sheng Fang, Yanding Wei, Lei Fu et al. Modeling of the minimum fluidization velocity and the incipient fluidization pressure drop in a conical fluidized bed with negative pressure. *Applied Sciences*, 2020; 10 (24): 8764-8783. <https://doi.org/10.3390/app10248764>

22. Kaewklum R., Kuprianov V.I. Theoretical and experimental study on hydrodynamic characteristics of fluidization in air-sand conical beds. *Chemical Engineering Science*, 2008; 63(6): 1471-1479. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.11.033>

23. Sau D.C., Mohanty S., Biswal K.C. Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas-solid tapered fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, 2007; 132 (1-3): 151-157. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2007.01.036>

24. Khani M.H. Models for prediction of hydrodynamic characteristics of gas-solid tapered and mini-tapered fluidized beds. *Powder Technology*, 2011; 205 (1): 224-230. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.018>

25. Rasteh M., Farhadi F., Ahmadi G. Empirical models for minimum fluidization velocity of particles with different size distribution in tapered fluidized beds. *Powder Technology*, 2018; 338 (6): 563-575.

26. Rudobashta S.P., Zueva G.A. On-farm heat pump – assisted fluidized bed dryer and its kinetics calculation. *Drying technology*, 2020; 38 (1-2): 6-18. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1591436>

Contribution

E.L. Babicheva, S.P. Rudobashta, I.I. Sidelnikov carried out theoretical studies and conducted the experiment based on the obtained theoretical results. E.L. Babicheva, S.P. Rudobashta, I.I. Sidelnikov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 21.04.2021

Approved after reviewing 15.07.2021

Accepted for publication 15.07.2021