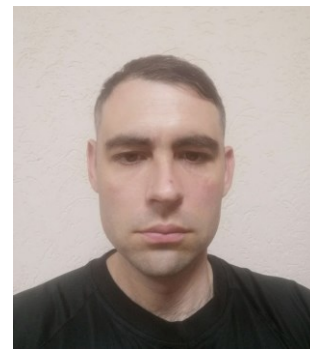


8. Belyaev, V. I. Teoreticheskoe obosnovanie ekspluatatsionnykh parametrov i rezhimov raboty pochvoobrabatyvayushchikh posevnykh agregatov / V. I. Belyaev, D. V. Belyaev // Vestnik Altayskogo

gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2007. – No. 9 (35). – S. 49-51.

9. Instruksiya po ekspluatatsii. Pritsepnaya seyalka Amazone Primera DMC 12000-2C. Amazonen-Werke, BAG0086.13 06.22.



УДК 631.362.33

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-253-11-90-95

В.Е. Зубков, Н.П. Семилетова, Л.С. Кравцов

V.E. Zubkov, N.P. Semiletova, L.S. Kravtsov

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ЗЕРНИСТЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В БЛОКИРОВАННОМ ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

### INTENSIFICATION OF GRANULAR BULK MATERIAL SEPARATION IN A BLOCKED FLUIDIZED BED

**Ключевые слова:** интенсификация, сепарация, рабочий орган, ворох, зернистые сыпучие материалы, псевдооживленный слой, технологический коридор.

Рассматриваются вопросы интенсификации процесса сепарации сыпучих зернистых материалов, которая может достигаться путем создания сепарирующих систем на новых технологических принципах. Такой системой, на наш взгляд, является блокированный псевдооживленный слой (БПС), который представляет собой двухфазную аэромеханическую систему, которую можно настраивать на разделяющую способность – эффективную плотность, промежуточную между плотностями разделяемых компонентов. Проведены исследования процесса сепарации зернистых сыпучих материалов в БПС на экспериментальной установке. Интенсификация процесса сепарации достигается в данном устройстве путем повышения частоты вращения рабочего органа, в связи с чем необходимо было выяснить, как это влияет на величину технологического коридора – разрыва между траекториями движения компонентов смеси в процессе сепарации. Для тестирования ис-

пользовалась смесь зерна пшеницы и равновесных по размерам почвенных комков и камней. Результаты исследований показали, что такая смесь разделяется полностью. Установлено, что величина технологического коридора незначительно, но повышается с увеличением числа оборотов рабочего органа. При применении числа оборотов рабочего органа с БПС от 100 до 400 об/мин. величина технологического коридора изменяется от 4,5 до 10 мм. Установлено также, что данная конструктивно-технологическая схема, на основе которой создана экспериментальная установка, позволяет получить сепарирующую систему со стабильным распределением воздушного потока по ее поверхности, что положительно влияет на эффективность процесса сепарации. Замеры скоростей воздушного потока проводились с помощью электроанемометра в статике (БПС не вращался). По результатам замеров строились эпюры распределения скоростей воздушного потока по кольцевой поверхности горизонтального БПС. Результаты показали, что в данном случае происходит практически равномерное распределение скоростей воздушного потока по площади кольцевой поверхности БПС.

**Keywords:** *intensification, separation, working body, heap, granular bulk materials, fluidized bed, operating corridor.*

The intensification of the separation process of bulk granular materials which may be achieved by developing separation systems based on new technological principles is discussed. In our opinion, such a system is a blocked fluidized bed (BFB) which is a two-phase aeromechanical system that may be adjusted for separating capacity - effective density intermediate between the densities of the components being separated. The studies of granular bulk material separation in a BFB were conducted by using an experimental setup. The intensification of the separation in this device is achieved by increasing the rotational speed of the working element. Therefore, it was necessary to determine how this affected the size of the separation corridor - the gap between the trajectories of the mixture components during separation. A mixture of wheat grain and soil clods and

stones of equal size was used for testing. The research findings showed that this mixture was completely separated. It was found that the size of the separation corridor increased slightly with increasing rotational speed of the working element. When the working element with the BFB rotated at speeds ranging from 100 to 400 rpm, the operating corridor size varied from 4.5 to 10 mm. It was also found that this design and technological scheme on which the experimental setup was based allowed gaining a separation system with a stable airflow distribution across its surface which positively impacted the efficiency of the separation. The airflow velocity measurements were conducted using an electric anemometer in a static state (the BFB was not rotating). Based on these measurements, airflow velocity distribution diagrams were constructed across the annular surface of the horizontal BFB. The results showed that, in this case, the airflow velocity was distributed almost uniformly across the circular surface of the BFB.

**Зубков Виктор Егорович**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой технического сервиса в АПК, ФГБОУ ВО Луганский ГАУ, г. Луганск, Российская Федерация, e-mail: zubkov-viktor@mail.ru.

**Семилетова Наталья Павловна**, ст. преподаватель, ФГБОУ ВО Луганский ГАУ, г. Луганск, Российская Федерация, e-mail: natalya\_semiletova78@mail.ru.

**Кравцов Леонид Сергеевич**, аспирант, ФГБОУ ВО Луганский ГАУ, г. Луганск, Российская Федерация, e-mail: krom.86@mail.ru.

**Zubkov Viktor Egorovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Lugansk Voroshilov State Agricultural University, Lugansk, Russian Federation, e-mail: zubkov-viktor@mail.ru.

**Semiletova Natalya Pavlovna**, Asst. Prof., Lugansk Voroshilov State Agricultural University, Lugansk, Russian Federation, e-mail: natalya\_semiletova78@mail.ru.

**Kravtsov Leonid Sergeevich**, post-graduate student, Lugansk Voroshilov State Agricultural University, Lugansk, Russian Federation, e-mail: krom.86@mail.ru.

## Введение

Целью интенсификации процесса сепарации является повышение производительности сепарирующих органов и улучшение качества их работы. Данная цель может достигаться путем создания новых рабочих органов с использованием в технологическом процессе центробежного сепарирования, которое происходит под действием инерционных сил; применением рабочих органов с оптимальными геометрическими, кинематическими, динамическими и аэродинамическими параметрами. Кроме того, должны быть обеспечены автоматизация и контроль параметров технологических процессов сепарации, автоматическое управление технологическим оборудованием и оптимизация режимов его работы [1-4].

Для повышения эффективности процесса сепарации зернистых сыпучих материалов боль-

шое значение имеет разработка сепарирующих систем, основанных на новых технологических принципах. Среди таких систем перспективной представляется блокированный псевдоожиженный (или вибропсевдоожиженный) слой (БПС или БВПС). Эта аэромеханическая система представляет собой псевдоожиженный слой с ограниченной подвижностью его твердой фазы по вертикали. В отличие от обычного псевдоожиженного слоя, его твердая фаза состоит из дисков, соединенных гибкими нитями в цепочки-гирлянды. Эти гирлянды крепятся к решетке для распределения воздуха. Вентилятор, установленный отдельно, обеспечивает продувку БПС воздушным потоком. Воздушный поток, воздействуя на гирлянды, заставляет их подниматься. В результате образуется зона с пониженным статическим давлением, что позволяет разделять зернистые сыпучие материалы по плотно-

сти [5]. Изменение геометрических и аэродинамических свойств БПС дает возможность получить «эффективную плотность», которая будет находиться между плотностями разделенных компонентов. Эффективная плотность БПС включает статическую  $P_c$  и динамическую  $P_d$  составляющие от воздушного потока, омывающего твердую фазу БПС – гирлянд. Определенную долю в эффективной плотности БПС также включает механическая составляющая  $P_m$ , которая возникает от механического взаимодействия гирлянд и компонентов вороха зернистого сыпучего материала, поступающего на сепарацию. Поскольку эти составляющие оказывают суммарное действие на зерно в БПС, то, следовательно, можно записать [6]:

$$F = P_c + P_d + P_m,$$

где  $F$  – суммарная сила, действующая на зерно в БПС;

$P_c$ ,  $P_d$ ,  $P_m$  – соответственно, статическая, динамическая и механическая составляющие суммарной силы  $F$ , поэтому эффективную плотность можно определить из выражения:

$$\rho_{\text{э}} = \frac{F}{V \cdot g},$$

где  $\rho_{\text{э}}$  – эффективная плотность БПС;

$F$  – суммарная сила, действующая на зерно в БПС;

$V$  – объем зерна;

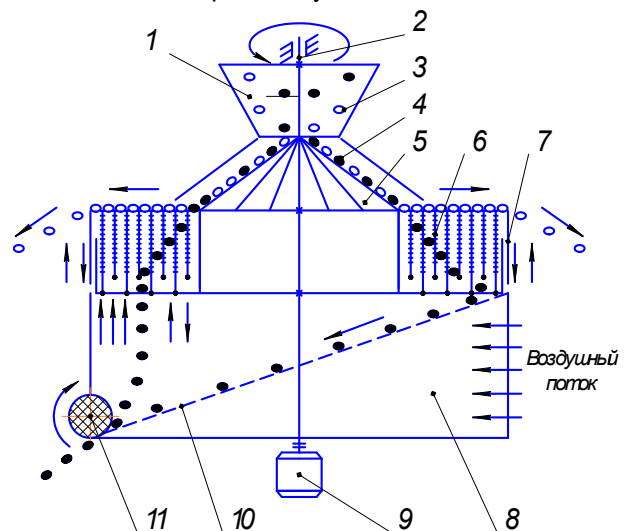
$g$  – ускорение свободного падения.

В данной работе нами разработана конструкторско-технологическая схема экспериментальной установки, на которой проводились исследования процесса сепарации зернистых сыпучих материалов в БПС (рис. 1).

Процесс сепарации в данной экспериментальной установке протекает следующим образом. Ворох зернистого сыпучего материала подается в горловину 1 и далее попадает на разгонный конус 5, вращающийся вместе с горловиной 1 валом привода 2, гирляндами БПС 6 и телескопической стенкой 7.

Ворох зернистого сыпучего материала сходит с начальной скоростью с разгонного конуса 5 и попадает в БПС, состоящий из гирлянд 6, продуваемых воздушным потоком. В связи с тем,

что БПС настроен на «эффективную плотность», промежуточную между плотностями разделяемых компонентов, зерна высокой плотности 4, попадая в БПС, опускаются вниз и, проходя в просветы воздухораспределительной решетки, опускаются на решетчатый скат 10, установленный под углом к горизонту, и через выгрузной валик выходят за пределы установки. Зерна низкой плотности 3, находящиеся в верхней части БПС, под действием центробежной силы проходят выше телескопической стенки 7 и также выходят за пределы установки.



**Рис. 1. Конструкторско-технологическая схема экспериментальной установки:**

**1 – горловина; 2 – вал привода;**

**3 – зерна низкой плотности;**

**4 – зерна высокой плотности;**

**5 – разгонный конус; 6 – гирлянда;**

**7 – телескопическая стенка; 8 – воздуховод;**

**9 – электропривод; 10 – сетчатый скат;**

**11 – выгрузной валик**

Таким образом, мы совмещаем технологические элементы решетчатой системы, когда зерна высокой плотности, преодолев сопротивление БПС, проходят через пространственную решетку крепления гирлянд, а зерна низкой плотности идут сходом с поверхности БПС.

Промежуточное значение эффективной плотности БПС может устанавливаться путем регулировки геометрических и аэродинамических параметров БПС, что необходимо в случае изменения физико-механических свойств вороха зернистых сыпучих материалов, поступающих

на сепарацию. Движение компонентов зернистого сыпучего материала в БПС в зависимости от их плотности должно проходить по непересекающимся траекториям, и притом между ними должен быть разрыв, который называется технологическим коридором.

От величины «технологического коридора» зависит четкость процесса сепарации, поэтому нами была определена величина технологического коридора БПС в зависимости от числа оборотов рабочего органа.

Для определения величины технологического коридора использованы решения дифференциального уравнения движения зерна во вращающемся горизонтальном БПС [6]:

$$X = \left( 14,3 \frac{D}{m} - \omega^2 \cdot R \right) \frac{t^2}{2}; \quad (1)$$

$$Y = \left( \frac{\rho_z}{\rho_m} - 1 \right) \cdot \frac{g \cdot t^2}{2}, \quad (2)$$

где  $X$  – перемещение зерна по оси  $X$ ;

$Y$  – перемещение зерна по оси  $Y$ ;

$D$  – диаметр зерна;

$m$  – масса зерна;

$\omega$  – угловая скорость вращения рабочего органа с БПС;

$R$  – радиус от центра вращения рабочего органа до центра зерна, находящегося в БПС;

$\rho_z$  – эффективная плотность слоя;

$\rho_m$  – плотность зерна;

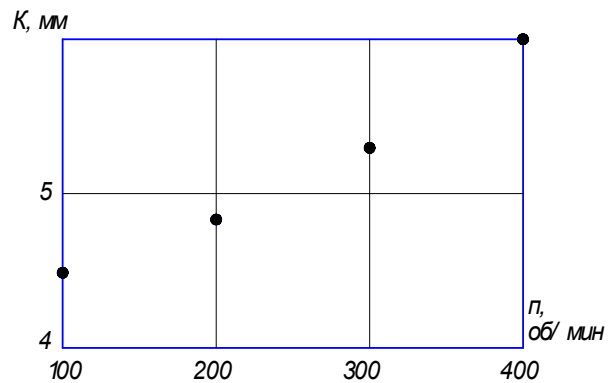
$g$  – ускорение свободного падения;

$t$  – время;

14,3 – опытный коэффициент.

Выполнив расчеты по формулам (1) и (2), при изменении оборотов рабочего органа от 100 до 400 об/мин., мы получили значение величины технологического коридора в зависимости от числа оборотов рабочего органа (рис. 2).

Как следует из графика, при применении числа оборотов рабочего органа с БПС от 100 до 400 об/мин. величина технологического коридора изменяется от 4,5 до 10 мм. Расчеты также показали, что при применении числа оборотов рабочего органа с БПС от 10 до 40 об/мин. величина технологического коридора остается практически неизменной – 17,4-17,8 мм.

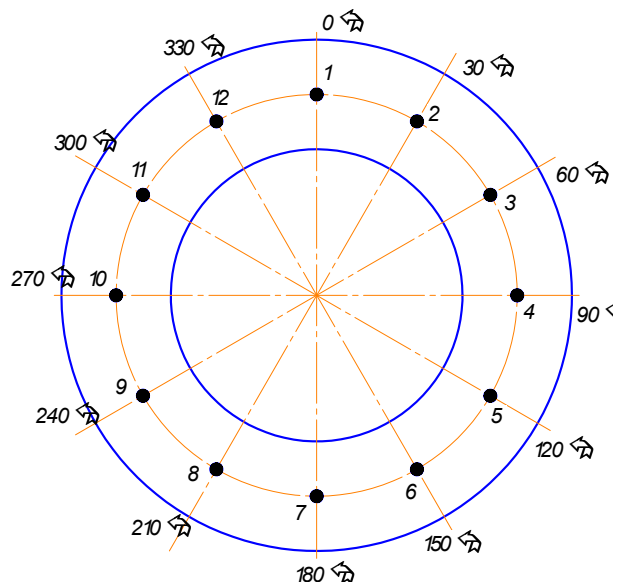


**Рис. 2. Зависимость величины технологического коридора  $K$  от числа оборотов поверхности БПС –  $n$ , при  $X=1 \text{ м}$**

$$\begin{aligned} (\rho_{m1} &= 1300 \text{ кг/м}^3; \rho_{m2} = 800 \text{ кг/м}^3; \\ m_1 &= 0,000085 \text{ кг}; m_2 = 0,000052 \text{ кг}; \rho_z = 1000 \text{ кг/м}^3; \\ t &= 0,01-0,04 \text{ с}) \end{aligned}$$

На эффективность технологического процесса сепарации существенное значение оказывает равномерность распределения воздушного потока по рабочей поверхности БПС [7].

Замеры скоростей воздушного потока проводились с помощью электроанемометра по следующей схеме (рис. 3).



**Рис. 3. Кольцевая поверхность горизонтального вращающегося БПС (вид сверху):  
1-12 – точки замера скоростей воздушного потока**



Тестирование эффективности технологического процесса сепарации осуществлялось следующим образом. Для сепарации использовался ворох материала из сельскохозяйственного производства. Для обмера бралось научно обоснованное количество материала. В результате замеров и взвешиваний были определены статистические показатели размерно-массовых характеристик. В установку равномерно загружалась исходная смесь. Разделенные компоненты улавливались. Для тестирования использовалась смесь зерна пшеницы и равновесных по размерам почвенных комков и камней засоренностью примеси/материал 50×50%.

Оценка эффективности сепарации проводилась с помощью формулы:

$$\varepsilon = 100 - (\delta_{\pi} + \lambda \delta_{\kappa}),$$

где  $\delta_{\pi}$  – количество ошибочно выделенных примесей;

$\delta_{\kappa}$  – количество ошибочно выделенного основного материала;

$\lambda$  – засоренность исходной массы.

Результаты исследований показали, что такая смесь разделяется полностью. В дальнейшем будут уточнены параметры твердой фазы БПС – гирлянд и проведены эксперименты по определению эффективности сепарации смесей зернистых сыпучих материалов, имеющих различные физико-механические свойства входящих в них компонентов.

### Выводы

1. Предложенная конструктивно-технологическая схема сепарирующего устройства позволяет интенсифицировать процесс сепарации путем повышения частоты вращения рабочего органа.

2. С повышением частоты вращения рабочего органа технологический коридор – разрыв между траекториями движения компонентов смеси в процессе сепарации – повышается.

3. В перспективе предстоит уточнить параметры вводно-выводного устройства сепарирующего органа, а также геометрические параметры твердой фазы сепарирующей системы, в

связи с сепарацией различных размерных групп сыпучего зернистого материала.

### Библиографический список

1. Ямпиллов, С. С. Интенсификация процесса сепарации на каскадном решетном сепараторе / С. С. Ямпиллов, Г. Ж. Хандакова, А. С. Бадмаева. – Текст: непосредственный // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2017. – № 1 (64). – С. 73-76.
2. К обоснованию параметров пластинчатого барабана центробежно-решетного сепаратора / Н. И. Стрикунов, С. В. Леканов, С. С. Щербаков, М. Е. Микитюк. – DOI 10.53083/1996-4277-2022-210-4-107-112. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 4 (210). – С. 107-112.
3. Расчет основных параметров и режимов работы блока цилиндрических решет центробежно-решетного сепаратора / Н. И. Стрикунов, С. В. Леканов, С. С. Щербаков, М. Е. Микитюк. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1 (195). – С. 96-101.
4. Микитюк, М. Е. Повышение эффективности очистки зерна на цилиндрическом подсевном решете: 4.3.1. «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Микитюк Максим Евгеньевич. – Барнаул, 2023. – 193 с. – Текст: непосредственный.
5. Зубков, В. Е. Моделирование сепарации сыпучих зернистых материалов в горизонтальном вращающемся блокированном псевдооживленном слое (БПС) / В. Е. Зубков, И. А. Тарабановская, А. В. Боярский. – Текст: непосредственный // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. – 2022. – № 1 (14). С. 340-346.
6. Startsev, A., Iksanov, K., Demin, E., et al. (2024). Mechanical and mathematical justification of the operation of the upper sieve extension of the combine harvester cleaning system. *Agrarian Sci-*

*entific Journal.* 143-151. DOI: 10.28983/asj.y2024i10pp143-151.

7. Зубков, В. Е. Альтернативная технология сепарации сельскохозяйственных материалов. Часть 1. Сепарация крупнозернистых материалов – корнеклубнеплодов, почвенных комков и камней: монография / В. Е. Зубков. – Москва: ООО «Актуальность.РФ», 2024 г. – 228 с. – Текст: непосредственный.

### References

1. Yampilov S.S., Khandakova G.Zh., Badmaeva A.S. Intensifikatsiya protsessa separatsii na kaskadnom reshetnom separatore // *Vestnik VSTUTU.* – 2017. – No. 1 (64). – S. 73-76.

2. Strikunov N. I. K obosnovaniyu parametrov plastinchatogo barabana tsentrobezhno-reshetnogo separatora / N. I. Strikunov, S. V. Lekanov, S. S. Shcherbakov, M. E. Mikityuk // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* – 2022. – No. 4 (210). – S. 107-112. – DOI 10.53083/1996-4277-2022-210-4-107-112.

3. Strikunov N. I. Raschet osnovnykh parametrov i rezhimov raboty bloka tsilindricheskikh reshet tsentrobezhno-reshetnogo separatora / N. I. Strikunov, S. V. Lekanov, S. S. Shcherbakov, M. E. Mikityuk // *Vestnik Altayskogo gosudarstven-*

*nogo agrarnogo universiteta.* – 2021. – No. 1 (195). – S. 96-101.

4. Mikityuk M. E. Povyshenie effektivnosti oчитки zerna na tsilindricheskom podsevnom reshete: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 4.3.1. / Mikityuk Maksim Evgenevich. – Barnaul, 2023. – 193 s.

5. Zubkov, V. E. Modelirovanie separatsii sypuchikh zernistykh materialov v gorizontaln timerashchayushchemsya blokirovannom psevdoozhizhennom sloe (BPS) / V. E. Zubkov, I. A. Tarabanovskaya, A. V. Boyarskiy // *Nauchnyy vestnik Luganskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* – 2022. – No. 1 (14). – S. 340-345.

6. Startsev, A., Iksanov, K., Demin, E., et al. (2024). Mechanical and mathematical justification of the operation of the upper sieve extension of the combine harvester cleaning system. *Agrarian Scientific Journal.* 143-151. DOI: 10.28983/asj.y2024i10pp143-151.

7. Zubkov, V. E. Alternativnaya tekhnologiya separatsii selskokhozyaystvennykh materialov Chast 1. Separatsiya krupnozernistykh materialov – korneklubneplodov, pochvennykh komkov i kamney: monografiya / V. E. Zubkov. – Moskva: ООО "Aktualnost.RF", 2024. – 228 s.

