

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.55.035

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-2-21-27

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАБОТЫ СЕПАРАТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЗЕРНА

ТРОНЕВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ, *д-р техн. наук, доцент*¹

stronev@mail.ru

ЧАПЛЫГИН МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ✉, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник*²

misha2728@yandex.ru✉

¹ Волгоградский государственный аграрный университет; 400002, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Университетский, 26² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Процесс определения уровня допустимых потерь зерна при работе зерноуборочных комбайнов связан со сложностью взятия пробы из-под работающего комбайна по всем предъявляемым требованиям ГОСТ и ее дальнейшей обработки. С целью определения потерь зерна проведены теоретические исследования технологического процесса работы сепараторов и рассмотрена теория разделения компонентов смеси по удельному весу. Использовались результаты предыдущих исследований авторов, а также информация из научно-исследовательских отчетов по данной тематике. Отмечена необходимость учета трех факторов, влияющих на точность расчета: природы сил, действующих на отдельные частицы в слое сепаратора; аэростатического поля, оказывающего на отдельную частицу аэростатическое воздействие, обеспечивающего скважность и разделение частиц при рабочих скоростях воздушного потока сепаратора; перемешивания частиц в слое пробы и разделения их в сепараторе по удельному весу. Определено, что при прохождении воздушного потока через слой сыпучей пробы внутри слоя образуется аэростатическое поле, обладающее большим градиентом статического давления, в котором частицы (зерна) разделяются только по удельному весу, независимо от их размеров, абсолютного веса или формы. В процессе работы сепаратора наряду с аэростатическим воздействием воздушный поток оказывает на частицы также аэродинамическое воздействие, которое отрицательно влияет на разделяемость зерна. В результате исследований установлено, что оптимальным режимом работы сепаратора следует считать такой режим, при котором скорость воздушного потока, проходящего через слой сыпучей пробы, минимальна, а разность давлений воздуха на границах слоя уравнивает слой зерна.

Ключевые слова: сепараторы, потери зерна, технологический процесс, зерноуборочные комбайны, пробы, воздушный поток.

Формат цитирования: Тронеv С.В., Чаплыгин М.Е. Теоретические исследования технологического процесса работы сепараторов для определения потерь зерна // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 2. С. 21-27. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-21-27>.

© Тронеv С.В., Чаплыгин М.Е., 2022



ORIGINAL PAPER

THEORETICAL STUDIES OF THE TECHNOLOGICAL OPERATION OF SEPARATORS TO DETERMINE GRAIN LOSS

SERGEY V. TRONEV, *DSc (Eng), Associate Professor*¹

stronev@mail.ru

MIKHAIL E. CHAPLYGIN✉, *PhD (Eng), Senior Research Engineer*²

misha2728@yandex.ru✉

¹ Volgograd State Agrarian University; 26, Universitetskiy Ave., Volgograd, 400002, Russian Federation² Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1st Institutskiy Proezd Srt., Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. Determining the level of permissible grain loss during the operation of combine harvesters is associated with the difficulty of taking a sample from under the working combine harvester according to all the GOST requirements and its further processing. To determine grain losses, the authors carried out theoretical studies of the technological operation of separators and considered the theory of separating the mixture components by specific gravity. The results of previous studies, as well as some information from the relevant research reports were used. Three factors influencing the calculation accuracy were taken into account: the nature of forces acting on individual particles in the separator layer; the aerostatic field exerting an aerostatic influence on the individual particles, which ensures their separation at operating speeds of the separator air flow; the mixing of particles in the sample layer and their separation by specific gravity. It was determined that when the air flow passes through a layer of bulk sample, an aerostatic field is formed inside the layer. It has a large static pressure gradient, in which the particles (grains) are separated only by their specific gravity, regardless of their size, absolute weight or

shape. During the separator operation, of air flow has both the aerostatic and aerodynamic effect on the particles, which negatively affects grain separability. As a result of studies, the authors found that the optimal operation mode of the separator has the minimal speed of air flow through a layer of bulk sample, and the air pressure difference at the layer boundaries balances the grain layer.

Key words: separators, grain loss, technological process, combine harvesters, samples, air flow.

For citation: Tronev S.V., Chaplygin M.E. Theoretical studies of the technological operation of separators to determine grain loss. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(2): 21-27. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-21-27>.

Введение. На современных отечественных и иностранных зерноуборочных комбайнах установлены штатные системы определения потерь зерна на рабочих органах комбайна, решетках очистки, соломотрясе и роторе^{1,2,3}. Данные системы постоянно совершенствуются и модернизируются [1-6]. Основным недостатком штатных систем определения потерь зерна является потребность в корректировке при настройке системы [7]. При корректировке должен учитываться уровень допустимых потерь зерна за жаткой комбайна и за молотилкой, которые определяются посредством проведения экспресс-оценки потерь, допускаемых при работе зерноуборочного комбайна [8-12]. Процесс определения уровня допустимых потерь зерна в виде колоса, свободного зерна и дробления при работе зерноуборочных комбайнов связан со многими технологическими трудностями, а именно взятия самой пробы из-под работающего комбайна по всем предъявляемым требованиям ГОСТ 28301 и ее дальнейшей обработки. От правильности выполнения данных операций зависит корректная оценка работы зерноуборочного комбайна, что отражается на производительности машины в целом и на полноте сбора выращенного урожая. Проводились исследования технологического процесса разделения проб зернового вороха в современных сепараторах, предназначенных для определения потерь зерна посредством процесса аэродинамического воздействия. Аэродинамическое воздействие (сепарирование) применяют в основном для очистки и выделения из многокомпонентной смеси легких примесей⁴ [13, 14]. По данным ранее проведенных исследований, на процесс аэродинамического сепарирования действует комплекс признаков, влияющих на характер разделения смеси: форма, крупность, масса, удельная масса, характер внешней поверхности семени [15]. Исходя из влияния комплекса признаков аэродинамическое сепарирование может иметь разную эффективность, зависящую от физико-механических и сортовых особенностей зерновых культур.

Разработанные современные модели сепараторов для определения потерь зерна относятся к средствам контроля качества работы зерноуборочных комбайнов, которые при разделении пробы используют воздушный поток, создаваемый вентилятором, имеющим электрический или механический привод РМ-228.

В работах исследователей [8-10] проводились опыты по определению потерь зерна за зерноуборочным комбайном,

когда для разделения компонентов зернового вороха применялись сепараторы различных конструкций. При работе сепараторов наблюдалось явление, когда длинные частицы соломы зависали на решетке, и чтобы их удалить из зоны очистки, приходилось увеличивать скорость воздушного потока. Это приводило к искажению достоверности опыта, так как с соломой из данной зоны удалялись и зерна.

Первые исследователи технологического процесса полагали, что воздушный поток оказывает на отдельные компоненты пробы аэродинамическое воздействие, в результате которого происходит отделение сорных примесей от зерна по удельному весу. Из этой концепции исходят почти все теории разделения компонентов смеси по удельному весу.

Загружаемая в сепаратор перед началом опыта проба имеет в своем составе измельченную солому, зерно, свободное и покрытое оболочкой, и фрагменты необмолоченного колоса. Состав пробы зависит от места ее взятия (жатка комбайна, молотилка и измельчитель-разбрасыватель).

Экспериментально установлено, что сила, которая действует на отдельные компоненты в слое пробы, возникает в результате аэродинамического воздействия потока воздуха. Величина аэродинамической силы $P_{\text{дин}}$ зависит от миделева сечения частицы (при постоянной скорости воздушного потока), то есть от крупности частиц и их положения в слое, и соответственно эта сила пропорциональна квадрату относительной скорости воздуха и обрабатываемой частицы:

$$P_{\text{дин}} = kpSv^2, \quad (1)$$

где $P_{\text{дин}}$ – аэродинамическая сила, действующая на отдельные компоненты в слое пробы, Н; k – аэродинамический коэффициент; p – плотность воздуха, кг/м³; S – площадь миделева сечения отдельных компонентов пробы, м²; v – скорость воздуха относительно частицы, м/с.

Применить теорию для расчета сепараторов оказалось невозможно по причине возникновения явных противоречий между основными выводами теории и фактическими данными, установленными при работе сепараторов в полевых условиях.

Цель исследования: провести совершенствование теоретических исследований технологического процесса работы сепараторов для определения потерь зерна на основе теории разделения компонентов смеси по удельному весу при аэродинамическом воздействии.

Материалы и методы. Предложена теория «стенного падения» частиц, согласно которой учитывается пористость слоя пробы. Это говорит о том, что природа сил, действующих на отдельные частицы в слое, находящегося в сепараторе, не может быть обусловлена только аэродинамическим воздействием.

Основным действующим фактором, определяющим процесс разделения компонентов по удельному весу

¹ ООО «Джон Дир Русь». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deere.ru> (дата обращения: 12.07.2021).

² ООО «КЛААС Восток». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.claas.ru> (дата обращения: 12.07.2021).

³ ООО КЗ «Ростсельмаш». [Электронный ресурс]. URL: <http://rostselmash.com> (дата обращения: 12.07.2021).

⁴ Воронцов О.С. Элеваторная промышленность, зерносушение и зерноочистка. М.: Колос, 1974. 432 с.

в сепараторе, является аэростатическое поле воздушного потока, проходящего через слои пробы. Это аэростатическое поле возникает в результате сопротивления пористого слоя пробы воздушному потоку и оказывает на отдельную частицу аэростатическое воздействие. Данное воздействие способно обеспечить скважность и взвесить отдельные частицы в слое, тем самым обеспечить их разделение при тех скоростях воздушного потока, которые фактически наблюдаются при работе сепаратора.

Результаты и обсуждение. Изучение разделения компонентов пробы по удельному весу в сепараторе рассмотрим в аэростатическом поле воздушного потока. Представим воздушный поток, движущийся в канале постоянного сечения с постоянной скоростью v (рис. 1).

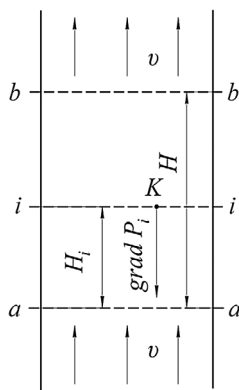


Рис. 1. Схема воздушного потока в сепараторе
Fig. 1. Air flow pattern in the separator

Если измерить статическое давление по сечению $a-a$, то это давление будет одинаковым по всему сечению. Обозначим величину статического давления в сечении $a-a$ через p_a , Па. Таким же образом величина статического давления во всех точках сечения $b-b$ будет равна p_b , Па. Разница между давлениями p_a и p_b будет тем больше, чем больше расстояние между сечениями $a-a$ и $b-b$ и чем больше скорость воздушного потока v .

Возьмем между сечениями $a-a$ и $b-b$ промежуточное сечение $i-i$, которое расположено на произвольном расстоянии H_i , м, от базового сечения $a-a$. Статическое давление в сечении $i-i$ будет меньше давления p_a , но больше давления p_b . При этом величина давления p_i будет находиться в прямой зависимости от места расположения сечения $i-i$, то есть от расстояния H_i . Участок воздушного потока, который расположен между сечениями $a-a$ и $b-b$, можно расчесть бесконечным множеством сечений $i-i$, расположенных друг от друга на бесконечно малом расстоянии ΔH .

Если статическое давление в каждой точке каждого сечения p_i будет отличаться от давления в точках соседних сечений на бесконечно малую величину Δp_i , то совокупность статических давлений p_i во всех точках воздушного потока между сечениями $a-a$ и $b-b$ образует аэростатическое поле воздушного потока.

В отличие от аэродинамического поля аэростатическое поле является скалярным. Из элементарной теории поля следует, что главной характеристикой скалярного поля является градиент скалярной величины, и он является величиной векторной. В нашем случае такой скалярной величиной является статическое давление p_i , которое

взятое в произвольной точке воздушного потока. Если взять произвольную точку K в сечении $i-i$, то величина градиента выразится вектором $grad p_i$, который направлен в сторону увеличения статического давления, то есть в сторону сечения $a-a$, и вектор $grad p_i$ будет расположен перпендикулярно плоскости сечения $i-i$. Градиент $grad p_i$, Па/м, будет равен отношению приращения статического давления Δp_i к приращению расстояния ΔH при условии, что эти величины будут стремиться к нулю, то есть

$$grad p_i = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta p_i}{\Delta H} \quad \text{или} \quad grad p_i = \frac{\Delta p_i}{\Delta H}. \quad (2)$$

По выражению (2) можно вычислить изменение давления на любом расстоянии H_i от начального сечения $a-a$:

$$p_a - p_i = \int_0^{H_i} grad p_i dH \quad \text{или} \quad p_a - p_i = grad p_i H_i. \quad (3)$$

Отсюда

$$p_i = p_a - grad p_i H_i. \quad (4)$$

Рассчитать величину $grad p_i$ можно, если известно давление p_a и p_b :

$$grad p_i = \frac{p_a - p_b}{H}. \quad (5)$$

Определим воздействие аэростатического поля воздушного потока на частицу (зерно), которое находится в этом поле. На рисунке 2 показан вертикальный восходящий воздушный поток, имеющий постоянную скорость v . В качестве начального сечения выберем сечение $c-c$, в котором статическое давление равно p_0 . В аэростатическом поле воздушного потока находится компонент пробы частица с определенным весом Q произвольной формы. Если через центр тяжести компонента пробы частицы с определенным весом Q провести плоскость $c-c$, перпендикулярную направлению воздушного потока, то она разделит поверхность компонента пробы на две части: верхнюю полуповерхность D_1 и нижнюю D_2 . От начального сечения $O-O$ компонент пробы частица с определенным весом Q расположена на расстоянии H_c .

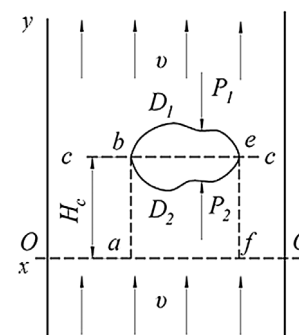


Рис. 2. Действие аэростатического поля воздушного потока на компонент пробы произвольной формы

Fig. 2. Effect of the aerostatic field of the air flow on the sample component of an arbitrary shape

На площади полуповерхностей D_1 и D_2 оказывается давление, равное, статическому давлению p_i в соответствующей точке аэростатического поля воздушного потока.

На поверхности D_1 общая сумма этих давлений дает результирующую силу P_1 , которая направлена навстречу воздушному потоку. Результирующая сила P_2 будет иметь обратное направление, и сила P_2 будет всегда больше силы P_1 , так как статические давления p_i в точках аэростатического поля, расположенных ниже плоскости $c-c$, будут всегда больше, чем в точках поля, расположенных над этой плоскостью.

Расположим оси координат X и Y в плоскости $O-O$. Обозначим размер проекции элементарной площадки поверхности D_1 на плоскость XY через $dxdy$, а расстояние от середины этой элементарной площадки до начального сечения $O-O$ – через H'_i , причем всегда $H'_i > H_c$. Аналогично для поверхности D_2 площадь проекции будет $dxdy$, а расстояние до начального сечения – H''_i , причем $H''_i < H_c$. Статическое давление в произвольной точке поверхности будет равно в нашем случае (см. уравнение (4))

$$p_i = p_0 - \text{grad } p_i H'_i. \quad (6)$$

Для поверхности D_2

$$p_i = p_0 - \text{grad } p_i H''_i. \quad (7)$$

Сила P_1, H , будет равна

$$P_1 = \iint_{D_1} (p_0 - \text{grad } p_i H'_i) dx dy, \quad (8)$$

а сила P_2, H , –

$$P_2 = \iint_{D_2} (p_0 - \text{grad } p_i H''_i) dx dy. \quad (9)$$

Результирующая сила P , действующая на компонент пробы частицы с определенным весом Q в направлении воздушного потока, будет равна

$$P = P_2 - P_1 = \iint_{D_2} (p_0 - \text{grad } p_i H''_i) dx dy - \iint_{D_1} (p_0 - \text{grad } p_i H'_i) dx dy. \quad (10)$$

После несложных преобразований будем иметь

$$P = \text{grad } p_i \left[\iint_{D_1} H'_i dx dy - \iint_{D_2} H''_i dx dy \right]. \quad (11)$$

Первый интеграл $\iint_{D_1} H'_i dx dy$ является объемом цилиндрического тела abD_1ef , ограниченного сверху поверхностью D_1 , а второй интеграл $\iint_{D_2} H''_i dx dy$ является объемом цилиндрического тела abD_2ef , ограниченного сверху поверхностью D_2 . Обозначим эти объемы соответственно через $V_1, \text{ м}^3$, и $V_2, \text{ м}^3$. Если воздушный поток имеет постоянное сечение вдоль оси потока и постоянную скорость движения, то величина градиента статического давления будет одинаковой и постоянной для всех точек воздушного потока, то есть $\text{grad } p_i = \text{const} = \text{grad } p$.

Тогда уравнение (11) можно записать в следующем виде:

$$P = \text{grad } p (V_1 - V_2).$$

Но разность $V_1 - V_2$ есть не что иное, как полный объем V и компонент пробы частицы с определенным весом Q . Тогда окончательное выражение аэростатической силы примет вид:

$$P = \text{grad } p V. \quad (12)$$

Аэростатическая сила, действующая на компонент пробы, помещенной в воздушный поток, будет в сотни раз меньше аэродинамической силы, которая будет действовать на тот же компонент. Поэтому в большинстве случаев учитывать при расчетах аэростатическую силу не имеет никакого смысла. Однако картина резко изменяется, если рассматривать воздушный поток, проходящий через слой сыпучей пробы, что имеет место в сепараторе. Упрощенная схема технологического процесса сепаратора (применительно к «зоне расслоения») представлена на рисунке 3.

На сите $a-a$ располагается слой зерна с удельным весом $\gamma_0, \text{ Н/м}^3$, толщиной $H_0, \text{ м}$. Поток воздуха проходит через слой снизу вверх с постоянной скоростью под действием разности давлений воздуха на границах слоя зерна $p_2 - p_1 = \Delta p$. Как показывает практика эксплуатации сепараторов, наилучшее расслоение зерна по удельному весу достигается в том случае, когда «воздушная подушка», образуемая разностью давлений Δp , полностью уравнивает слой зерна. Такое уравнивание произойдет в том случае, если

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \mu \gamma_0 H_0 \quad (13)$$

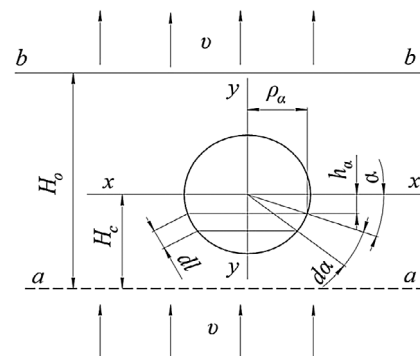


Рис. 3. Схема технологического процесса разделения в слое сыпучей пробы

Fig. 3. Scheme of the separation process in the layer of loose samples

Величина коэффициента μ зависит от физико-механических свойств семян и от конструктивных особенностей машины. Для мелкого зерна этот коэффициент меньше единицы (до 0,8), для крупного и плотного он равен единице или несколько больше.

На разделение зерна оказывает влияние часть воздушного потока, которая находится внутри слоя, то есть между границами $a-a$ и $b-b$. Градиент аэростатического поля этого участка воздушного потока можно определить по уравнению (5), воспользовавшись подстановкой из уравнения (13):

$$\text{grad } p_i = \frac{p_2 - p_1}{H_0} = \frac{\mu \gamma_0 H_0}{H_0} = \mu \gamma_0. \quad (14)$$

Рассмотрим внутри слоя сыпучей пробы сферическую частицу (зерно) радиуса r , имеющую вес Q . Частица находится на расстоянии H_c от сита $a-a$.

Статическое давление воздушного потока на уровне $x-x$ p_{Hc} , Па, будет равно (см. уравнение (4))

$$p_{Hc} = p_2 - \text{grad } p_{Hc}. \quad (15)$$

В центре сферической частицы (зерна) поместим систему координат. На поверхности сферы выделим элементарное

кольцо шириной dl , м, и радиусом ρ_α , м. Кольцо расположено на произвольном расстоянии h_α , м, от оси $x-x$. Переменные величины ρ_α и h_α можно выразить через центральный угол α , град., перейдя, таким образом, к полярной системе координат. Величину dl можно выразить через элементарный угол $d\alpha$:

$$dl = r d\alpha. \quad (16)$$

Площадка элементарного кольца dS , м², будет, очевидно, равна

$$dS = 2\pi \rho_\alpha dl, \quad (17)$$

а элементарная вертикальная сила dP , Н, действующая на эту площадку, –

$$dP = ph_\alpha dS \sin \alpha, \quad (18)$$

где ph_α – статическое давление воздушного потока на расстоянии h_α от оси x , Па; $dS \sin \alpha$ – горизонтальная проекция площади элементарного кольца, м².

Если в качестве начального сечения для отсчета статических давлений принять сечение $x-x$, давление $p_{\text{на}}$, Па, выразится следующим образом:

$$p_{\text{на}} = \text{grad } p h_\alpha. \quad (19)$$

После подстановки в уравнение (18) значений ph_α и dS будем иметь

$$dP = 2\pi r^3 \text{grad } p \sin^2 \alpha \cos \alpha d\alpha. \quad (20)$$

Аэростатическая подъемная сила $P_{\text{ст}}$, Н, действующая на сферическую частицу в слое сыпучего тела, будет равна

$$P_{\text{ст}} = 2\pi r^3 \text{grad } p_i \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sin^2 \alpha \cos \alpha d\alpha. \quad (21)$$

После интегрирования будем иметь

$$P_{\text{ст}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \text{grad } p = \text{grad } p V, \quad (22)$$

где $V = \frac{4}{3} \pi r^3$ – объем сферической частицы (зерно), м³.

Оптимальное значение $P_{\text{ст}}$ будет равно (см. уравнение (14))

$$P_{\text{ст}} = \mu \gamma_0 V. \quad (23)$$

Объем отдельной частицы (зерна) можно представить в следующем виде:

$$V = \frac{Q}{\gamma} = \frac{mg}{\gamma}, \quad (24)$$

где Q – частица (зерно) с определенным весом, Н; m – масса частицы (зерна), кг; g – ускорение свободного падения, м/с², а γ – удельный вес частицы (зерна), Н/м³.

Подставив это выражение в уравнение (23) и сделав некоторые преобразования, получим

$$\frac{P_{\text{ст}}}{m} = \mu g \gamma_0 \frac{1}{\gamma}. \quad (25)$$

Но $\frac{P_{\text{ст}}}{m} = J_{\text{ст}}$, м/с², то есть ускорению, которое частица (зерно) приобретает под действием аэростатической силы $P_{\text{ст}}$. Следовательно, можно написать, что

$$J_{\text{ст}} = \mu g \gamma_0 \frac{1}{\gamma}. \quad (26)$$

Поскольку величины μ , g и γ_0 для данной частицы (зерна) являются постоянными, ускорения отдельных частиц в аэростатическом поле зависят лишь от их собственного удельного веса и совершенно не зависят ни от формы частиц, ни от их объема или веса. Частицы с большим удельным весом получают меньшее ускорение, нежели частицы с меньшим удельным весом.

Таким образом, в аэростатическом поле воздушно-го потока, проходящего через слой сыпучего тела, происходит расслоение частиц лишь по одному признаку – удельному весу частиц, то есть так же, как и в жидкостях.

Из практики эксплуатации сепараторов известно, что проба, состоящая из частиц различной величины, по удельному весу почти не разделяется. Это объясняется тем, что воздушный поток, проходя через слой пробы с некоторой скоростью v , оказывает на частицы не только аэростатическое, но и аэродинамическое воздействие, в результате чего появляется аэродинамическая подъемная сила, действующая наряду с аэростатической силой на отдельные частицы.

Таким образом, общая подъемная сила P , действующая на отдельную частицу в слое сыпучего тела, складывается из аэростатической силы $P_{\text{ст}}$ и аэродинамической $P_{\text{дин}}$:

$$P = P_{\text{ст}} + P_{\text{дин}}. \quad (27)$$

Разделив обе части уравнения на массу частицы m и сделав некоторые преобразования, получим

$$J_{\text{дин}} = \frac{3}{4} k p v^2 \frac{1}{\gamma r}, \quad (28)$$

где r – средний радиус частицы, м.

Сравнив уравнение (28) с уравнением (26), видим, что в отличие от ускорения $J_{\text{ст}}$ ускорение $J_{\text{дин}}$ зависит от радиуса разделяемых частиц. Ускорение $J_{\text{дин}}$ оказывает влияние на качество разделения зерна согласно проведенным ранее полевым испытаниям, значительно ухудшая его. Чтобы нейтрализовать вредное аэродинамическое воздействие воздушного потока на частицы в слое пробы, их необходимо перемешивать перед засыпкой в сепаратор, а затем разделять по удельному весу в сепараторе.

Решение обозначенной проблемы достигается путем подбора оптимального воздушного потока, создаваемого вентилятором с регулятором оборотов, установленном в нижней части сепаратора и разделенного сетчатым дном. Новизна предложенного технического решения подтверждена патентом РФ на изобретение № 2752054 от 12.11.2020 г.

Выводы

1. В сепараторе при прохождении воздушного потока через слой сыпучей пробы внутри слоя образуется аэростатическое поле, обладающее весьма большим градиентом $\text{grad } p$ и способствующее разделению частиц с разным удельным весом независимо от их размеров, абсолютного веса или формы.

2. Наряду с аэростатическим воздействием воздушный поток оказывает и аэродинамическое воздействие на частицы. В процессе работы сепаратора аэродинамическое воздействие является побочным фактором, отрицательно влияющим на разделяемость зерна от примесей.

3. Оптимальным режимом работы сепаратора, при котором обеспечивается полное очищение зерносоматистой

смеси от примесей с выделением чистого зерна, необходимого для определения и подсчета потерь за комбайном, считается режим, при котором скорость воздушного

потока, проходящего через слой сыпучей пробы, является минимальной, а разность давлений воздуха на границах слоя полностью уравнивает слой зерна.

Библиографический список

1. Zhou L., Yuan Y., Zhang J., Niu K. Improving design of a PVDF grain loss sensor for combine harvester. *Computer and Computing Technologies in Agriculture XI. CCTA 2017. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2019; 546: 208-217. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06179-1_21
2. Wang Z., Che D., Bai X., Hu H. Improvement and Experiment of Cleaning Loss Rate Monitoring Device for Corn Combine Harvester | [玉米联合收获机清选损失监测装置设计与试验]. *Nongye Jixie Xuebao / Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018; 49(12): 100-108. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.012>
3. Šotnar M., Pospíšil J., Mareček J., Dokukilová T., Novotný V. Influence of the combine harvester parameter settings on harvest losses. *Acta Technologica Agriculturae*, 2018; 21(3): 105-108. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0019>
4. Tsarev Y., Adamcikova E., Najie M. Automatization of settings of working organs of technological process of combine harvester. *MATEC Web of Conferences*, 2018; 224: 05019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405019>
5. Zhang K., Shen H., Wang H., Xu X., Han T., Guo H. Automatic Monitoring System for Threshing and Cleaning of Combine Harvester. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018; 452(4): 042124. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/452/4/042124>
6. Li W., Wen J., Jiang Q., Song L., Zhang Z. Implementation of a fuzzy logic control strategy on a Harvester's controller based on MATLAB environment. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2019; 33(13): 1959043. <https://doi.org/10.1142/S0218001419590432>
7. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Intelligent support of grain harvester technological adjustment in the field. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019; 875: 236-245. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_25
8. Белик М.А., Таркинский В.Е., Трубицын Н.В. Мобильный сепаратор для экспресс-оценки потерь зерна зерноуборочными комбайнами // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса: Материалы XIII Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Донского государственного технического университета, в рамках XXIII Агропромышленного форума юга России и выставки «Интерагромаш», г. Ростов-на-Дону, 26-28 февраля 2020 г. Ростов-на-Дону: ООО «ДГТУ-ПРИНТ», 2020. Т. 1. С. 55-58. <https://doi.org/10.23947/interagro.2020.1.55-58>
9. Чаплыгин М.Е., Белик М.А., Тронеv С.В. Методы определения потерь зерна и их сравнительная оценка // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы IX Международной научно-практической конференции (ИнформАгро-2017), 7-9 июня 2017 г., Москва. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. С. 299-306.
10. Кузнецов В.В., Лебедев С.В. Обоснование конструктивно-технологических параметров сепаратора предварительной очистки зерна для хозяйств ЦЧР // Вестник Воронежского государственного аграрного университета, 2006. № 13. С. 102-112.

References

1. Zhou L., Yuan Y., Zhang J., Niu K. Improving design of a PVDF grain loss sensor for combine harvester. *Computer and Computing Technologies in Agriculture XI. CCTA 2017. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2019; 546: 208-217. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06179-1_21
2. Wang Z., Che D., Bai X., Hu H. Improvement and Experiment of Cleaning Loss Rate Monitoring Device for Corn Combine Harvester | [玉米联合收获机清选损失监测装置设计与试验]. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018; 49(12): 100-108. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.012>
3. Šotnar M., Pospíšil J., Mareček J., Dokukilová T., Novotný V. Influence of the combine harvester parameter settings on harvest losses. *Acta Technologica Agriculturae*, 2018; 21(3): 105-108. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0019>
4. Tsarev Y., Adamcikova E., Najie M. Automatization of settings of working organs of technological process of combine harvester. *MATEC Web of Conferences*, 2018; 224: 05019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405019>
5. Zhang K., Shen H., Wang H., Xu X., Han T., Guo H. Automatic monitoring system for threshing and cleaning of combine harvester. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018; 452(4): 042124. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/452/4/042124>
6. Li W., Wen J., Jiang Q., Song L., Zhang Z. Implementation of a fuzzy logic control strategy on a Harvester's controller based on MATLAB environment. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2019; 33(13): 1959043. <https://doi.org/10.1142/S0218001419590432>
7. Dimitrov V., Borisova L., Nurutdinova I. Intelligent support of grain harvester technological adjustment in the field. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019; 875: 236-245. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01821-4_25
8. Belik M.A., Tarkivsky V.E., Trubitsyn N.V. Mobil'nyy separator dlya ekspress-otsenki poter' zerna zernouborochnymi kombaynami [Mobile separator for express estimation of grain losses by combine harvesters]. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: Materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchenoy 90-letiyu Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, v ramkakh XXIII Agropromyshlennogo foruma yuga Rossii i vystavki "Interagromash", February 26-28, 2020, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: LLC "DSTU-PRINT", 2020; 1: 55-58. <https://doi.org/10.23947/interagro.2020.1.55-58> (In Rus.)*
9. Chaplygin M.E., Belik M.A., Tronev S.V. Metody opredeleniya poter' zerna i ikh sravnitel'naya otsenka [Methods for determining grain losses and their comparative evaluation]. *Nauchno-informatsionnoye obespechenie innovatsionnogo razvitiya APK: Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (InformAgro-2017), June 7-9, 2017. Moscow, FGBNU Rosinformaagrotekh*, 2017: 299-306. (In Rus.)
10. Kuznetsov V.V., Lebedev S.V. Obosnovaniye konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov separatora predvaritel'noy ochistki zerna dlya khozyaystv TSCHR [Justification of design and technological parameters of the separator for preliminary cleaning of grain for the farms of the Central Black Sea Region]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2006; 13: 102-112. (In Rus.)
11. Kuznetsov V.V., Lebedev S.V. Blochno-modul'nyy separator zerna [Block-modular grain separator]. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2008; 6: 10-12. (In Rus.)

11. Кузнецов В.В., Лебедев С.В. Блочно-модульный сепаратор зерна // Тракторы и сельхозмашины, 2008. № 6. С. 10-12.
12. Ямпиллов С.С., Цыбенков Ж.Б., Цыдыпов Ц.Ц. Компьютерный сепаратор для очистки зерна // Вестник ВСГУТУ, 2009. № 3. С. 20-23.
13. Теленгатор М.А. Обработка семян зерновых культур / М.А. Теленгатор, В.С. Уколов, В.М. Цециновский. М.: Колос, 1972. 271 с.
14. Кирпа Н.Я. Принципы и способы сепарирования зерновых масс // Хранение и переработка зерна, 2011. № 4(142). С. 33-36.
15. Кирпа М.Я., Скотар С.О. Повітряне сепарування насіння кукурудзи та методика визначення його параметрів // Селекція і насінництво, 2012. № 101. С. 239-246.

Критерии авторства

Тронеv С.В., Чаплыгин М.Е. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Тронеv С.В., Чаплыгин М.Е. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.07.2021

Одобрена после рецензирования 17.02.2022

Принята к публикации 18.02.2022

12. Yampilov S.S., Tsybenkov J.B. Tzydyrov, Ts.Ts. Komp'yuterniy separator dlya ochistki zerna [Computer separator for grain cleaning]. *Vestnik VSGUTU*, 2009; 3: 20-23. (In Rus.)
13. Telengator M.A. Obrabotka semyan zernovykh kul'tur [Seed treatment of grain crops]. M.A. Telengator, V.S. Ukolov, V.M. Tsetsinovsky. Moscow, Kolos, 1972. 271 p. (In Rus.)
14. Kirpa N.Ya. Printsipy i sposoby separirovaniya zernovykh mass [Principles and methods of the separation of grain masses]. *Khranenie i pererabotka zerna*, 2011; 4(142): 33-36. (In Rus.)
15. Kirpa M.Ya., Skotar S.O. Povitryane separuvannya nasinnya kukurudzi ta metodika viznachennya yogo parametriv [Air separation of maize seeds and methodology of its parameters' determination]. *Selektsiya i nasinnitstvo*, 2012; 101: 239-246. (In Ukr.)

Contribution

S.V. Tronev, M.E. Chaplygin performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. S.V. Tronev, M.E. Chaplygin 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 article was received 26.07.2021

Approved after reviewing 17.02.2022

Accepted for publication 18.02.2022