

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНОВОГО ПОТОКА В ГРАВИТАЦИОННОМ СЕПАРАТОРЕ

Владимир Павлович Шацкий, доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой высшей математики и теоретической механики

Владимир Иванович Оробинский, доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
зав. кафедрой сельскохозяйственных машин

Антон Евгеньевич Попов, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики
и теоретической механики

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Целью исследования является повышение эффективности очистки зерновых культур на вогнутых прутковых решетках комбинированного сепаратора за счет обоснования их рациональной геометрической формы, количества и расположения. Предметом данных исследований являются закономерности процесса очистки зернового вороха на криволинейных рабочих органах комбинированного сепаратора при различных технических и технологических параметрах работы зерноочистительной машины. Математическое моделирование движения элемента потока по криволинейной сепарирующей поверхности с учетом изменения его массы является основой теоретического исследования. Полученная математическая модель, учитывающая влияние данного фактора, позволяет определить рациональную форму вогнутого пруткового решета, по которой обрабатываемый материал будет двигаться с постоянной скоростью по всей длине сепарирующей поверхности. Использование предложенных очистительных элементов позволит улучшить качество очистки зернового вороха за счет центробежной силы и отсутствия забивания между прутками, которое наблюдается в устройствах аналогичного типа. По результатам теоретических исследований предложена принципиальная схема комбинированного сепаратора, в котором использованы криволинейные очистительные поверхности в виде прутковых решет, и описан принцип работы предложенного технического решения, внедрение которого позволит очистить зерновой ворох от легковетесных, крупных и мелких засорителей за один проход. На основании результатов теоретических исследований изготовлены опытные образцы прутковых решет и лабораторная установка для их реализации. Проведен ряд экспериментальных исследований, позволяющих определить рациональное количество и расположение рабочих органов различного типа. По результатам лабораторных испытаний сделаны практические рекомендации для производства комбинированного сепаратора с вогнутыми прутковыми решетками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: зерновой ворох, движение, очистка зерна, сепаратор, математическое моделирование.

The objective of this research was to increase the efficiency of cleaning grain crops on concave riddle sieves of a combined separator by means of justification of their reasonable geometric shape, number and arrangement. The subject of study included process patterns of cleaning bulk grain on curvilinear operative parts of a combined separator at various technical and technological operating parameters of grain-cleaning machine. The basis of theoretical research is mathematical simulation of motion of an element of the stream on curvilinear separating surface taking into account the changes in its weight. The obtained mathematical model that accounts for the influence of this factor allows determining the reasonable shape of a concave riddle sieve, on which the processed material will move at a constant speed along the whole length of the separating surface. The use of proposed cleaning elements will allow improving the quality of bulk grain cleaning due to the centrifugal force and absence of blinding between rods, which can be observed in devices of similar type. According to the results of theoretical research the authors propose a principle diagram of a combined separator that employs curvilinear cleaning surfaces in the form of riddle sieves and describe the principle of operation of the proposed technical solution. Implementation of this solution will allow clearing the bulk grain from lightweight, large and small impurities in one run. Based on the results of theoretical research the authors have constructed development prototypes of riddle sieves and a laboratory installation for their implementation. A number of experimental tests were performed allowing to define the reasonable number and arrangement of operating parts of various types. Results of laboratory studies were the basis for practical recommendations for producing a combined separator with concave riddle sieves.

KEY WORDS: bulk grain, motion, grain separation, separator, mathematical simulation.

Введение. Интенсификация процесса сепарации и получение качественного семенного материала невозможны без использования новых или модернизированных сельскохозяйственных машин, органов, узлов или их деталей.

Поэтому в последнее время в нашей стране и за рубежом ведутся работы по разработке и внедрению новых технологических процессов и технических средств, для реализации перспективных энерго- и ресурсосберегающих технологий производства семян сельскохозяйственных культур [4, 6].

Гравитационные машины, обладая рядом преимуществ (малые масса, габаритные размеры, установочная площадь, требуемый объем помещения, простота обслуживания, способность обрабатывать зерновой материал повышенной влажности, отсутствие вибрации, исключение травмирования семян), решают проблему эффективной подготовки зерна (семян) к сушке, хранению или последующей основной очистке [2, 5, 7].

Целью исследования является повышение эффективности очистки зерновых культур на вогнутых прутковых решетках комбинированного сепаратора за счет обоснования их рациональной геометрической формы, количества и расположения.

Предметом исследований являются закономерности процесса очистки зернового вороха на криволинейных рабочих органах комбинированного сепаратора при различных технических и технологических параметрах работы зерноочистительной машины.

В данной работе предлагается решение проблемы выбора формы криволинейной сепарирующей поверхности, дающей возможность улучшить процесс очистки зернового вороха за счет центробежной силы. Также описана практическая реализация полученных теоретических выводов.

Известен сепаратор сыпучих материалов (рис. 1 а, б), который содержит загрузочное приспособление 1, установленные зигзагообразно просеивающие устройства 2 и размещенные над ними отражатели – сплошные скатные доски 3, дефлекторы 4, а также патрубки вывода разделенных фракций – проходовой (мелкой) 5 и сходовой (крупной) 6 [3].

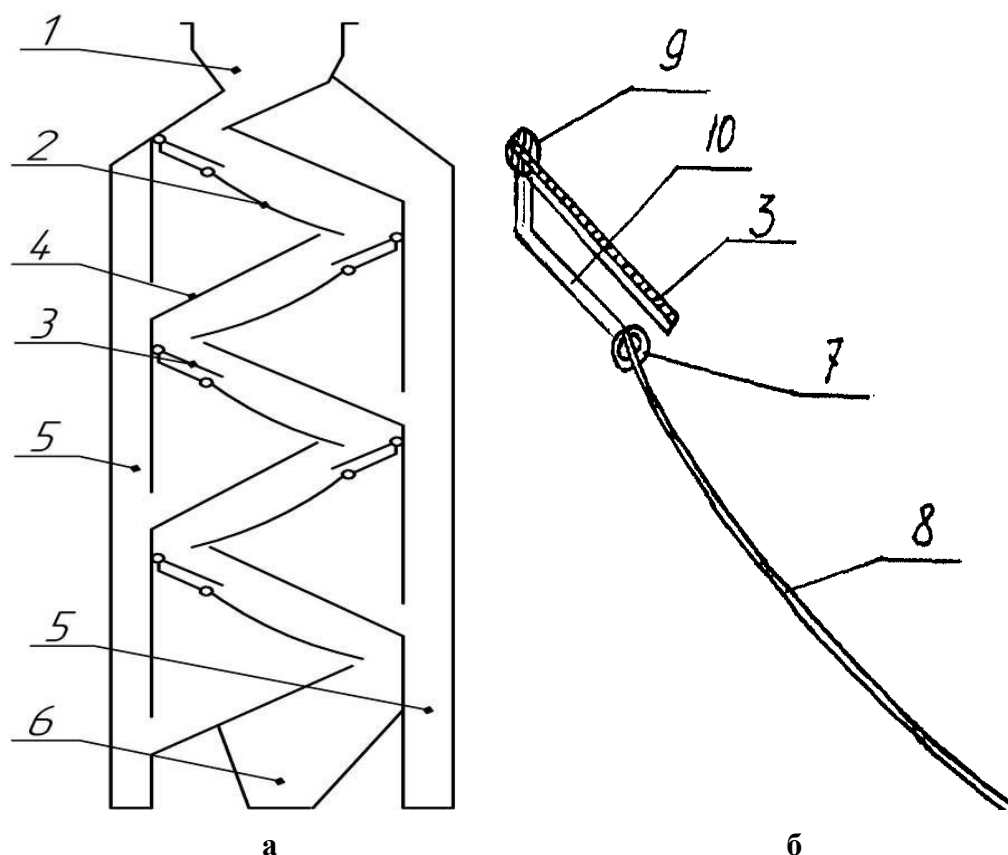


Рис. 1. Сепаратор сыпучих материалов:
 1 – загрузочное приспособление; 2 – просеивающие устройства; 3 – скатные доски;
 4 – дефлекторы; 5 и 6 – патрубки вывода проходовой и сходовой фракций; 7 – коллекторы;
 8 – пальцы; 9 – валики; 10 – кронштейны

Просеивающие устройства 2 выполнены в виде гребенок, представляющих собой консольно закрепленные на коллекторе 7 пальцы 8 вогнутой формы и расположенные над ними отражатели – сплошные скатные доски 3, которые консольно установлены в валики 9, и они с помощью кронштейнов 10 закреплены на коллекторах 7. Для поворота гребенок под определенным углом к горизонту, при переходе на обработку другой зерновой культуры, просеивающие устройства снабжены механизмом поворота.

Работа сепаратора осуществляется следующим образом. Исходный зерновой материал, подаваемый в загрузочное приспособление 1, под действием гравитационных сил движется вниз и попадает на отражатель – сплошную скатную доску 3. Частицы зернового материала скатываются по отражателю – сплошной скатной доске 3. По мере движения по отражателю – сплошной скатной доске 3 частицы перераспределяются в слое зернового материала, ориентируются длинной осью в сторону движения за счет углублений в отражателе и подаются на первое просеивающее устройство 2 (гребенку). В результате движения со скатной доски 3 и движения материала по гребенке 2 часть проходовой фракции выделяется и попадает на дефлектор 4, сходит по нему в патрубок 5 вывода проходовой фракции из сепаратора, а остальная часть материала под действием гравитационных сил сходит по гребенке 2 на вторую противоположно установленную скатную доску 3. Процесс разделения продолжается при попадании зернового материала со скатной доски 3 на вторую гребенку 2 аналогично первой, затем на третью скатную доску 3 и гребенку 2 и так далее до последней. Сходовая фракция выводится из сепаратора патрубком 6.

Следует отметить, что в данном сепараторе не решены следующие проблемы: сохранение заданного расстояния между прутками, забиваемость решет, а также теоретическое обоснование формы сепарирующих поверхностей.

Авторами предложена конструкция комбинированного сепаратора (рис. 2), состоящего из корпуса 1, бункера 2, питающего зернопровода 3, вентилятора 4, камеры воздушной сепарации 5, осадочной камеры 6, рабочих органов с клиновидными отверстиями 7, прутковых рабочих органов 8, 9, скатных поверхностей 10, 11, материалоприемников различных фракций 13, 14, 15 [9].

Сепаратор работает следующим образом. Исходный ворох из бункера 2 поступает в питающий зернопровод 3, под действием гравитационных сил движется вниз и попадает в камеру воздушной сепарации 5. В ней из вороха нагнетательным воздушным потоком, создаваемым вентилятором 4, уносятся в осадочную камеру 6 легковесные компоненты.

Далее ворох попадает на рабочие органы с клиновидными отверстиями 4. При движении по ним основная часть зернового материала вместе с мелкими примесями просыпается вниз и попадает на скатную поверхность 10. Крупные примеси продолжают свое движение по каскаду решет и попадают в материалоприемник для крупной фракции.

В результате движения по вогнутым рабочим органам очищаемый материал, за счет центробежной силы, сильнее прижимается к поверхности, при этом повышается интенсивность просеивания. Проходовая фракция просеивается через калибрующие каналы и при помощи скатных поверхностей 11 и каналов 12 и 17 выводится из сепаратора. Сходовая фракция самотеком поступает в бункер для очищенного материала.

Несомненным преимуществом является блочная схема конструкции сепаратора. Каждый блок сформирован из набора решет с одинаковыми параметрами. При необходимости можно менять блоки местами или добавлять дополнительные блоки для увеличения полноты выделения определенных фракций.

Для сепарации ограничивающим фактором является недопущение существенного увеличения скорости движения зернового потока, что может привести к ухудшению качества очистки. С другой стороны, чрезмерное уменьшение скорости очищаемого вороха может привести к завалам. В связи с этим встает задача выбора формы кривой, образующей поверхность, по которой элементы потока будут двигаться с одинаковой скоростью на каждом из решет. Отметим также, что при очистке происходит изменение массы обрабатываемого материала, которое необходимо учитывать.

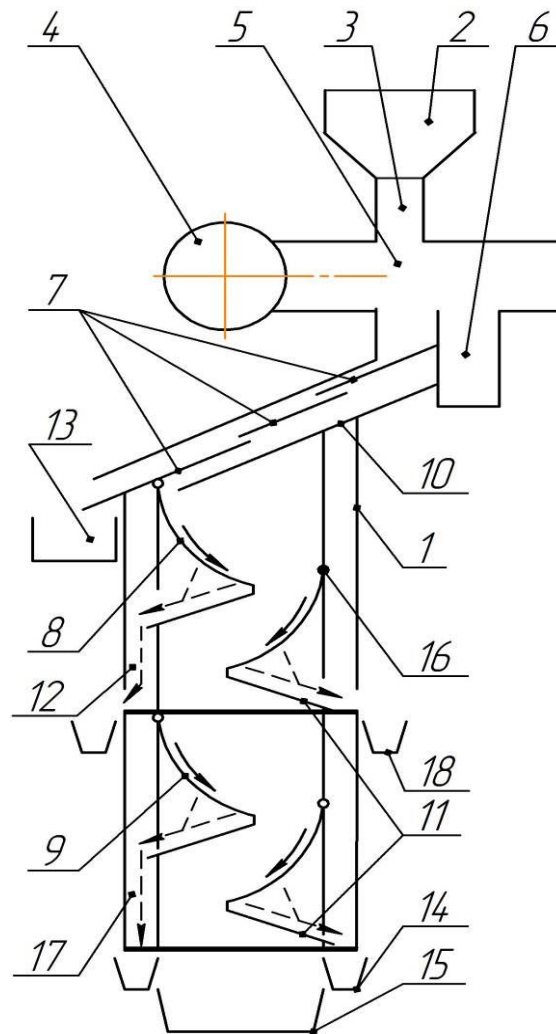


Рис. 2. Принципиальная схема комбинированного сепаратора:
 1 – корпус; 2 – загрузочный бункер; 3 – питающий зернопровод; 4 – вентилятор;
 5 – камера воздушной сепарации; 6 – осадочная камера; 7 – рабочие органы с клиновидными отверстиями; 8, 9 – рабочие органы пруткового типа;
 10, 11 – скатные поверхности; 12, 17 – каналы для вывода проходовой фракции;
 13, 14, 15, 18 – материалоприемники; 16 – шарнирный механизм

Задача выбора формы поверхности направляющей заключается в следующем: зная координаты начальной и конечной точек, зная начальную скорость, определить вид кривой, чтобы элементы потока двигались по ней с постоянной скоростью. Отметим, что на форму кривой, кроме перечисленных выше начальной и конечной точек и начальной скорости, влияет также коэффициент сепарации μ . Частному случаю решения подобной задачи посвящена работа одного из авторов [1].

Рассмотрим в плоской системе координат две точки с координатами $A(x_0; y_0)$ и $B(x_k; y_k)$. Нам необходимо определить кривую, по которой частица будет спускаться от точки А к точке В (рис. 3).

Так как в процессе сепарации масса потока уменьшается, закон движения элемента массы в направлении касательной, обозначенной на рисунке 3 как ось τ , имеет вид

$$\frac{d(mv)}{dt} = mg \sin \alpha - F_{тр}, \quad (1)$$

где m – масса, кг;
 v – скорость, м/с.

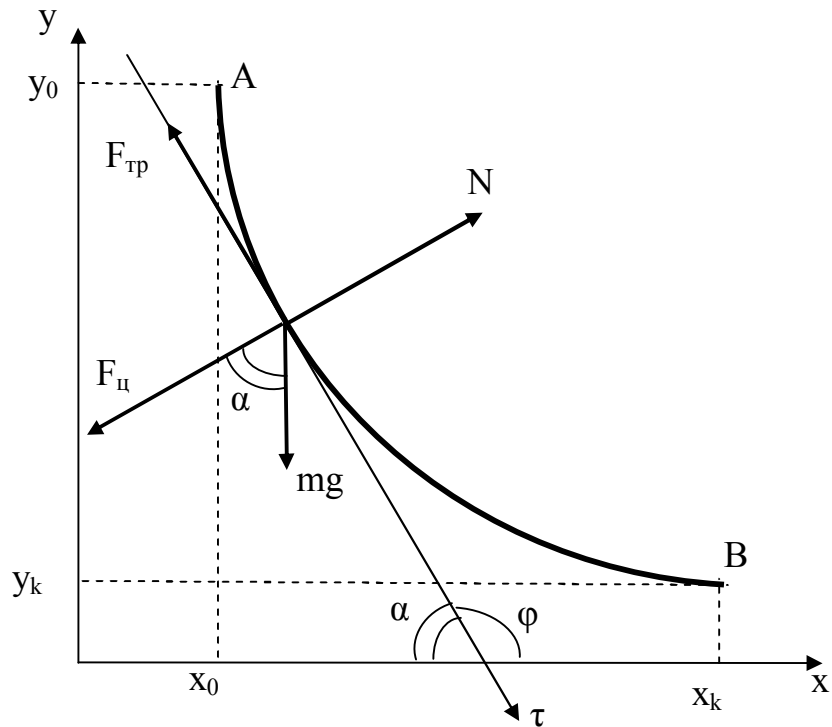


Рис. 3. Схема сил, действующих на элемент массы при движении по кривой

Сила трения равняется $F_{\text{тр}} = kN$.

Здесь k – коэффициент трения, N – нормальная реакция

$$N = \frac{mv^2}{\rho} + mg \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

где $\frac{mv^2}{\rho}$ – центробежная сила, Н;

ρ – радиус кривизны траектории, м.

Таким образом, уравнение (1) примет вид

$$\frac{d(mv)}{dt} = mg \sin \alpha - \frac{mkv^2}{\rho} - mk \cdot g \cos \alpha,$$

или

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \alpha - \frac{mkv^2}{\rho} - mk \cdot g \cos \alpha - v \frac{dm}{dt}. \quad (2)$$

Масса элемента вороха при сепарации может быть определена по формуле

$$m = M \cdot e^{-\mu L(x)},$$

где μ – коэффициент сепарации, м^{-1} ;

M – исходная масса, кг;

$L(x)$ – длина пройденной сепарирующей поверхности.

С учетом этого

$$\frac{dm}{dt} = -M\mu e^{-\mu L(x)} \frac{dL}{dt} = -M\mu e^{-\mu L(x)} \frac{dL}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = -m\mu \frac{dL}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}.$$

После сокращения на m уравнение (2) представляется в следующем виде:

$$\frac{dv}{dt} = g \sin \alpha - \frac{kv^2}{\rho} - k \cdot g \cos \alpha + v\mu \frac{dL}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}. \quad (3)$$

Используя известные формулы длины дуги $L(x)$ и производной интеграла по верхнему пределу, получаем

$$\frac{dv}{dt} = g \sin \alpha - \frac{kv^2}{\rho} - k \cdot g \cos \alpha + v\mu \sqrt{1 + y_x'^2} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (4)$$

где $v = \left(\frac{dx}{dt} \right) \cdot \sqrt{1 + y_x'^2}$.

Учитывая последние соотношения, уравнение (4) принимает вид

$$\frac{dv}{dt} = g \sin \alpha - \frac{kv^2}{\rho} - k \cdot g \cos \alpha + v^2\mu. \quad (5)$$

Для достижения постоянной скорости элемента зернового вороха по криволинейной поверхности на всем участке пути должно выполняться равенство $\frac{dv}{dt} = 0$, что приводит уравнение (5) к виду

$$g \sin \alpha - \frac{kv^2}{\rho} - k \cdot g \cos \alpha + v^2\mu = 0. \quad (6)$$

Используя известные представления $\sin \alpha$, $\cos \alpha$ и ρ через производные искомой функции, получаем

$$y'' = -\frac{g}{v^2} \left(1 + \frac{y'}{k} \right) (1 + y'^2) + \frac{\mu}{k} (1 + y'^2)^{3/2}. \quad (7)$$

Граничными условиями будут

$$y(x_0) = y_0, \quad y(x_k) = y_k. \quad (8)$$

Получаем граничную задачу, позволяющую определить форму поверхности, по которой элемент зернового вороха будет двигаться с постоянной скоростью.

Численная реализация данной математической модели позволила определить рациональную форму криволинейной сепарирующей поверхности. Как было показано в работе авторов [8], форма этой поверхности существенно зависит от граничных условий, начальной скорости и характеристик обрабатываемого материала и может с достаточной степенью точности быть аппроксимирована полиномом четвертого порядка.

По данным параметрам были изготовлены опытные образцы решет в виде параллельно сформированных прутков, имеющие различное расстояние между ними (рис. 4).

Прутки для обеспечения параллельности по всей длине имеют крепление в 4 точках, два по краям и два промежуточных. Каждый из прутков крепится к металлическому основанию, причем ширина каждого усика L , данного основания, меньше диаметра прутка d , а его высота h больше расстояния между прутками l . Это сделано для исключения очагов забивания в местах крепления.

Производство опытных образцов криволинейных решет состояло из следующих этапов. Из сталистой проволоки были изготовлены отдельные прутки, а из листовой стали основания для их крепления. Крепление прутков к основанию осуществлялось с помощью точечной сварки на аппарате Telwin DigitalModular 400.

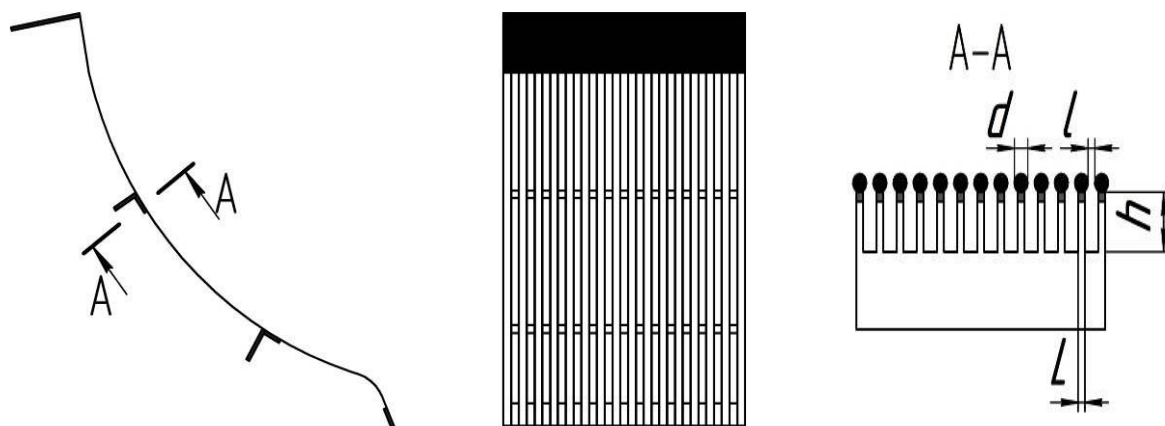


Рис. 4. Схема прутковых решет

Далее была изготовлена лабораторная установка (рис. 5), на которой были проведены эксперименты для определения рациональных параметров предлагаемого устройства.

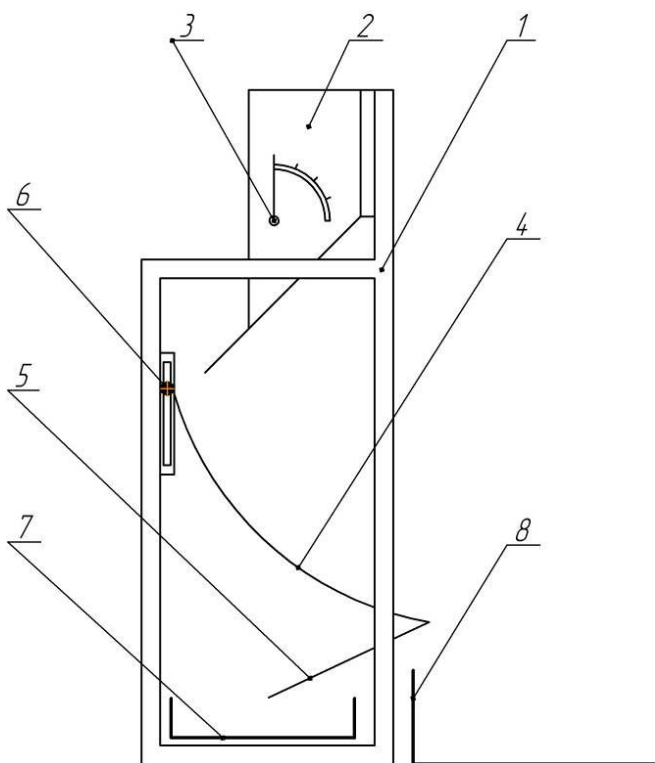


Рис. 5. Схема лабораторной установки:

1 – рама; 2 – бункер; 3 – дозирующее устройство; 4 – сменный рабочий орган;
5 – скатная поверхность; 6 – шарнирное крепление рабочего органа; 7, 8 – семясборники

Рациональное количество рабочих органов определяли следующим образом. Устанавливали один из вариантов решета, засыпали в бункер определенное количество исходного вороха и открывали заслонку. После первого прохода получали две фракции (сход и проход). Далее сходовую фракцию снова засыпали в бункер и повторяли вышеописанные действия. После каждого прохода определяли массу и состав сходовой и проходовой фракций.

Рациональное положение рабочих органов определяли по пропускной способности и отсутствию забивания рабочего органа. Устанавливали рабочий орган и с помощью шарнирного крепления и скатной доски регулировали положение нижнего края решета.

На раме крепили линейку, с помощью которой измеряли изменение положения окончания рабочего органа относительно низа рамы. За нулевую отметку принимали низ рамы (пол). Оценку качества проводили визуально. Шаг изменения высоты принимали равным 1 см.

Результаты

В результате проведенных опытов были получены следующие данные:

- длина рабочей поверхности – 0,4 м;
- ширина калибрующего канала 1,8 мм для выделения мелких засорителей и 2,4 мм для выделения фуражной фракции;
- начальная скорость – 2-2,5 м/с;
- удельная подача – 7 т/ч;
- количество решет – 2;
- угол установки к горизонту – 30°.

Список литературы

1. Баранов Ю.Н. Оптимизация направляющей поверхности питателя разбрасывателя удобрений / Ю.Н. Баранов, В.П. Шацкий, А.А. Тычинин // *Техника в сельском хозяйстве*. – 2012. – № 4. – С. 10–12.
2. Косилов Н.И. Пути совершенствования технологий и технических средств для предварительной очистки зерна в хозяйствах: рекомендации в помощь специалистам сельского хозяйства / Н.И. Косилов // ЧИМЕСХ. – Челябинск, 1985. – 52 с.
3. Пат. 2148439 Российская Федерация, МПК⁷ В07В 1/04. Сепаратор сыпучих материалов / С.С. Ямпиллов, А.Н. Зюлин, Ю.Ж. Дондоков, Д.В. Подкорытов; заявитель и патентообладатель : Восточно-Сибирский государственный технологический университет. – № 98114358/03 ; заявл. 28.07.1998; опубл. 10.05.2000, Бюл. № 13. – 6 с.
4. Перспективные типы центробежных и гравитационных сепараторов / Н.Е. Авдеев, А.В. Некрасов, С.Б. Резуев, Ю.В. Чернухин. – Воронеж : Воронежский государственный университет, 2005. – 637 с.
5. Попов А.Е. К вопросу об экспериментальном обосновании технических и технологических параметров комбинированного сепаратора / А.Е. Попов // *Инновационные технологии и технические средства для АПК : материалы Всероссийской науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, посвященной 100-летию Воронежского гос. аграр. ун-та им. императора Петра I*. – Ч. IV. – Воронеж : ФГБОУ ВПО ВГАУ. – 2011. – С. 116–121.
6. Тарасенко А.П. Снижение травмирования семян при уборке и послеуборочной обработке / А.П. Тарасенко. – Воронеж : ФГОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2003. – 331 с.
7. Федоренко В.Ф. Зерноочистка – состояние и перспективы / В.Ф. Федоренко, Е.Л. Ревякин. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2006. – 203 с.
8. Шацкий В.П. К вопросу выбора формы криволинейных сепарирующих поверхностей / В.П. Шацкий, А.Е. Попов, Н.Г. Спирина // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. – 2013. – Вып. 4 (39). – С. 77–84.
9. Шацкий В.П. О выборе криволинейных поверхностей при движении сыпучих материалов. / В.П. Шацкий, А.Е. Попов, Н. Г. Спирина // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Современные проблемы анализа динамических систем. Приложения в технике и технологиях : сб. науч. тр. по материалам международной науч.-практ. конф.* – Воронеж : Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2014. – № 4. – Ч. 2 (9-2). – С. 159–162.