



## СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММ «КОМПАС ГРАФИК» И EXCEL ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЁТА ЗЕРНОВКИ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

В.А. Николаев

д.т.н., доцент кафедры механизации сельскохозяйственного производства ФГБОУ ВПО «Ярославская ГСХА»

*Зерновка, параметры полёта, поток воздуха, зерноуборочные комбайны, сортировальные машины, проектирование технических средств*

*Corn seed, flight parameters, an air flow, combine harvesters, sorting machine, designing of means*

Следует выделить два приёма теоретических исследований, направленных на совершенствование сельскохозяйственных машин, которые связаны с изучением взаимодействия рабочих органов либо с массивом материала, либо с отдельными частицами обрабатываемого материала. Ни одному из этих приёмов нельзя отдать предпочтение. Необходимость применения того или иного приёма обусловлена свойствами обрабатываемого материала и другими факторами. Для исследования взаимодействия рабочих органов с некоторыми материалами наилучший результат даёт сочетание обоих приёмов.

Для проектирования зерноуборочных комбайнов, сушильных и сортировальных технических средств необходимо знать конкретные параметры полёта зерна в потоке воздуха. Дифференциальные уравнения, описывающие перемещение частиц в потоке воздуха [1], имеют ограниченное практическое применение. К сожалению, исследователи [2, 3, 4] пользуются, преимущественно, первым приёмом, рассматривая перемещение массива зерна. Это было обусловлено трудоёмкостью второго приёма. Однако, по мере распространения компьютерных программ «Компас график» и Excel, трудоёмкость определения параметров полёта отдельной зерновки в потоке воздуха существенно уменьшилась. Для определения параметров полёта отдельной зерновки в потоке воздуха предлагаю следующую методику.

1. Принять исходные данные:

- угол  $\alpha$  отклонения направления потока воздуха от горизонтали;
- скорость  $v_B$  потока воздуха;
- коэффициент  $k$  сопротивления среды;
- плотность воздуха  $\rho$ ;
- средние размеры и форма зерновки;
- масса зерновки, положение её центра масс;
- начальное положение зерновки (положение 0);
- начальная скорость зерновки.

2. Принять допущения:

- сложное движение зерновки заменим поступательным перемещением и вращательным движением вокруг центра масс;
- сложное вращательное движение разложим на вращения относительно продольной и поперечной оси зерновки, проходящие через её центр масс;

- за основное примем вращение зерновки относительно продольной оси, шаг вычислений соответствует повороту зерновки на  $15^\circ$ ;

- в пределах шага вычислений ускорение и угловое ускорение зерновки постоянные;

- коэффициент  $k$  сопротивления среды постоянный, не зависит от положения зерновки.

3. Подготовить в программе Excel две таблицы, в которые включить реестр определяемых параметров.

Рассмотрим поворот зерновки относительно продольной оси из начального положения (начальная скорость зерновки, в положении 0, равна нулю).

4. Определить силу тяжести зерновки:

$$G = gm, \quad (1)$$

где  $m$  – масса зерновки.

Вычислить момент инерции зерновки относительно продольной оси:

$$I_3 = \frac{mr^2}{2}, \quad (2)$$

где  $r$  – радиус инерции зерновки относительно её продольной оси, который можно принять равным среднему арифметическому ширины и толщины зерновки.

5. Начертить в программе «Компас график» поперечное сечение зерновки в начальном положении. Приложить к центру масс зерновки объёмную силу  $G$  тяжести (рис. 1).

6. Определить силу воздействия на зерновку потока воздуха:

$$R_0 = k\rho S_0 v_B^2, \quad (3)$$

где  $S_0$  – площадь проекции зерновки на плоскость, перпендикулярную направлению потока воздуха в положении 0.  $S_0 = b_0 l_0$ , где  $b_0$  – поперечный размер поперечного сечения зерновки по отношению к направлению воздушного потока;  $l_0$  – поперечный размер продольного сечения зерновки по отношению к направлению воздушного потока (рис. 2).

7. Вычислить давление  $p_v$  потока воздуха на зерновку:

$$p_v = \frac{R_0}{S_0}. \quad (4)$$

8. Построить эпюру давления потока воздуха на зерновку (см. рис. 1), отложив от точек В и С касательные векторы  $p_v$ , и скопировав в промежутке между точками D и H часть контура сечения зерновки между точками В и С, обращённую к потоку агента сушки. Нанести точку L, в которой вектор давления потока воздуха перпендикулярен поверхности зерновки и приложить к ней вектор  $p_v$  (EL).

9. Давление потока воздуха на верхнюю часть зерновки вычислить пропорционально площади  $BDEL = S_B$  верхней части эпюры распределённой нагрузки  $p_v$ , а на нижнюю часть зерновки – пропорционально площади  $LEHC = S_H$  эпюры распределённой нагрузки  $p_v$ . Определить площади  $S_B$  и  $S_H$  соответственно верхней и нижней частей эпюры распределённой нагрузки.

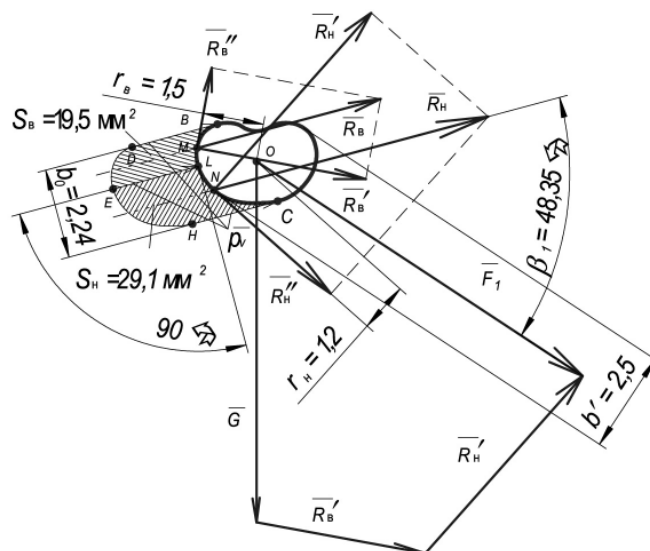


Рисунок 1 – Построения для определения параметров полёта зерновки в потоке воздуха из начального положения; поворот относительно продольной оси

10. Поверхностные сосредоточенные силы, действующие на верхнюю и нижнюю части зерновки, определить из пропорций:

$$R_B = \frac{R_0 \cdot S_B}{S_B + S_H}; R_H = \frac{R_0 \cdot S_H}{S_B + S_H}. \quad (5)$$

11. Разделить пополам расстояние между DB и EL, провести прямые, параллельные векторам  $p_v$ , и на пересечении этих прямых с контуром зерновки обозначить точку М центра давления потока воздуха на верхнюю часть зерновки. Расстояние между HC и EL также разделить пополам и определить точку N центра давления агента сушки на нижнюю часть зерновки. Приложить силы  $R_B$  и  $R_H$  к точкам М и N поверхности зерновки.

12. Провести касательные к контуру зерновки в точках М и N. Определить плечи  $r_B$ ,  $r_H$  касательных сил.

13. Разложить силы  $R_B$  и  $R_H$  на нормальные  $R'_B$ ,  $R'_H$  и касательные  $R''_B$ ,  $R''_H$  составляющие и определить их из построения.

14. Сложив вектор силы  $G$  тяжести зерновки и нормальные составляющие  $R'_B$ ,  $R'_H$  воздействия потока воздуха на верхнюю и нижнюю её части, из построения определить результирующую силу  $F_1$ , действующую на зерновку при её перемещении из положения 0 в положение 1. Определить угол  $\beta_1$  между силой  $F_1$  и направлением потока воздуха.

15. Вычислить ускорение зерновки:

$$a_1 = \frac{F_1}{m} \quad (6)$$

16. Определить вращающий момент:

$$M_1 = R''_B r_B - R''_H r_H. \quad (7)$$

Знак минус означает направление действия вращательного момента на зерновку против часовой стрелки, плюс – по часовой стрелке.

17. Определить угловое ускорение зерновки:

$$\varepsilon_1 = \frac{M_1}{I_3}. \quad (8)$$

18. Вычислить время поворота зерновки из положения 0 в положение 1 по формуле:

$$\tau_{0-1} = \sqrt{\frac{2\alpha_{0-1}}{\varepsilon_1}}, \quad (9)$$

где  $\alpha_{0-1} = 15^\circ \approx 0,26 \text{ рад}$  – угол поворота зерновки относительно продольной оси из положения 0 в положение 1; если поворот против часовой стрелки, то  $\alpha_{0-1} = -0,26 \text{ рад}$ .

19. За это время зерновка приобретёт угловую скорость:

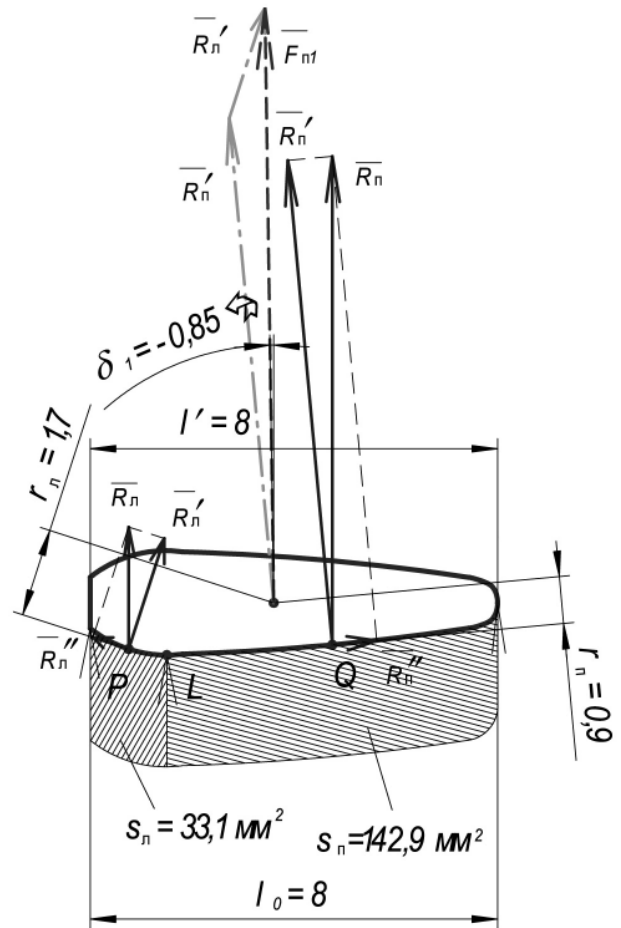


Рисунок 2 – Построения для определения параметров полёта зерновки в потоке воздуха из начального положения; поворот относительно поперечной оси

$$\omega_1 = \varepsilon_1 \tau_{0-1}. \quad (10)$$

20. Расстояние, на которое переместится зерновка:

$$s_{0-1} = v_0 \tau_{0-1} + \frac{a_1 \tau_{0-1}^2}{2}. \quad (11)$$

Так как начальная скорость зерновки  $v_0$  равна нулю, то:

$$s_{0-1} = \frac{a_1 \tau_{1-2}^2}{2}. \quad (12)$$

В остальных положениях следует пользоваться формулой 11.

21. Скорость зерновки в положении 1:

$$v_1 = a_1 \tau_{0-1}. \quad (13)$$

Рассмотрим поворот зерновки относительно поперечной оси.

22. Начертить продольное сечение зерновки (см. рис. 2).

23. Определить момент инерции зерновки относительно поперечной оси, проходящей через центр масс:

$$I_{зп} = \frac{1}{3} ml^2, \quad (14)$$

где  $l$  – длина зерновки.

24. Построить эпюру давления потока воздуха на зерновку аналогично построению в п. 8. Определить площади  $S_{л}$  и  $S_{п}$  левой и правой части эпюры.

25. Поверхностные сосредоточенные силы воздействия потока воздуха на левую и правую части зерновки определить из пропорций:

$$R_{л} = \frac{R_0 \cdot S_{л}}{S_{л} + S_{п}}; R_{п} = \frac{R_0 \cdot S_{п}}{S_{л} + S_{п}}. \quad (15)$$

26. Аналогично построениям п. 11 обозначить точки P и Q на контуре зерновки и приложить к ним соответственно силы  $R_{л}$  и  $R_{п}$ .

27. Провести касательные к контуру зерновки в точках P и Q. Определить плечи  $r_{лв}$   $r_{пв}$  касательных сил.

28. Разложить силы  $R_{л}$  и  $R_{п}$  на нормальные  $R'_{лв}$   $R'_{пв}$  и касательные  $R''_{лв}$   $R''_{пв}$  составляющие и определить их из построения.

29. Определить вращающий момент относительно поперечной оси:

$$M_{п1} = R''_{лв} r_{лв} - R''_{пв} r_{пв}. \quad (16)$$

Знак минус означает направление действия вращательного момента на зерновку против часовой стрелки, плюс – по часовой стрелке.

30. Вычислить угловое ускорение зерновки:

$$\varepsilon_{п1} = \frac{M_{п1}}{I_{зп}}. \quad (17)$$

31. Определить угловую скорость зерновки относительно поперечной оси в положении 1:

$$\omega_{п1} = \varepsilon_{п1} \tau_{0-1}. \quad (18)$$

32. Вычислить угол поворота зерновки относительно поперечной оси:

$$\gamma_{п0-1} = \gamma_{п0} + \omega_{п0} \tau_{0-1} + \frac{\varepsilon_{п1} \tau_{0-1}^2}{2}. \quad (19)$$

Так как начальный угол поворота вокруг поперечной оси  $\alpha_{п0} = 0$ , начальная угловая скорость зерновки вокруг поперечной оси  $\omega_{п0} = 0$ , поэтому:

$$\gamma_{п0-1} = \frac{\varepsilon_{п1} \tau_{0-1}^2}{2}. \quad (20)$$

В остальных положениях следует пользоваться формулой 19.

33. Привести силу  $R'_{л}$  к центру масс зерновки, сложить её с силой  $R'_{п}$ , определить направление равнодействующей  $F_{п1}$  и угол  $\delta_1$  её отклонения от направления потока воздуха.

Рассмотрим поворот зерновки относительно продольной оси из положения 1 в следующие положения.

34. Из предыдущего построения (см. рис. 2) определить проекцию  $l_i$  длины зерновки на плоскость, перпендикулярную направлению потока воздуха, и проекцию  $l'_i$  длины зерновки на плоскость, перпендикулярную направлению перемещения зерновки.

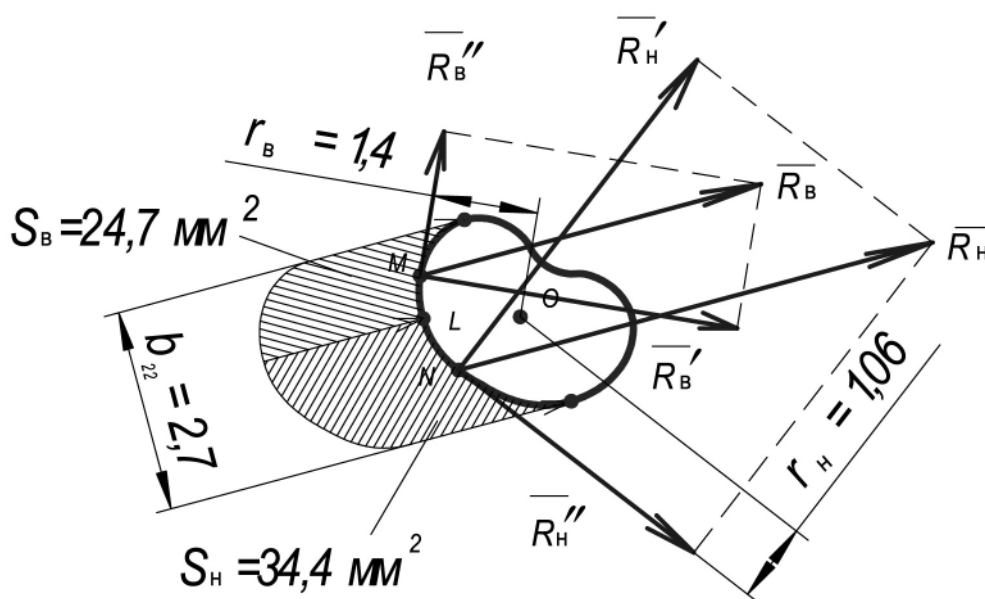


Рисунок 3 – Построения для определения сил воздействия на зерновку потока воздуха

35. Выполнить п. 6 с учётом изменения проекции  $l_i$ :

$$R_i = k\rho S_i v_B^2, \quad (21)$$

где  $S_i = l_i b_i$ ;  $b_i$  – поперечный размер поперечного сечения зерновки по отношению к направлению воздушного потока в  $i$ -положении (рис. 3).

36. Выполнить п. 7...13, не нанося на чертёж силу тяжести  $G$ .

При этом целесообразно предварительно начертить проекции зерновки во всех положениях, согласно принятому шагу вычислений  $15^\circ$ .

37. Скопировать контур зерновки, эпюру давления и нормальные составляющие на новый чертёж, добавив на него силу тяжести  $G$  (рис. 4).

38. Скопировать на этот чертёж силу  $F_i$  с чертежа предыдущего положения, например, приложения А. Эта сила на чертеже будет силой  $F_{ji}$  инерции зерновки.

39. Проведя касательные к контуру зерновки, параллельные силе  $F_{ji}$ , определить проекцию  $b'_i$  ширины зерновки на направление её перемещения в среде. Вычислить площадь сечения зернов-

ки, перпендикулярную направлению её перемещения:

$$S_{ci} = b'_i l'_i. \quad (22)$$

40. Определить силу сопротивления среды перемещению зерновки:

$$P_i = k\rho S_{ci} v_i^2, \quad (23)$$

где скорость  $v_i$  следует взять из расчёта в предыдущем положении.

Если сопротивление среды  $P_i$  отличается от силы воздействия потока воздуха  $R_i$  более чем на два порядка, то силой  $P_i$  можно пренебречь и п. 41...43 не выполнять.

41. По формуле:

$$p_i = \frac{P_i}{S_{ci}} \quad (24)$$

вычислить распределённую нагрузку, обусловленную сопротивлением среды.

42. Построить эпюру сопротивления среды перемещению зерновки по методике, изложенной в п. 8. Определить площади левой и правой частей эпюры аналогично п. 9 (см. рис. 4).

43. На основе этой эпюры выполнить построения и расчёты, аналогично п. 10...13, определив

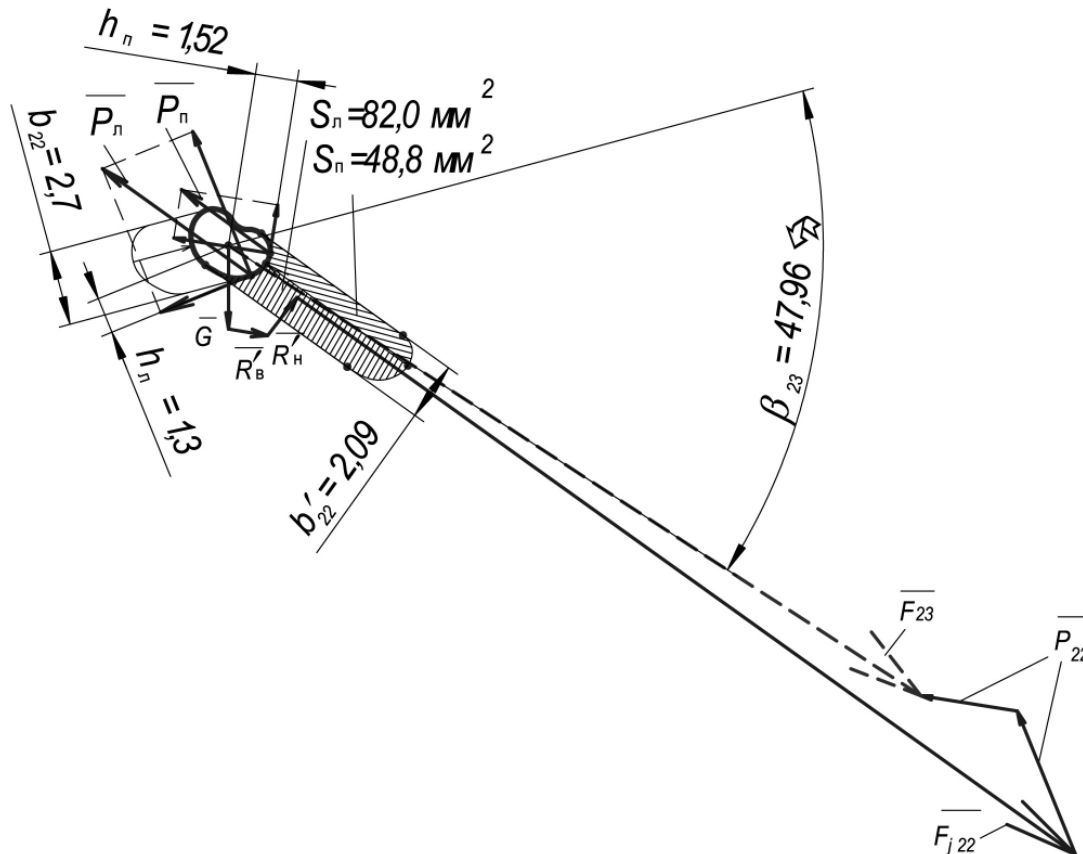


Рисунок 4 – Построения для определения параметров полёта зерновки в потоке воздуха из следующих положений; поворот относительно продольной оси

нормальные  $P'_{л}, P'_{п}$  и касательные  $P''_{л}, P''_{п}$  составляющие сопротивления среды и плечи  $h'_{л}, h'_{п}$  касательных сил.

44. Сложив вектор силы  $G$  тяжести зерновки, нормальные составляющие  $R'_{в}, R'_{н}$  воздействия потока воздуха на верхнюю и нижнюю её части, нормальные составляющие  $P'_{л}, P'_{п}$  сопротивления среды из построения, определить результирующую силу  $F_{i+1}$ , действующую на зерновку при её перемещении в следующее положение.

45. Определить угол  $\beta_{i+1}$  между силой  $F_{i+1}$  и направлением потока воздуха.

46. Выполнить п. 15 и 16, вычислив ускорение зерновки и вращающий момент  $M_R$ , создаваемый потоком воздуха.

47. По формуле:

$$M_P = P''_{л} h'_{л} - P''_{п} h'_{п} \quad (25)$$

вычислить вращающий момент, создаваемый сопротивлением среды.

48. По формуле:

$$M_{\Sigma} = M_R + M_P \quad (26)$$

вычислить суммарный вращающий момент, воздействующий на зерновку и угловое ускорение зерновки, аналогично п. 17.

49. Вычислить время поворота зерновки из  $i$ -положения в  $(i+1)$ -положение по формуле:

$$\tau_{i-(i+1)} = \frac{-\omega_i \pm \sqrt{\omega_i^2 + 2 \varepsilon_{(i+1)} \alpha_{i-(i+1)}}}{\varepsilon_{(i+1)}}, \quad (27)$$

где  $\omega_i$  – угловая скорость зерновки относительно продольной оси в  $i$ -положении;  $\varepsilon_{(i+1)}$  – угловое ускорение зерновки при её перемещении из  $i$ -положения в  $(i+1)$ -положение;  $\alpha_{i-(i+1)}$  – угол поворота зерновки относительно продольной оси при перемещении из  $i$ -положения в  $(i+1)$ -положение.

В тех случаях, в которых зерновка изменяет направление вращения, подкоренное выражение будет отрицательным, а угол поворота зерновки до изменения направления вращательного движения менее 0,26 радиана. Обозначим это положение зерновки  $j$ -положением. В момент окончания поворота  $\omega_j = 0$ . Тогда время:

$$\tau_{i-j} = -\frac{\omega}{\varepsilon_j}. \quad (28)$$

Угол поворота зерновки вокруг продольной оси за это время:

$$\alpha_{i-j} = \omega_i \tau_{i-j} + \frac{\varepsilon_j \tau_{i-j}^2}{2}. \quad (29)$$

50. Выполнить п. 19...21, в том числе рассчитать общий путь зерновки:

$$S_{0-i} = S_{0-(i-1)} + S_{(i-1)-i}. \quad (30)$$

Действия от п. 22 до п. 50 выполнять до получения параметров перемещения зерновки, достаточных для достижения цели исследования.

### Вывод

Определив перечисленные параметры, можно построить их графические зависимости от времени, вычислить энергию, необходимую для движения зерновки до любого положения, мощность, затрачиваемую на это движение, к.п.д. потока воздуха, исходя из мощности вентилятора и среднего количества зёрен в потоке. Вычисленные параметры можно использовать для проектирования технических устройств, в которых поток воздуха воздействует на зерно.

Предлагаемую методику исследований можно применять для определения параметров полёта не только зерновки, но и других частиц.

### Литература

1. Сысуев, В.А. Методы механики в сельскохозяйственной технике [Текст] / В.А. Сысуев, А.В. Алёшкин, А.Д. Кормщиков. – Киров: Кировская областная типография, 1997. – 216 с.
2. Клёнин, Н.И. Сельскохозяйственные машины [Текст] / Н.И. Клёнин, С.Н. Киселёв, А.Г. Левшин. – М.: КолосС, 2008. – 816 с.
3. Сычугов, Н.П. Механизация послеуборочной обработки зерна и семян трав [Текст] / Н.П. Сычугов, Ю.В. Сычугов, В.И. Юсупов. – Киров: Изд. Вятской ГСХА, 2003. – 368 с.
4. Горшенин, В.И. Машины для уборки зерновых культур [Текст] / В.И. Горшенин, Н.В. Мехеев, Ю.А. Тарабукин, С.В. Соловьёв. – Мичуринск – наукоград: Изд. ФГОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет», 2006. – 214 с.