

УДК 631.365.22

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНА ПО КОЛЕБАТЕЛЬНОМУ ТРАНСПОРТИРУЮЩЕМУ РАБОЧЕМУ ОРГАНУ ЗЕРНОСУШИЛКИ

*П.С. Агеев, аспирант 3-го года обучения
В.И. Курдюмов, доктор технических наук, профессор
А.А. Павлушин, доктор технических наук, доцент
С.А. Сутягин, кандидат технических наук, доцент
тел. +79021238782, ageev_petr@mail.ru
ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ*

Ключевые слова: сушка зерна, способ сушки, колебательный ТРО.

Работа посвящена определению конструктивных и режимных параметров предлагаемой зерносушилки. Основной отличительной особенностью запатентованной зерносушилки является применения подвижно транспортирующего рабочего органа. Получены дифференциальные уравнения относительного движения сыпучего материала по колеблющемуся ТРО для случаев, когда поверхность наклонена к горизонту, а также находится параллельно ей.

Введение. Ежегодно в нашей стране производят огромное количество зерна, которое нужно сохранить без потерь. Как известно, лучше всего хранить сухое зерно. Поэтому, прежде всего, нужно добиться снижения его повышенной влажности. Для этого применяют различные способы сушки, на основе которых делают большое разнообразие зерносушильных установок. Однако стоит заметить, что каждая из установок имеет разные характеристики, вследствие чего на выходе получается зерно различного качества. При разработке новой конструкции необходимо учитывать все существующие недостатки зерносушилок, для чего изначально проводят теоретические расчеты.

Материалы и методы исследования. На сегодняшний день существует несколько способов сушки зерна, одним из которых является контактный. Его сущность заключается в подводе теплоты зерну напрямую от нагретой поверхности [1, 2, 7].

Такой способ является наиболее рациональным, так как он затрачивает меньше электроэнергии за счет отсутствия затрат на преодоление дополнительных термических сопротивлений.

Стоит заметить, что такой способ имеет недостаток - неравномерность обработки зерна в следствии его статичности. Добиться посто-

янного перемещения зерна можно за счет разработки колебательного транспортирующего рабочего органа [4, 6]. Для этого нужно провести некоторые теоретические расчеты, которые представлены ниже [3, 5].

Результаты исследования и их обсуждение. Рассмотрим перемещение зерна, которое будем называть сыпучим материалом, относительно подвижной системы координат, связанной с колеблющимся рабочим органом.

Выделим в массе перемещаемого сыпучего материала элементарный параллелепипед со стороны $\delta_x, \delta_y, \delta_z$, отнесенный к подвижной системе координат O_{xyz} (рисунок 1).

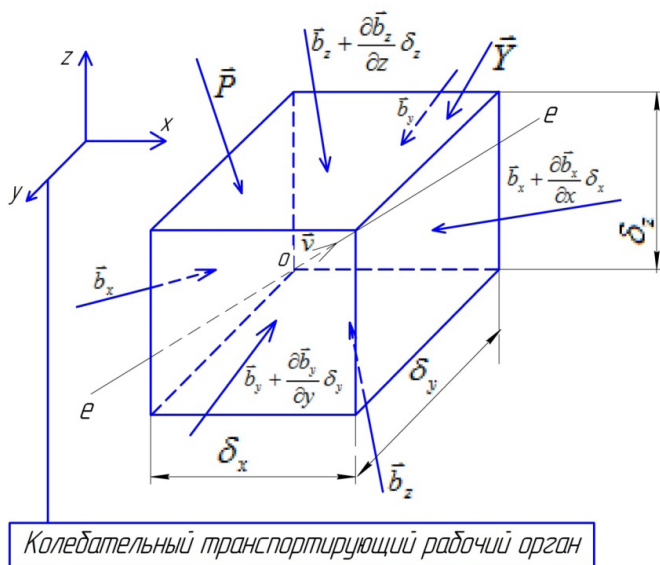


Рисунок 1 - Схема сил и напряжений, отнесенных к выделенному элементарному объему (e - линия «течения» сыпучего материала через фиксированный объем)

Обозначим также силы, действующие на сыпучий материал в элементарном параллелепипеде. Силы воздействия на выделенную часть объема со стороны остальной массы есть силы поверхностные. Если отнести эти силы к единице площади выделенной поверхности, то при-

дем к напряжениям b . На сыпучий материал действуют также массовые силы P и $\bar{Y}$, где P - сила тяжести, отнесенная к выделенному элементарному объему, $\bar{Y}$ - сила инерции переносного движения.

Если считать движение сыпучего материала подобным движению вязкой жидкости, то его поведение можно описать известными уравнениями Навье-Стокса [2]:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial b_{cp}}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) - a_x \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} = g_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial b_{cp}}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) - a_y \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial b_{cp}}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) - a_z \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где V_x, V_y, V_z - проекции относительной скорости массы сыпучего материала, проходящей через фиксированный объем, на соответствующей оси;

b_{cp} - среднее нормальное напряжение в точке, непосредственно не зависящее от скорости движения сыпучего материала;

g_x, g_y, g_z - проекции ускорения силы тяжести;

a_x, a_y, a_z - проекции переносного ускорения;

$$v = \frac{\eta}{\rho}$$

ρ - коэффициент кинематической вязкости сыпучего материала.

Рассмотрим общий случай, когда ТРО расположен под углом к горизонтالي (рисунок 2).

Так как при движении сыпучего материала по колебательному ТРО отсутствует движение массы сыпучего материала через боковые борты, то $V_y = 0$, что влечет за собой также равенство нулю всех частных производных от V_y (2).

Следовательно, в нашем случае имеем дело с частным случаем динамики сыпучих тел - плоскопараллельным «течением».

Предполагаем, что скорость подачи сыпучего материала пренебрежимо мала по сравнению с относительной скоростью его частиц в горизонтальной плоскости.

Это допущение равнозначно отсутствию «сыпучего напора» (динамического подпора), то есть:

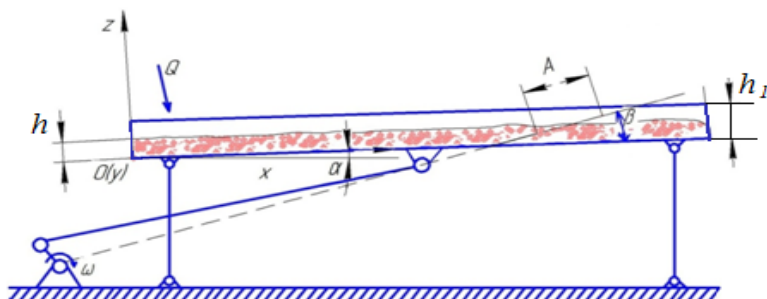


Рисунок 2 – Принципиальная схема колебательного ТРО с транспортируемым сыпучим материалом:

A – амплитуда колебаний; ω – угловая скорость коленчатого вала рад/с; α и β – соответственно углы наклона к горизонту и направления колебаний; h – высота транспортируемого слоя, мм; h_1 – высота бортов ТРО, мм; Q – пропускная способность, кг/ч.

$$\frac{\partial b_{\text{ср}}}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

В предположении, что линейные размеры транспортной доски превосходят толщину слоя перемещаемого сыпучего материала, можно пренебречь краевым эффектом на боковых бортах ее и посчитать, что V_x не зависит от координат x и y . Следовательно:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial y} = 0$$

Отметим, что $g_y = 0$, а при малых значениях угла (что обычно имеет место быть на практике) и $g_y \approx 0$ (5).

Очевидно, также, что в режимах без подбрасывания слоя и все частные производные от V_z равны нулю. В режимах с подбрасыванием слоя очевидное равенство нулю не означает, однако, равенства нулю V_z .

Учитывая выражения (2), (3), (4) и (5), из уравнений (1) получаем дифференциальные уравнения относительного движения сыпучего ма-

териала по колеблющемуся ТРО.

Для «спокойных режимов» они представляются следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial t} = v \frac{\partial v_x}{\partial z^2} - A\omega^2 \cos \omega t \cdot \cos \beta \\ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial b_{cp}}{\partial z} = g \cdot \cos \alpha - A\omega^2 \cos \omega t \cdot \sin \beta \end{cases} \quad (6)$$

Отметим, что собственно перемещение выражает первое уравнение; второе лишь характеризует напряженное состояние рассматриваемой среды.

Для режимов с отрывом сыпучего материала от ТРО уравнения относительного движения запишутся так:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial t} + V_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = v \frac{\partial v_x}{\partial z^2} - A\omega^2 \cos \omega t \cdot \cos \beta \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} = - \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial b_{cp}}{\partial z} + A\omega^2 \cos \omega t \cdot \sin \beta \right) + g \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad (7)$$

При этом заметно сходство первых уравнений для режимов обоих видов.

Для частных случаев, когда ТРО расположен в горизонтальной плоскости, угол α будет равняться 0. Следовательно, уравнение (2.9) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial t} + V_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = v \frac{\partial v_x}{\partial z^2} - A\omega^2 \cos \omega t \cdot \cos \beta \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} = - \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial b_{cp}}{\partial z} + A\omega^2 \cos \omega t \cdot \sin \beta \right) + g \end{cases} \quad (8)$$

Применение уравнение (8) обусловлено тем, что поверхность ТРО выполнена ступенчато.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод, что для постоянного перемещения зерна необходимо не только приводить в движение транспортирующий рабочий орган, но и выполнить его поверхность ступенчатой, чтобы обеспечить зерну отрыв от нее и будет способствовать постоянному перемешиванию обрабатываемого зерна.

Библиографический список:

1. Журавлев А.П. Зерносушение и зерносушилки: монография. - Кинель: РИЦ СГСХА, 2014. - 293 с.
2. Красников В.В. Кондуктивная сушка. М., «Энергия». 1973. 288 с. с илл.

3. Курдюмов В.И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа // В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, С.А. Сутягин: монография. – Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.
4. Курдюмов, В.И. Обоснование оптимальных режимов работы зерносушилок контактного типа / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2014. – № 4 (28). - С.160-165.
5. Курдюмов В.И. Энергозатраты на процесс сушки зерна / Курдюмов В.И., Павлушин А.А., Сутягин С.А. // Вестник ВИЭСХ. М., 2012. – № 7. - С. 52-54.
6. Патент 184194 РФ, МПК А23В 9/08, F26В 17/26. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, П.С. Агеев, С.А. Сутягин, Г.В. Карпенко, Д.П. Ерохин; заявитель и патент-тообладатель ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ. - № 201810890; заявл. 12.03.2018; опубл. 18.10.2018, Бюл. № 29.
7. Sutyagin, S., Pavlushin, A., & Ageyev, P. (2019). Features of heat treatment of grain in dryers of the contact type. Paper presented at the E3S Web of Conferences, 126 doi:10.1051/e3sc.

TO THE QUESTION OF JUSTIFICATION OF GRAIN MOVEMENT ON THE OSCILLATING TRANSPORTING WORKING BODY OF THE GRAIN DRYER

Ageyev P., Kurdyumov V., Pavlushin A., Sutyagin S.

Keywords: *grain drying, drying method, vibrational TRO.*

The work is devoted to determining the design and operating parameters of the proposed grain dryer. The main distinctive feature of the patented grain dryer is the use of a mobile transporting working body. Differential equations of the relative motion of bulk material along the oscillating TRO are obtained for cases when the surface is inclined to the horizon, and also is parallel to it.