

# КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В РОТАЦИОННОМ СУШИЛЬНО-ОБЖАРОЧНОМ АППАРАТЕ

Шуляк В.А., Буглак А.В.

УО «Могилевский государственный университет продовольствия»

*The kinematic parameters definition technique of granular materials movement on rotational drying device is described. Schedules of speeds and accelerations for various device loading volumes are received, at various angular speeds of working chamber rotation.*

## Введение

Одним из основных требований к равномерности тепловой обработки зернистых материалов является качественное проведение процесса перемешивания. Это способствует равномерному подводу тепловой энергии к продукту по всему его объему, уменьшает риск образования застойных зон и, как следствие, пригорание и денатурацию продукта.

С научной точки зрения интересен сам факт распределения скоростей в объеме перемешиваемого материала, а именно его количественное и качественное описание. По величине скорости циркуляции в различных областях можно судить об интенсивности теплоотдачи от теплообменной поверхности к обрабатываемому продукту.

Весь объем материала можно условно разбить на зону пристенной циркуляции (зона контакта с теплообменной поверхностью), зона поверхностной и внутренней циркуляции в слое. Характер движения материала в аппарате зависит от следующих основных факторов: скорость вращения рабочей камеры аппарата, геометрия рабочей камеры, наличие дополнительных перемешивающих устройств (шнеки, лопатки, лопасти и т.п.)

## Описание установки и методики проведения эксперимента

Исследование циркуляции сыпучего материала нами выполнено применительно к ротационному сушильно-обжарочному аппарату (Рис. 1). Рабочая камера выполнена в виде двух усеченных конусов, сочлененных большими основаниями с цилиндром. Высота цилиндра и конусов составляла 200 мм, основания конусов 600 мм и 200 мм, диаметр цилиндра 600 мм. Ось вращения проходит по плоскости симметрии через боковую поверхность цилиндра.

Аппарат состоит из сушильной камеры 1 с теплообменной рубашкой, патрубка для отвода паров 2, вакуумного насоса 3, конденсатора 4, привода 5, измельчителя 6, герметизируемого люка 7 для загрузки-выгрузки высушиваемого материала, патрубка подвода и отвода теплоносителя 8, шестеренного насоса 9 для подачи теплоносителя, нагревательного бака 10, смотрового окна 11, пульта управления 12.

Для определения скорости циркуляции зернистых материалов в рабочей камере исследуемого аппарата нами была разработана специальная методика, которая позволяет определить перемещения, скорость и ускорения материала в различных областях по видеосигналу.

Запись сигнала производилась на цифровую видеокамеру 1 (Рис. 2), закрепленную на опорной площадке 2, через смотровое окно 3, изготовленное из стекла диаметром 200 мм.

В камере аппарата расклеены маркеры (реперы) 1 (Рис. 3) для масштабной корректировки, и размещена подсветка 2 внутри и вне рабочей камеры аппарата для улучшения качества записываемого изображения.

Скорость отдельных частиц можно определяется по закону движения точки, который формируется в виде таблицы координат точки и последующей обработкой с помощью конечно-разностных численных методов.

В теоретической механике есть три способа задания движения точки: естественный, векторный и координатный. В координатном способе положение точки в декартовой системе координат определяется тремя координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . При движении точки ее координаты меняются с течением времени. Следовательно, зная уравнение движения точки можно найти скорость и ускорения реперной точки. В данной методике решается обратная задача. Закон движения точки задан в виде экспериментальных данных, представленных виде табличных массивов, а не функциональных зависимостей.

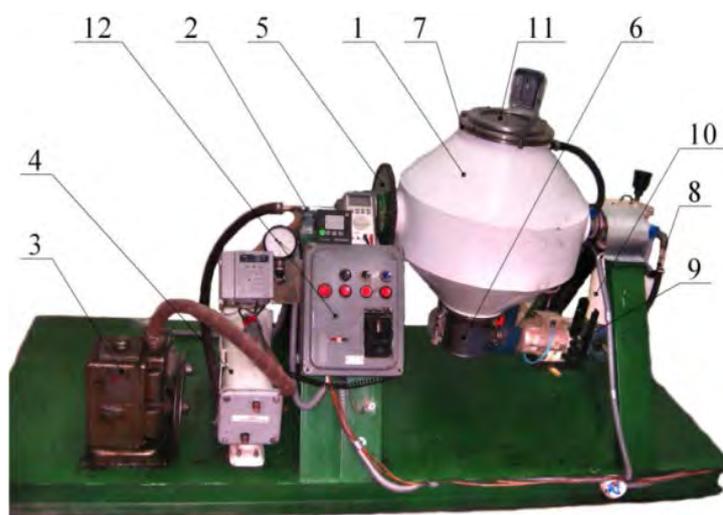


Рис. 1. Ротационный сушильно обжарочный аппарат



Рис. 2. Монтаж видеокамеры на загрузочном лючке



Рис. 3. Размещение подсветки и маркеров

Для видеозаписи использовалась цифровая видеокамера SONY DSR-HC38E со скоростью съемки 25 кадров в секунду. Эта камера позволяет оцифровывать

видеоизображение на MiniDV носитель. Для регулирования частоты вращения барабана установка оснащена тиристорным преобразователем частоты «ИнвертерN100-022HF».

Эксперимент проходил следующим образом. В рабочую камеру аппарата загрузалось зерно (пшеница) порциями, составляющими 10%, 20% и 30% загрузки, что соответствует 7, 14 и 21 кг. Каждая загрузка исследовалась при угловой скорости вращения  $0,6 \text{ с}^{-1}$  и  $0,8 \text{ с}^{-1}$ . Часть перемешиваемого материала окрашивалась ярким цветом (около 10 %), для облегчения процесса отслеживания (Рис. 4).

Перед каждой видеозаписью на камеру снимается масштабный крест (Рис. 5), для последующей масштабной корректировки изображения. Видеокамера накрывается плотной непрозрачной тканью, для устранения бликов лабораторного освещения. Инвертером настраивается требуемая частота вращения. Включается подсветка, запись и привод барабана. Запись длится в течение 3 мин. Данный порядок повторяется для трех загрузок.



Рис. 4. Фото исследованного зерна  
а) меченное зерно; б) обычное зерно

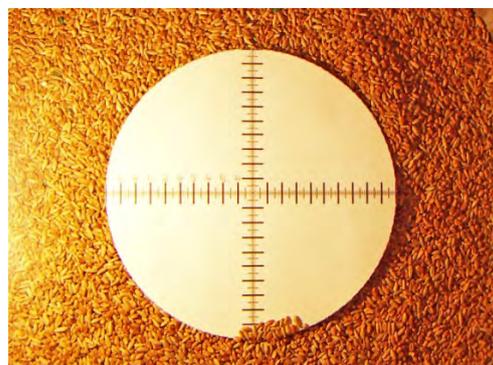


Рис.5. Масштабный крест

Помеченный материал должен соответствовать следующим требованиям. Он не должен изменять динамику движения сыпучего материала, т.е. не должны меняться его физическо-механические свойства. Поэтому пометка зерна осуществлялась путем замачивания на 2-3 минуты в растворе бриллиантовой зелени, а последующем интенсивном высушивании промышленным феном при температуре  $600^{\circ}\text{C}$ . Начальная влажность неокрашенного зерна составляла 3,82%, окрашенного после сушки - 4,55 %.

### Методика обработки экспериментальных данных

После проведения эксперимента видеоролик в прикладной программе «Picture Motion Browser» разбивается на кадры, которые сохраняются в виде последовательных рисунков. Интервал времени между кадрами равен скорости записи. Рисунки привязываются к системе координат Оху в программе AutoCAD 2006. Данная система координат позволяет определить координаты движения зерна относительно поверхности смотрового окна. На изображении выбирается одно меченное зерно и на первом кадре определяется его координата с учетом масштабной корректировки. Далее последовательно к данной системе координат привязываются последующие кадры и определяются соответствующие координаты. На рисунке 6 представлена схема определения координат зерен. Так как преимущественное движение зерна наблюдается только вдоль оси ОУ, то относительным смещением вдоль оси ОХ можно пренебречь.

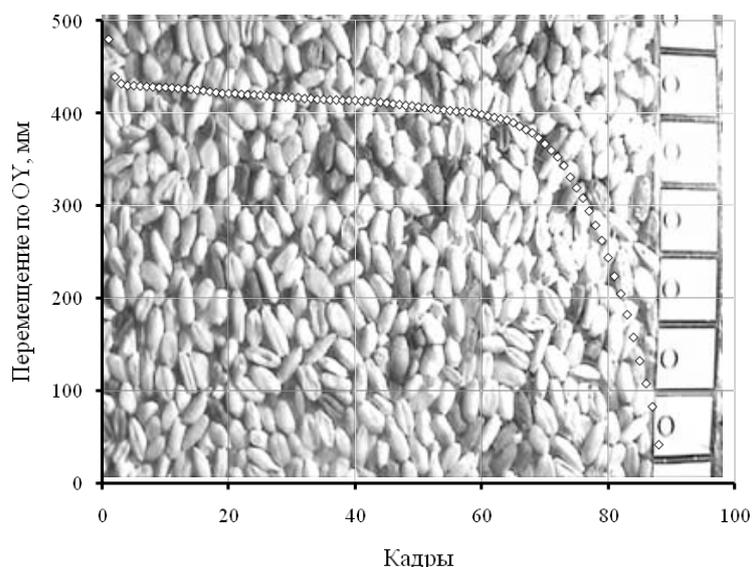


Рис. 6. Определение координат меченного зерна

В результате покадровой обработки получаем закон движения зерна вдоль исследуемой поверхности. При определении координат зерен имеет место некоторая погрешность. Это связано, во первых, с неточностью определения выбранной привязки на конкретном зерне, во вторых, вибрации видеокамеры и аппарата во время вращения. Поэтому необходимо провести сглаживание данных. В математическом редакторе *Mathcad* имеется несколько встроенных функций, реализующих различные алгоритмы сглаживания данных [1]:

- $medsmooth(y,b)$  – сглаживание алгоритмом «бегущих медиан»;
- $ksmooth(x,y,b)$  – сглаживание на основе функции Гаусса;
- $supsmooth(x,y)$  – локальное сглаживание адаптивным алгоритмом, основанное на анализе ближайших соседей каждой пары данных.

В этих функциях:  $x$  – вектор действительных данных аргумента;  $y$  – вектор действительных значений того же размера, что и  $x$ ;  $b$  – ширина окна сглаживания. Наилучший результат показало локальное сглаживание адаптивным алгоритмом. На рисунке 7 представлен график скоростей экспериментальных и сглаженных координат зерен для 10% загрузки при угловой скорости вращения  $0,6 \text{ с}^{-1}$ .

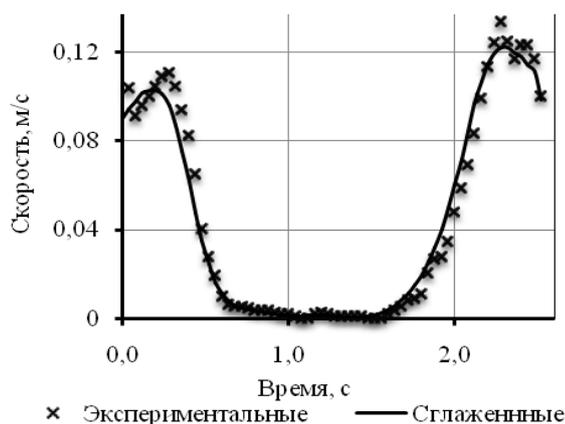


Рис. 7. Скорости экспериментальных и сглаженных координат

На рисунке 8 представлены сглаженные графики изменения координат меченных зерен для различной загрузки при частоте вращения барабана  $0,6$  и  $0,8 \text{ с}^{-1}$ .

Для определения средней скорости на некотором интервале времени воспользуемся методом конечных разностей по трем ординатам [2,3,4]. По этому методу составляется таблица перемещений зерен вдоль оси ОУ. В качестве аргумента функции координат рассматривается время, которое вычисляется по данным частоты видеосъемки (25 кадров в секунду). Если видеосъемка выполняется с частотой кадров  $K$ , тогда временной интервал между двумя видеокдрами ( $\Delta t$ ) равен

$$\Delta t = 1/K \quad (1)$$

Для рассматриваемых табулируемых величин функции, значения аргументов образуют арифметическую прогрессию, разность которой  $h$  называется шагом таблицы.

$$h = \Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (2)$$

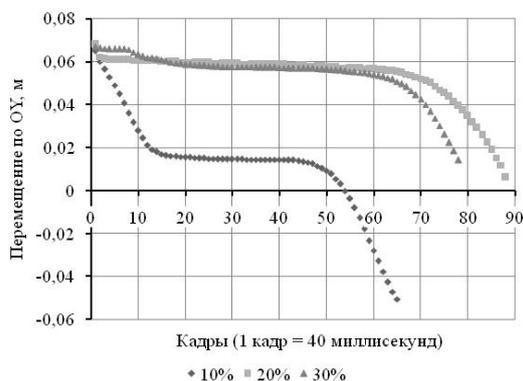
$$i = 0, 1, \dots, n - 1$$

Первая и вторая производные координат по времени определяются из симметричных конечно-разностных отношений

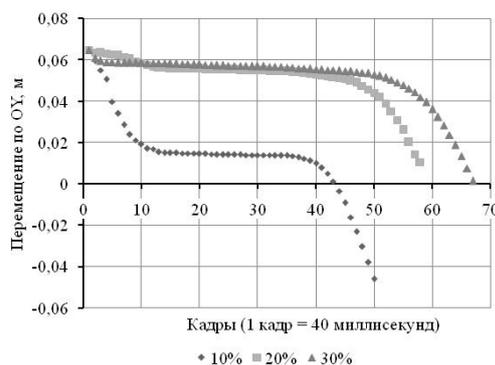
$$\vartheta = \dot{Y}_k = \frac{Y_{k+1} - Y_{k-1}}{2h} \quad (3)$$

$$\alpha = \ddot{Y}_k = \frac{Y_{k+1} - 2Y_k + Y_{k-1}}{h^2} \quad (4)$$

где  $\dot{Y}_k, \ddot{Y}_k$  – приближенные значения первой и второй производной координат по времени в момент времени  $t = t_i$ .



а)



б)

Рис. 8. Перемещение зерен для различной степени загрузки и угловой скорости вращения а)  $0,6 \text{ c}^{-1}$ , б)  $0,8 \text{ c}^{-1}$

### Анализ полученных результатов

На рисунке 9 представлены результаты аналитического расчета скоростей зерен, для различных загрузок рабочей камеры: 10 %, 20 % и 30 %.

Данные графики описывают изменение скорости движения зерен вдоль теплообменной поверхности (зона пристенной циркуляции) в зависимости от угловой скорости вращения и загрузки барабана.

Анализ данных на рисунке 9а показывает, что для 10 % загрузки в момент контакта с теплообменной поверхностью зерна имеют относительную скорость  $0,09 \text{ м/с}$  ( $0,6 \text{ c}^{-1}$ )  $0,13 \text{ м/с}$  ( $0,8 \text{ c}^{-1}$ ). Далее за  $0,2$  секунды скорости возрастают до  $0,11 \text{ м/с}$  ( $0,6 \text{ c}^{-1}$ ) и  $0,51 \text{ м/с}$  ( $0,8 \text{ c}^{-1}$ ) с последующим замедлением до  $0 \text{ м/с}$ . Время

неподвижного контакта материала с теплообменной поверхностью составляет приблизительно 0,7 с ( $0,6 \text{ с}^{-1}$ ) и 0,9 с ( $0,8 \text{ с}^{-1}$ ). Скачек скорости на отрезке времени 0,2-0,4 секунды имеет место и при загрузке в 20% от объема рабочей камеры (Рис. 9б). С увеличением загрузки до 30% скачек скорости исчезает. Это можно объяснить тем, что с увеличением объема перемешиваемого материала происходит стабилизация динамики движения материала в зоне контакта с теплообменной поверхностью, устраняется эффект проскальзывания. По данным графикам можно оценить время неподвижного контакта продукта с теплообменной поверхностью. Так при загрузке 30% и угловой скорости  $0,6 \text{ с}^{-1}$  время неподвижного контакта достигает наибольшего значения и составляет приблизительно 2,3 с. Далее скорость зерен возрастает (Рис. 9в), достигая максимального значения 0,14 м/с. Это увеличение характеризует скорости перехода зерен из зоны пристенной циркуляции в поверхностные и внутренние слои. Следует отметить, что скорости в момент контакта продукта с теплообменной поверхностью и в момент отрыва практически равны.

На рисунке 10 представлены графики изменения ускорений для различных загрузок рабочей камеры: 10 %, 20 % и 30 %.

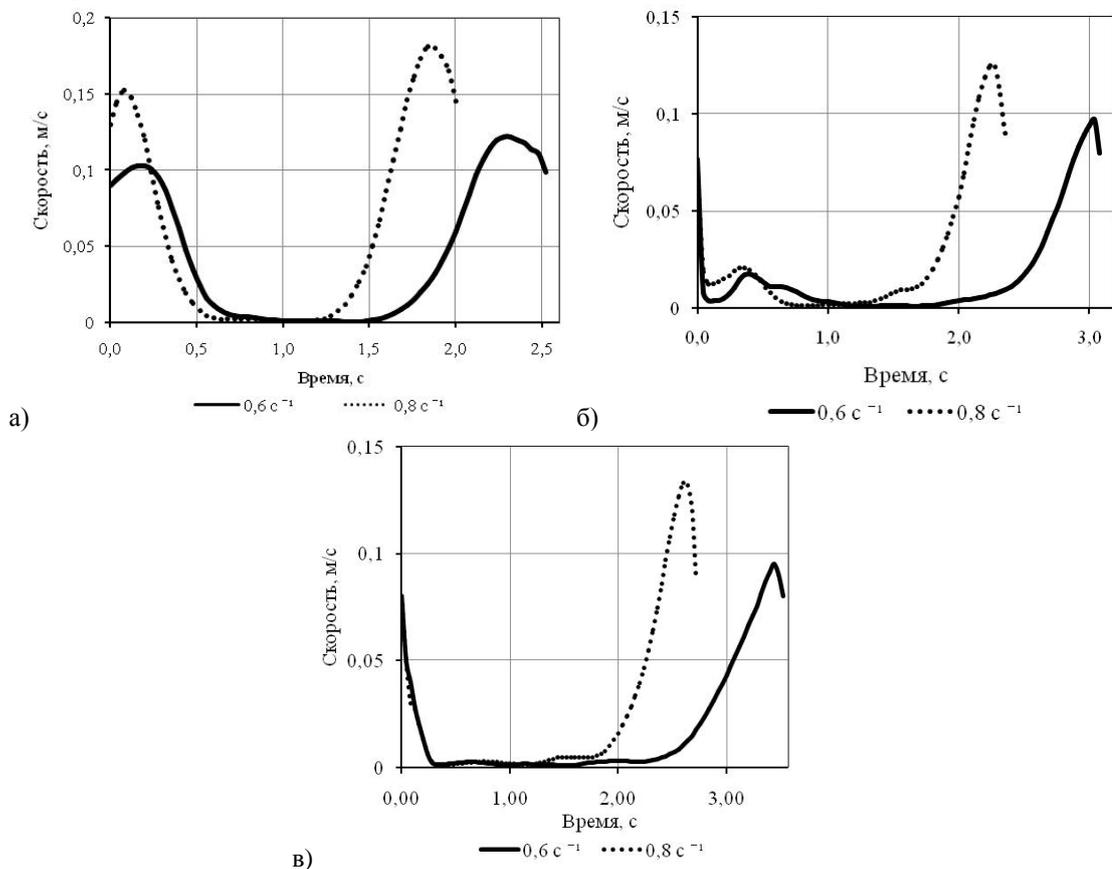


Рис. 9. Графики изменения скоростей зерна для различных загрузок аппарата: а) 10 % загрузки; б) 20 % загрузки; в) 30 % загрузки

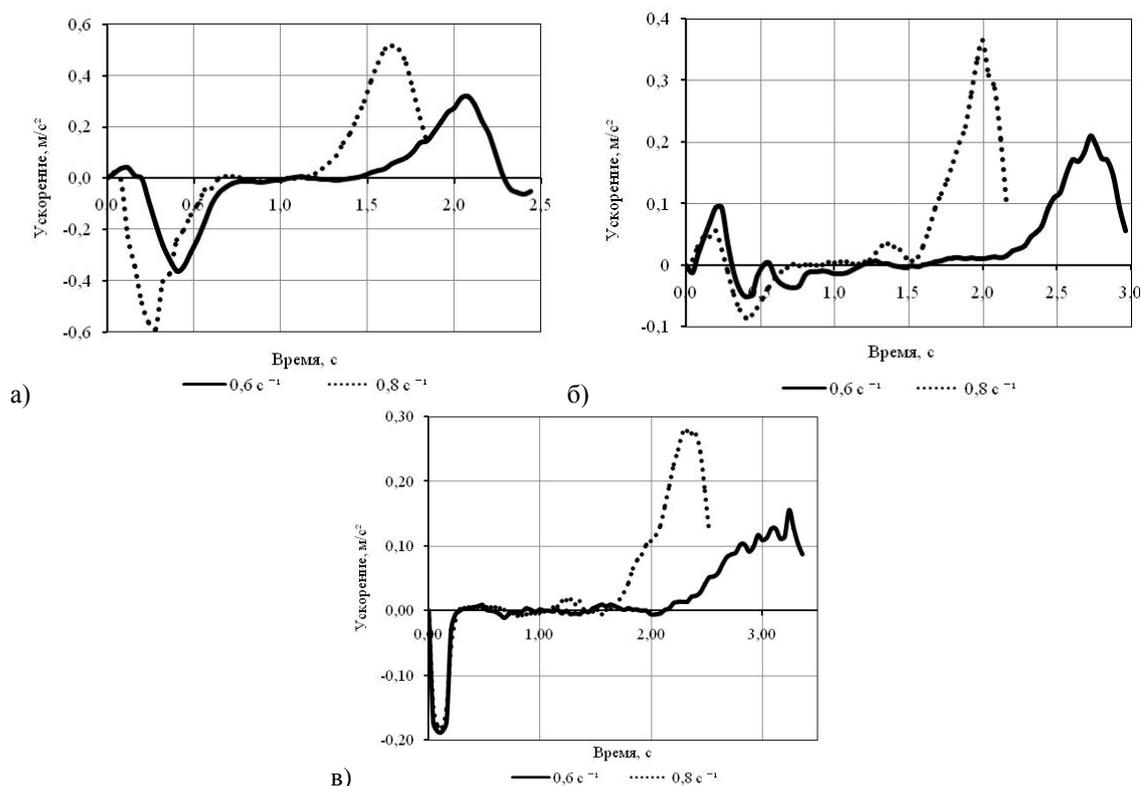


Рис. 10 Графики изменения ускорений зерна для различных загрузок аппарата:  
 а) 10 % загрузки; б) 20 % загрузки; в) 30 % загрузки

Характерный скачек скоростей для 10 % и 20 % загрузки отражается положительным скачком ускорений около  $0,05 \text{ м/с}^2$  и  $0,1 \text{ м/с}^2$  для 10% и 20% загрузки соответственно (Рис 10а, 10б). Для 30% загрузки положительного скачка не наблюдается (Рис. 10в).

## Выводы

Таким образом, с помощью новой методики можно описывать движение материала, определять скорости и ускорения на различных участках в любом ротационном аппарате, имеющем смотровое стекло. Данные, приведенные выше, найдут применение в определении коэффициентов теплоотдачи от греющей поверхности к обрабатываемому продукту в ротационном сушильно-обжарочном аппарате.

## Литература

1. Кирьянов, Д. В. Самоучитель Mathcad 11 / Д. В. Кирьянов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.
2. Гутер, Р. С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Р. С. Гутер, Б. В. Овчинский. – М. : Наука, 1970. – 432 с.
3. Волков, Е.А. Численные методы / Е. А. Волков. – М. : Наука, 1982. – 256 с.
4. Воробьева, Г. Н. Практикум по вычислительной математике / Г. Н. Воробьева, А. Н Данилова. – М. : Высшая школа, 1990. – 208 с.