

МОДЕЛЬ ВИБРАЦИОННО-СИЛОВОГО ВЫРАВНИВАНИЯ ПРИ УПАКОВКЕА.Л. КАЛАБИН¹, д-р физ.-мат. наук, М.В. ТАРАЧКОВ², аспирант¹Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: akalabin@yandex.ru²Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
236041, Калининград, ул. А. Невского, 14, e-mail: mishklgpmi@mail.ru

© Калабин А.Л., Тарачков М.В., 2023

Приводится описание процесса создания математической модели вибрационно-силового выравнивания при упаковке охлажденных полуфабрикатов на пищевом производстве. Модель основывается на работах по выравниванию существенно меньших по размеру объектов, нежели коробка, в которой они находятся. При этом модель претерпела ряд важных изменений. Для ее построения рассматриваются две вспомогательные задачи, подводящие читателя к вопросу об условиях начала движения выравниваемых объектов, а именно задача необходимого ускорения и задача вибрационного характера перемещения. Приводятся исходные данные для расчетов (необходимая информация была получена путем анализа производственной линии по выравниванию охлажденных полуфабрикатов). Часть этих данных взята из чертежей робота-манипулятора, который является основой системы выравнивания полуфабрикатов. Осуществлены расчеты необходимой силы надавливания на полуфабрикаты, частоты вибрации, перемещения полуфабрикатов. В результате экспериментов было установлено, что построенная математическая модель выравнивания полуфабрикатов удовлетворительно адекватна. Созданная математическая модель позволила улучшить характеристики робота-манипулятора и рассчитать эффективные параметры работы системы автоматизации по выравниванию охлажденных полуфабрикатов.

Ключевые слова: вибрационное воздействие, упаковка полуфабрикатов, пищевое производство, математическое моделирование, робототехника, системы автоматического управления.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-63-70

Широко известна задача выравнивания сыпучего материала под действием вибрации [1, 2]. Сыпучий материал в этом случае определяют как систему, состоящую из твердых частиц произвольной формы, находящихся в контакте. К указанным материалам относят удобрения, некоторые строительные вещества (цемент), многие моющие средства. При этом размеры отдельного элемента материала во много раз меньше характерного размера всей смеси. В основе этого явления лежит вибрационное движение механической смеси по вибрирующему лотку [3]. Интересно рассмотреть ситуацию, когда объекты незначительно меньше (примерно в 5 раз) коробки, в которой они находятся.

На линии пищевого производства существуют задачи по укладке охлажденных полуфабрикатов в коробки и последующей заклейке этой коробки. В частности, полуфабрикат, как охлажденные нагетсы укладывают в полиэтиленовые пакеты. Робот при помощи присоски кладет пакеты в коробки, что не всегда происходит корректно и пакет с нагетсами может выступать за верхний край тары. Если не выровнять пакет с нагетсами, то машина по заклейке коробок не работает и получится брак. Поэтому

необходим участок, на котором производится выравнивание полуфабрикатов. В настоящий момент данную работу выполняют люди. Предполагается заменить их автоматической системой с использованием промышленного робота-манипулятора.

Целью данной работы является разработка модели вибрационно-силового выравнивания полуфабрикатов роботом-упаковщиком, в ходе которой будут установлены некоторые его параметры для последующей автоматизации скоростного участка производственной линии по упаковке полуфабрикатов с использованием этого промышленного робота-манипулятора.

В основе задачи выравнивания сыпучего материала [1, 2] лежит физическая задача, определяющая условие начала движения груза, лежащего на платформе.

ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА 1

Физическую задачу, призванную установить условие начала движения лежащего на платформе груза, можно сформулировать так: на подвижной платформе P находится груз B массой m . С каким ускорением a_p должна двигаться платформа, чтобы груз B тоже пришел в движение?

Движение груза, который размещен на платформе, будет определять сила трения $F_{тр}$ между этим грузом и платформой.

Уравнение движения груза B запишем в неинерциальной системе отсчета (НСО) [4]. Это уравнение относительно платформы P приобретает дополнительный член с размерностью силы (точнее, эйлеровой силы инерции):

$$ma = F_{тр} - mdV(t)/dt,$$

где m – масса груза B ; a – его ускорение; $ma_p = mdV(t)/dt$ – поступательная сила инерции, возникающая из-за неинерциальной системы отсчета, которая сама движется с ускорением; $V(t)$ – растущая скорость движения платформы. Эта сила связана с линейным ускорением НСО и противоположна ему. Запишем силу трения как

$$F_{тр} = kN = kmg,$$

где k – коэффициент трения; g – ускорение свободного падения; N – нормальная сила реакции опоры (платформы).

Груз B может начать двигаться в направлении, обратном движению платформы P , при условии отрицательного ускорения $a < 0$, которое возникнет при условии $kmg < ma_p$, $a_p > kg$. Груз B переместится под воздействием инерциальной силы, большей, чем сила трения покоя. Аналогично при движении отдельных элементов сыпучего материала этот материал начинает выравниваться [1, 2]. В связи с ограниченностью такого перемещения появляется колебательное движение (вибрация).

Вернемся к описанному во введении примеру. Коробка для упаковки вмещает в себя 12 нагетсов. Замороженные нагетсы находятся в полиэтиленовом пакете, который робот помещает в коробку случайным образом. В коробку они укладываются в два слоя. Первый слой равномерно распределяется по всей площади тары. При укладке верхнего слоя бывает, что от одного до трех нагетсов образуют третий, который не позволяет закрыть упаковку. При этом необходимо разровнять третий слой, то есть сделать так, чтобы нагетсы заполнили полностью второй слой. Выравнивание считается законченным, когда нагетсы равномерно распределены по всей площади коробки и слоям и коробка закрыта.

Рассмотрим ситуацию, когда несколько нагетсов образуют вертикальный третий слой. Для выравнивания нагетсов в третьем слое создан робот (рис. 1), рабочим

органом которого является подвижная вибрирующая платформа, оказывающая давление на верхний слой наггетсов, выступающих над правильно уложенным вторым, с целью переноса наггетсов во второй или первый слой и выравнивания их по всей площади [5]. Для описания динамики этого рабочего органа рассмотрим другую физическую задачу, а именно моделирующую движение рабочего органа робота.

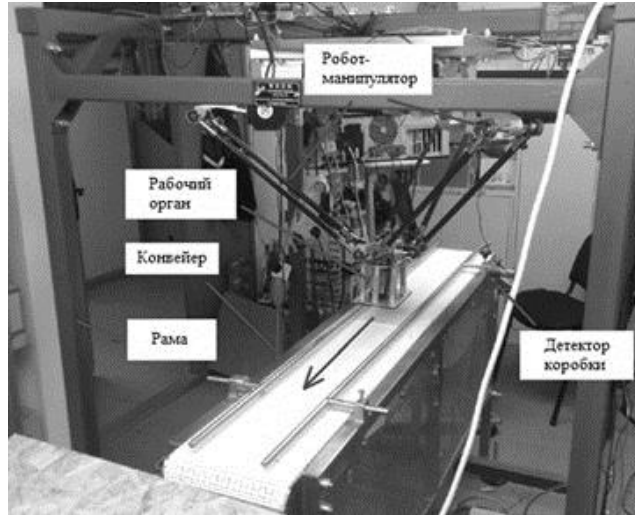


Рис. 1. Робот-манипулятор, который производит выравнивание наггетсов в коробке

ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА 2

На неподвижной платформе находится груз массой m . На этот груз сверху помещена подвижная платформа P (рис. 2). Известно два коэффициента трения при движении груза (относительно нижней неподвижной k_2 и верхней подвижной платформы k_1). Верхняя платформа P давит на груз с некоторой силой F и движется с ускорением a . Как будет двигаться груз, который находится между двумя платформами?

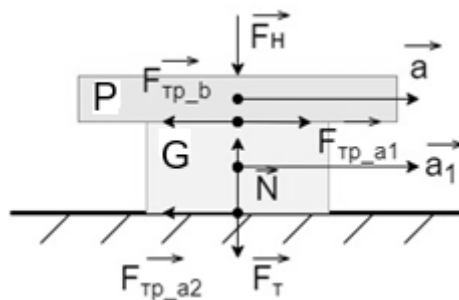


Рис. 2. Расположение наггетса G и давящей на него подвижной платформы P

Рассмотрим силы, действующие на наггетс G :

$$\begin{aligned}
 m\vec{a}_1 &= m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{mp_{a1}} + \vec{F}_{mp_{a2}}; \\
 \vec{F}_{mp_b} &= -\vec{F}_{mp_{a1}}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Запишем уравнение (1) в проекции на ось Ox :

$$ma_1 = F_{mp_{a1}} - F_{mp_{a2}}.$$

Вычислим значения каждой из сил трения по формулам (2) и (3):

$$F_{mp_{a1}} = k_1 F_n; \quad (2)$$

$$F_{mp_{a2}} = k_2 (F_n + mg), \quad (3)$$

где F_n – сила давления рабочим органом на один наггетс, которую можно рассчитать через соотношения площадей соприкасающихся поверхностей наггетса S_G и рабочего органа S_p :

$$F_n = F S_G / S_p. \quad (4)$$

Подставим значения сил трения из формул (2) и (3) в формулу (1), чтобы определить ускорение, которое необходимо придать наггетсу для его перемещения:

$$ma_1 = k_1 F_n - k_2 (F_n + mg);$$

$$a_1 = \frac{F_n}{m} (k_1 - k_2) - k_2 g. \quad (5)$$

Груз G придет в движение при условии, что его ускорение станет отличным от нуля, то есть когда сила трения между этим грузом и верхней платформой P станет больше, чем сила трения покоя, с учетом давления, оказываемого данной платформой. Эта платформа P моделирует верхнюю часть рабочего органа робота, а груз G – наггетс.

РАСЧЕТЫ УСЛОВИЯ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ОДНОГО НАГГЕТСА

Определим основные параметры и их численные значения для наггетсов и для робота-манипулятора, ориентируясь на задачу 2. Исходные данные для этого случая приведены в таблице.

Исходные данные для расчётов

Наименование	Значение
Масса наггетса	$m = 25 \text{ г} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$
Сила прижатия наггетсов рабочим органом	$F = 300 \text{ Н}$
Ускорение свободного падения	$g \approx 10 \text{ м/с}^2$
Длина наггетса	$a_n = 0,04 \text{ м}$
Ширина наггетса	$b_n = 0,02 \text{ м}$
Длина рабочего органа	$a_p = 0,2 \text{ м}$
Ширина рабочего органа	$b_p = 0,13 \text{ м}$
Коэффициент трения наггетса о рабочий орган	$k_1 = 0,2$
Коэффициент трения одного наггетса о другой	$k_2 = 1$

Из (4) с учетом представленных в таблице значений рассчитаем $F_n = 9$ Н. Тогда по формуле (5) ускорение груза G (в нашем случае – наггетса) будет иметь значение

$$a_1 = \frac{F_n}{m} (k_1 - k_2) - k_2 g \approx 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2.$$

Величина первого слагаемого значительно больше второго, то есть сила давления рабочим органом превышает массу наггетса. В связи с пространственной ограниченностью движения наггетсов размерами коробки появляется колебательное движение.

Для увеличения вероятности перемещения наггетса третьего слоя и попадания на свободное место во втором слое колебания рабочего органа P желательно осуществлять в плоскости одновременно по двум координатам. При этом условии примерная траектория наггетса третьего слоя будет иметь вид, приведенный на рис. 3. Эта траектория покрывает почти всю поверхность третьего слоя, в том числе и свободную площадь, куда может попасть этот наггетс. Однако колебания рабочего органа P в плоскости одновременно по двум координатам сложно организовать технически, поэтому реализовано колебание по одной координате. Колебания – это способ привести наггетс в движение, как следует из задачи 2.

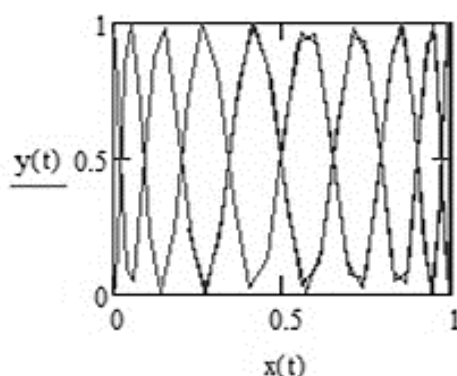


Рис. 3. Примерная траектория наггетса из третьего слоя

Рабочий орган P совершает гармонические колебания. Его перемещение описывается формулой $X_B = A \sin(\omega t)$. Тогда максимальное ускорение рабочего органа

$$a_{B_{\max}} = A \omega^2 = 4\pi^2 A \nu^2, \quad (6)$$

где A – амплитуда колебаний; ν – частота колебаний.

Допустим, что ускорения колеблющихся и прижатых друг к другу тел G и P примерно равны ускорению груза G , а в реальности ускорение наггетса – ускорению рабочего органа:

$$a_1 \approx a_B.$$

Амплитуда A колебаний рабочего органа примерно равна длине наггетса (4 см). Можно из формулы (6) рассчитать частоту колебаний рабочего органа:

$$\nu = \sqrt{\frac{a_1}{4\pi^2 A}} \approx 44 \text{ Гц.}$$

Соответственно, период колебаний примерно 0,02 с.

Рассмотрим наггетс G, который выступает за верхнюю границу коробки, и рабочий орган P, совершающий гармонические колебания и надавливание на наггетс G. Задача рабочего органа заключается в выравнивании наггетса G, чтобы он не выступал за границы коробки (рис. 4). Требуется установить зависимость между силой надавливания, частотой колебаний рабочего органа и перемещением продукта.

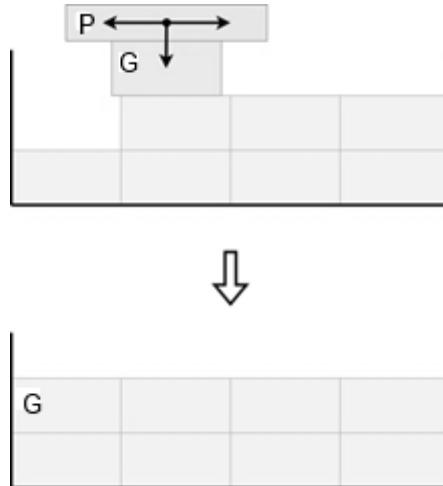


Рис. 4. Схематичное изображение процесса выравнивания наггетса G

Чтобы наггетс упал в свободное пространство коробки, проекция центра его масс должна выступить за край поверхности, на которой лежит наггетс, то есть перемещение должно составлять не менее половины длины или ширины наггетса в зависимости от его ориентации. Используя формулу связи периода колебаний с частотой и приняв во внимание, что эффективное время для перемещения наггетса – это четверть периода колебаний, определяем время, в течение которого рабочий орган воздействует на наггетс:

$$t = \frac{1}{4\nu} \approx 5 \cdot 10^{-3},$$

откуда найдем перемещение наггетса по формуле

$$S_A = \frac{a_1 t^2}{2} \approx 3,8 \text{ см.}$$

Перемещение примерно равно длине наггетса.

При скорости конвейера и коробки с наггетсами 0,56 м/с и длине рабочей зоны 0,15...0,8 м время нахождения коробки в указанной зоне составляет примерно 1,5 с. Если период колебаний рабочего органа 0,02 с, то наггетс, выступающий за второй вертикальный уровень, получит более 70 колебаний. Этого достаточно, чтобы с большой вероятностью наггетс начал двигаться и упал в свободное пространство коробки на втором уровне, что подтвердилось в ходе эксперимента.

На основе предложенной модели была получена численная оценка параметров для рабочего органа робота-упаковщика, воздействующего непосредственно на наггетс. При заданной силе давления амплитуда колебаний рабочего органа примерно равна длине наггетса (4 см). Частота колебаний находится в диапазоне 40...60 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки работоспособности робота-упаковщика были проведены эксперименты. Сначала нагетсы в коробку укладывались ручным способом, из-за чего образовывался третий слой, нарушающий правильность упаковки. Таким образом были сформированы 10 коробок. Затем они пускались на линию, на которой работал робот-упаковщик. На выходе оценивалось качество упаковки. Результат считался положительным, если в коробке оказывалось два ровных слоя, благодаря чему коробка закрывалась крышкой без всяких изъянов. Эксперимент повторяли более чем на 100 коробках: положительный результат имел место в 93 % случаев, что свидетельствовало об удовлетворительном качестве разработанной модели процесса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук В.А. Мурцовкину за плодотворное обсуждение физических явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модель вибрационного перемещения сыпучих материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://industrial-wood.ru/tehnologiya-podzemnoy-dobychi-rud/17891-model-vibracionnogo-peremescheniya-sypuchih-materialov.html> (дата обращения: 20.07.2022).
2. Разделение частиц в слое сыпучего материала под действием вибрации (сегрегация, самосортирование) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://msd.com.ua/chto-mozhet-vibraciya/razdelenie-chastic-v-sloe-sypuchego-materiala-pod-dejstviem-vibracii-segregaciya-samosortirovanie/> (дата обращения: 20.07.2022).
3. Шарлаимов В.И., Козин В.М. Экспериментальные исследования нестационарных процессов при движении сплошной среды в гравитационном поле. М.: Академия естествознания. 2007. 232 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. Механика. М.: Наука. 1979. Т. 1. 520 с.
5. Морозов А.В., Усольцев В.М. Уплотнение дисперсных материалов рабочим органом с полигармоническим источником колебаний // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019. Т. 2. № 4. С. 182–189.

ALIGNMENT MODEL DURING PACKAGING USING VIBRATION FORCE

A.L. KALABIN¹, Dr. Sc., M.V. TARACHKOV², Postgraduate

¹Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, Russian Federation, e-mail: akalabin@yandex.ru

²Immanuel Kant Baltic Federal University,
14A, Nevsky str., Kaliningrad, 236041, Russian Federation, e-mail: mishklgpmi@mail.ru

The description of the process of creating a mathematical model of vibration-force alignment when packaging chilled semi-finished products in food production is given. The model is based on alignment work on objects that are substantially smaller than the box they are in. At the same time, the model has a number of important changes. For its construction, two auxiliary problems are considered, leading the reader to the question of the conditions for the start of the movement of the aligned objects: the necessary acceleration and the vibrational nature of the movement. The initial data for the calculations are given, which were obtained by

analyzing the production line for leveling chilled semi-finished products. Part of the initial data was obtained from the drawings of the robotic arm, which is the basis of the semi-finished product alignment system. Calculations of the required pressing force on semi-finished products, vibration frequency, and movement of semi-finished products have been carried out. As a result of the experiments, it was found that the constructed mathematical model for the alignment of semi-finished products is satisfactorily adequate. The created mathematical model made it possible to improve the characteristics of the robotic arm and calculate the effective parameters of the automation system for leveling chilled semi-finished products.

Keywords: vibration impact, packaging of semi-finished products, food production, mathematical modeling, robotics, automatic control systems.

Поступила в редакцию/received: 24.10.2022; после рецензирования/ revised: 11.11.2022;
принята/accepted: 24.11.2022

УДК 004.853

АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ *

Р.Н. ЧИРКОВ, д-р мед. наук, О.Н. БАХАРЕВА, канд. мед. наук,
Н.П. ЛОПИНА, канд. хим. наук, Г.Е. БОРДИНА, канд. биол. наук,
Г.С. ПАРШИН, студент

Тверской государственной медицинской университет,
170100, Тверь, ул. Советская, 4, e-mail: nadezhda_lopina@mail.ru

© Чирков Р.Н., Бахарева О.Н., Лопина Н.П.,
Бордина Г.Е., Паршин Г.С., 2023

Статья посвящена анализу наиболее важных для повышения качества медицины и уровня здравоохранения направлений применения машинного обучения – одной из технологий искусственного интеллекта. Отмечается, что машинное обучение особенно эффективно при решении определенного ряда отраслевых задач (от разработки лекарств до прогнозирования заболеваний человека), выявленного в ходе исследования. В качестве критерия экспертного анализа информации о применении машинного обучения использовано мнение специалистов о достигнутом положительном эффекте. Делается вывод, что главная особенность реализации данной технологии в медицине в настоящее время связана с рисками точного прогнозирования результатов применения искусственного интеллекта.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, медицина, здравоохранение.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-70-79

ВВЕДЕНИЕ

В отечественной концепции развития искусственного интеллекта (ИИ) одним из главных направлений повышения качества и уровня здравоохранения названо

* Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022, Тверь, Тверской государственной технической университет).