Анциферов С.И., аспирант, инж.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ РАСПОЛОЖЕНИЯ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ ПЛАНЕТАРНОГО СМЕСИТЕЛЯ

anciferov.sergey@gmail.com

В современном строительстве большой популярностью пользуются сухие строительные смеси, используемые для выполнения различных видов работ. Актуальной проблемой производства сухих смесей является соблюдение высокого качества готового продукта, на которое в значительной мере влияет наличие застойных зон в рабочей емкости смесительного оборудования. Была разработана методика расчета траекторий и скорости перемещения перемешивающих цилиндрических стержней планетарного смесителя, позволяющее определить их оптимальное расположение, а также оптимальный скоростной режим установки. В результате применения новой методики можно разработать конструкцию планетарного смесителя, позволяющую эффективно устранить застойные зоны в его рабочей емкости за счет оптимального расположения перемешивающих стержней, что приведет к улучшению качества производимых в нем сухих строительных смесей.

Ключевые слова: *сухие строительные смеси, планетарный смеситель, застойные зоны, цилиндрический стержень, параметрическая траектория, скорость перемещения.*

В современном строительстве большой популярностью пользуются сухие строительные смеси (ССС), используемые для выполнения различных видов работ. Широкий ассортимент и высокий спрос вызывают необходимость не только роста объемов производства ССС, но и соблюдение высоких требований к их качеству. Важнейшую роль в получении качественного готового продукта в ходе производства ССС играет смесительное оборудование. Таким образом, разработка новых эффективных видов конструкций смесителей является актуальной инженерной задачей. В данной статье представлена методика расчета движения стержней планетарного смесителя, позволяющая определить эффективность устранения ими застойных зон в рабочей ёмкости для определения наилучшего способа их расположения, а также нахождения оптимального скоростного режима работы установки.

В состав рассматриваемой установки смесителя планетарного типа [1] (рис. 1) входит корпус 8 с крышкой 5, двигатель 2. Двигатель соединён выходным валом 3 с кривошипом 4. На валу кривошипа подвижно закреплена шестерня 6, входящая в зацепление с зубчатым венцом 7, закреплённом на корпусе устройства. На шестерне по спиралевидной кривой жёстко закреплены цилиндрические стержни 9. Загрузка осуществляется через бункер 1, а выгрузка – через выгрузочное устройство 10.

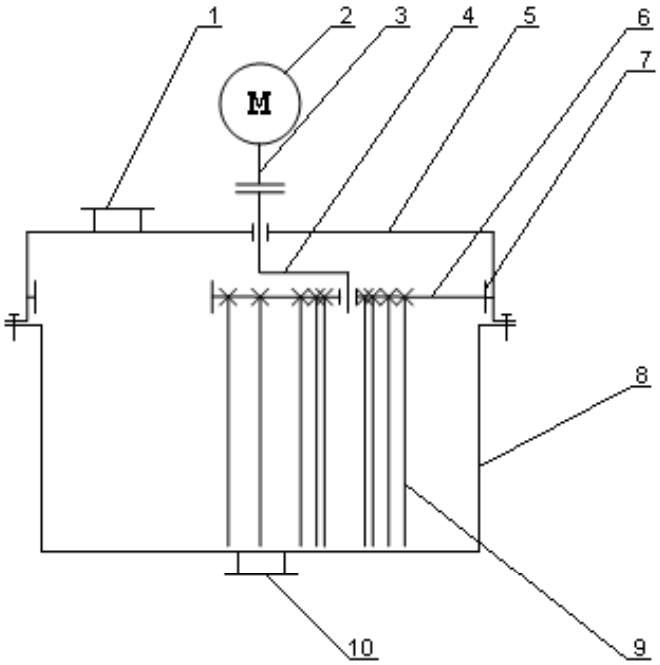

Рис. 1. Продольный разрез устройства

Хотя для стержневых мешалок расположение по спирали и является наиболее оптимальным с точки зрения исключения застойных зон, конструкция смесителя позволяет легко менять как сами стержни, так и их расположение на подвижной части, что позволяет подобрать оптимальную конфигурацию в зависимости от условий производства, в котором будет применяться рассматриваемый смеситель. Скорость движения стержней расположенных на подвижной части будет при необходимости дополнительно регулироваться при помощи созданной SCADA-системы предварительно сконфигурированной ходе экспериментальных исследований [2].

Для нахождения координат установки цилиндрических стержней диаметром d_0 по спиралевидной кривой на плоскости шестерни, которая в свою очередь перекатывается по зубчатому венцу закрепленному на внутренней поверхности цилиндрического корпуса смесителя, введем полярную систему координат r φ с центром в точке 0. Согласно расчетной схеме представленной на рис. 2, уравнение спиралевидной кривой представим в следующем виде:

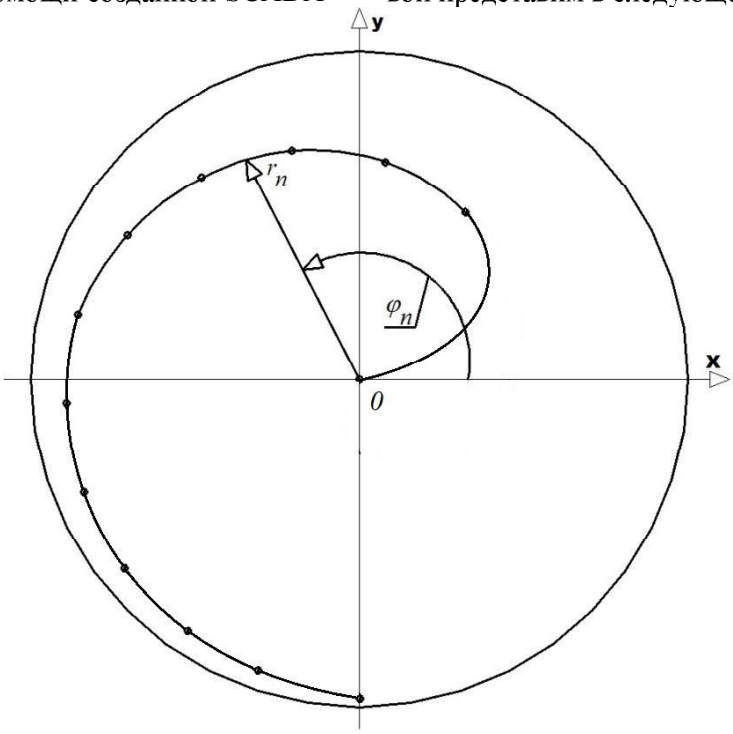

Рис. 2. Расчетная схема для определения координат установки месильных цилиндрических стержней; r_n – радиальное расстояние от начала координат до «n» стержня

$$r_n = a \cdot \varphi_n + r_1, \quad (1)$$

где r_1 – расстояние от начала координат до первого цилиндрического стержня; φ_n – угол, выраженный в радианах, отсчитываемый от положительного направления оси OX до установки цилиндрического «n» стержня.

Для нахождения параметра «a» в формуле (1) нужно воспользоваться граничным условием:
при

$$\varphi_n = \varphi_к; \qquad r = r_k, \quad (2)$$

здесь $\varphi_к$ – угол, выраженный в радианах, который образует последний «$к$» цилиндрический стержень с радиальным размером «r_k».

С учетом (2) выражение (1) принимает вид:

$$r_k = a \cdot \varphi_k + r_1. \quad (3)$$

На основании (3) находим значение параметра «a»:

$$a = \frac{r_k - r_1}{\varphi_к}. \quad (4)$$

Подстановка (4) в (1) приводит к следующему результату:

$$r_n = \frac{r_k - r_1}{\varphi_к} \cdot \varphi_n + r_1, n = 1,2,..k. \quad (5)$$

При равномерном расположении месильных цилиндрических стержней на плоскости подвижной шестерни для углов «φ_n» можно записать следующее соотношение:

$$\varphi_n = n \cdot \frac{\varphi_k}{n_0}, \quad (6)$$

где n_0 – общее число установленных цилиндрических стержней.

В целях избегания образования застойной зоны в центре корпуса смесителя при перемешивании сухих смесей расположим в центре

плоскости подвижной шестерни (нулевой) цилиндрический стержень. Очевидно, он будет иметь следующие координаты:

$$\varphi_0 = 0, r_0 = 0. \quad (7)$$

Таким образом, расположение месильных цилиндрических стержней по спиралевидной кривой (5) и размещение в центре плоскости шестерни дополнительного стержня (7) позволяет избежать при перемешивании сухих смесей образования застойных зон за счет полного охвата объема корпуса смесителя.

В результате перекатывания по зубчатому венцу, закрепленному на внутренней поверхности цилиндрического корпуса смесителя, цилиндрические стержни, расположенные в плоскости подвижной шестерни, будут совершать движение по сложным траекториям, которые получили название гипотрохоид[3].

Параметрическое уравнение траектории по которой движется «*n*» цилиндрический стержень будет определяться следующими соотношениями:

$$x_n = (R_0 - r_0)\cos\varphi + r_n \cos\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\cdot\varphi\right); \quad (8)$$

$$y_n = (R_0 - r_0)\sin\varphi - r_n \sin\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\cdot\varphi\right), \quad (9)$$

где r_0 – радиус круга подвижной шестерни; R_0 – внутренний радиус неподвижной шестерни; φ – определяет изменение угла в плоскости перпендикулярной оси вращения от точки с координатами φ_n, r_n до точки $\varphi_n + 2\pi, r_n$.

Вычислим длину пути, который проходит «*n*»-ый стержень за один полный оборот подвижной шестерни:

$$L_n = \int_{\varphi_n}^{\varphi_n + 2\pi} \sqrt{(dx_n)^2 + (dy_n)^2}. \quad (10)$$

На основании (8) находим:

$$dx_n = -(R_0 - r_0)\sin\varphi\cdot d\varphi - \frac{r_n}{r_0}(R_0 - r_0)\sin\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right)d\varphi. \quad (11)$$

На основании (9) имеем:

$$dy_n = (R_0 - r_0)\cos\varphi\cdot d\varphi - \frac{r_n}{r_0}(R_0 - r_0)\cos\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right)d\varphi. \quad (12)$$

На основании (11) и (12) находим:

$$(dx_n)^2 = \left[(R_0 - r_0)^2 \sin^2\varphi + 2\frac{r_n}{r_0}(R_0 - r_0)^2 \sin\varphi\cdot\sin\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right) + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{r_n}{r_0}\right)^2 \cdot (R_0 - r_0)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right)\right](d\varphi)^2, \quad (13)$$

$$(dy_n)^2 = \left[(R_0 - r_0)^2 \cos^2\varphi - 2\frac{r_n}{r_0}(R_0 - r_0)^2 \cos\varphi\cdot\cos\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right) + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{r_n}{r_0}\right)^2 \cdot (R_0 - r_0)^2 \cdot \cos^2\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right)\right](d\varphi)^2. \quad (14)$$

На основании (13) и (14) находим:

$$(dx_n)^2 + (dy_n)^2 = \left[(R_0 - r_0)^2 + \left(\frac{r_n}{r_0}\right)^2 \cdot (R_0 - r_0)^2 - 2\frac{r_n}{r_0}(R_0 - r_0)^2 \times \right.$$

$$\left. \times \left[\cos\varphi\cdot\cos\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right) - \sin\varphi\cdot\sin\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right)\right]\right](d\varphi)^2 = (R_0 - r_0)^2 \times \left[1 + \left(\frac{r_n}{r_0}\right)^2 - 2\frac{r_n}{r_0}\cos\left(\frac{R_0}{r_0}\varphi\right)\right]. \quad (15)$$

Подстановка (15) в соотношение (10) приводит к следующему результату:

$$L_n = (R_0 - r_0)\int_{\varphi_n}^{\varphi_n + 2\pi} \sqrt{1 + \left(\frac{r_n}{r_0}\right)^2 - 2\frac{r_n}{r_0}\cos\left(\frac{R_0}{r_0}\cdot\varphi\right)}\cdot d\varphi \quad (16)$$

Интеграл в выражении (16) нельзя вычислить на базе элементарных функций. Значение интеграла (16) можно найти приближенно численными методами.

Величина скорости движения цилиндрических стержней в корпусе рассматриваемого смесителя равна:

$$U_n = \sqrt{U_{x,n}^2 + U_{y,n}^2}\ ; \qquad (17)$$

где

$$U_{x,n} = \frac{dx_n}{dt}; \qquad (18)$$

$$U_{y,n} = \frac{dy_n}{dt}, \qquad (19)$$

проекции скорости движения стержней на оси декартовой системы координат.

С учетом (11), (18) принимает вид:

$$U_{x,n} = -(R_0 - r_0)\sin\varphi \cdot \frac{d\varphi}{dt} - \frac{r_n(R_0 - r_0)}{r_0}\sin\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right)\frac{d\varphi}{dt}. \qquad (20)$$

Подстановка (12) в (19) приводит к следующему результату:

$$U_{y,n} = (R_0 - r_0)\cos\varphi \cdot \frac{d\varphi}{dt} - \frac{r_n(R_0 - r_0)}{r_0}\cos\left(\varphi\frac{R_0 - r_0}{r_0}\right)\frac{d\varphi}{dt}. \qquad (21)$$

Если учесть, что связь между углом поворота φ подвижной шестерни, частотой ω_0 и временем t задается соотношением:

$$\varphi = \omega_0 \cdot t, \qquad (22)$$

тогда формулы (20) и (21) принимают вид:

$$U_{x,n} = -\omega_0\left[(R_0 - r_0)\sin\varphi + \frac{r_n(R_0 - r_0)}{r_0}\sin\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right)\right]; \qquad (23)$$

$$U_{y,n} = \omega_0\left[(R_0 - r_0)\cos\varphi - \frac{r_n(R_0 - r_0)}{r_0}\cos\left(\frac{R_0 - r_0}{r_0}\varphi\right)\right]. \qquad (24)$$

Вычислим:

$$U_{x,n}^2 + U_{y,n}^2 = \omega_0^2(R_0 - r_0)^2\left[1 + \left(\frac{r_n}{r_0}\right)^2 - 2\frac{r_n}{r_0}\cos\left(\frac{R_0}{r_0}\varphi\right)\right]. \qquad (25)$$

Подстановка (25) в (17) позволяет получить следующий результат:

$$U_n = \omega_0(R_0 - r_0)\sqrt{1 + \left(\frac{r_n}{r_0}\right)^2 - 2\frac{r_n}{r_0}\cos\left(\frac{R_0}{r_0}\varphi\right)}. \qquad (26)$$

Представление о характере траекторий движения полых цилиндрических стержней и изменения их скорости дают графики представленные на рис. 3-7. Для следующих значений конструктивных и технологических параметров:

$$R_0 = 0{,}175 \text{ м};\ r_0 = \frac{2}{3}R_0;\ \omega_0 = 5c^{-1}. \qquad (27)$$

График параметрической траектории, по которой совершает движение цилиндрический стержень, расположенный в плоскости подвижной шестерни на расстоянии, r_1=0,023 метра, что в формулах (8), (9) соответствует параметру n = 1, представлен на рис. 3.

График параметрической траектории, по которой совершает движение цилиндрический стержень, расположенный в плоскости подвижной шестерни на расстоянии, r_4 = 0,0437 метра, что в формулах (2.8), (2.9) соответствует параметру n = 4, представлен на рис. 2.4.

График параметрической траектории, по которой совершает движение цилиндрический стержень, расположенный в плоскости подвижной шестерни на расстоянии, r_7 = 0,0644 метра, что в формулах (8), (9) соответствует параметру n = 7, представлен на рис. 5.

График параметрической траектории, по которой совершает движение цилиндрический стержень, расположенный в плоскости подвижной шестерни на расстоянии, r_{10} = 0,0851 метра, что в формулах (8), (9) соответствует параметру n = 10, представлен на рис. 6.

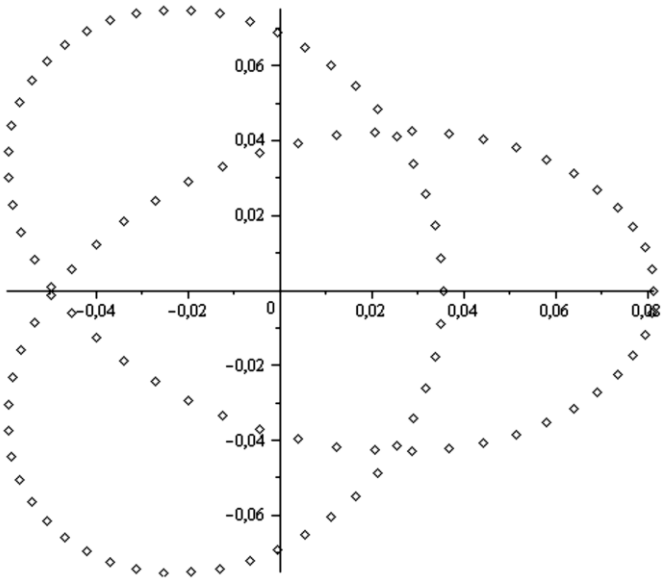

Рис. 3. График параметрической траектории цилиндрического стержня при n = 1

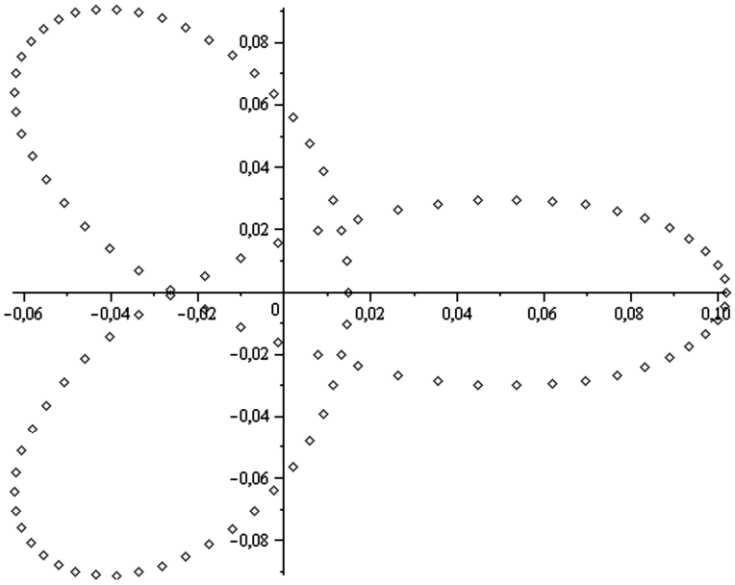

Рис. 4. График параметрической траектории цилиндрического стержня при n = 4

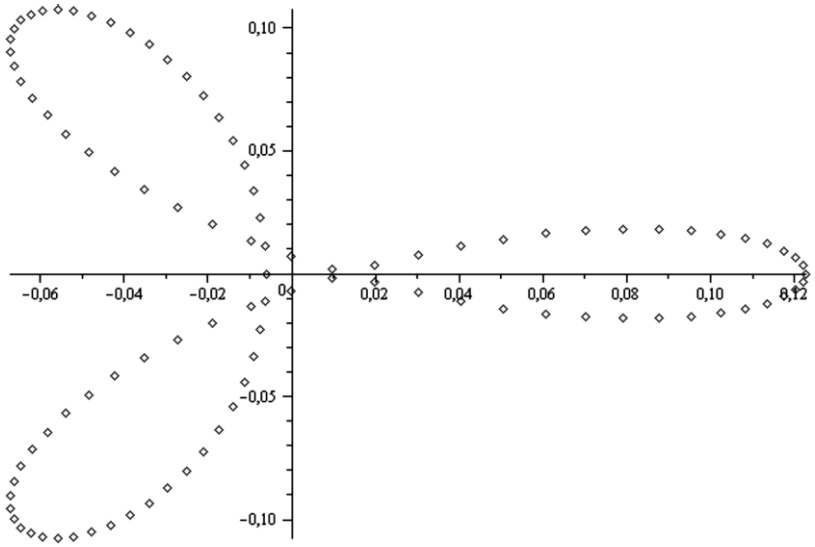

Рис. 5. График параметрической траектории цилиндрического стержня при n = 7

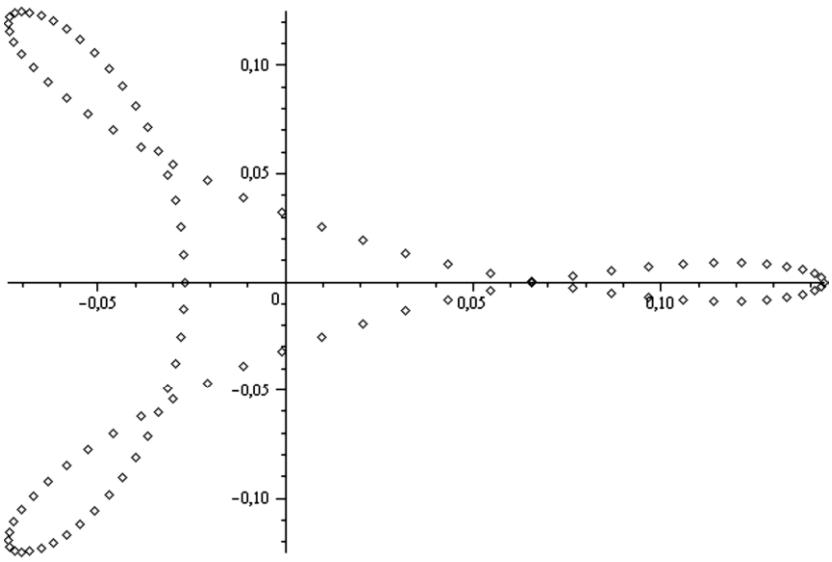

Рис. 6. График параметрической траектории цилиндрического стержня при n = 10

Таким образом, полученные соотношения (8), (9) и (26) определяют траектории и скорости движения цилиндрических стержней в корпусе смесителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 143424 Российская Федерация, МПК B01F7/14. Планетарный смеситель / В.С. Богданов, А.Н. Семернин, С.И. Анциферов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. №2013159270, заявл. 30.12.2013; опубл. 20.07.2014.

2. Богданов В.С., Семернин А.Н., Анциферов С.И., Колесник В.А. Разработка SCADA-системы для управления планетарным смесителем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова №1, 2016 г.: Белгород : Изд-во БГТУ, 2016. С.76–81.

3. Гусак А.А., Гусак Г.М., Е.А. Бричикова Е.А. Справочник по высшей математике. Минск. Изд. ТетраСистемс, 1999. 640с.

Anciferov S.I.

DEFINING OF DISPLACEMENT COORDINATES AND VELOCITY OF PLANETARY MIXER RODS

In modern building industry dry building mixes are widely popular, which are used for a variety of different tasks. The actual problem of dry building mixes production is keeping consistent high quality of produced mixes which is affected in most part by existing stale zones in a working container of mixing equipment. Developed calculation method of trajectories and velocities of mixing cylindrical rods of a planetary mixer allows to find their optimal placement and optimal speed rate of a mechanism. As a result of a new calculation method application it is possible to develop a planetary mixer construction that will allow to effectively eliminate stale zones in its working container by an optimal placement of mixing rods which will lead to quality increase of produced dry building mixes.

Key words: *dry building mixes, planetary mixer, stale zones, cylindrical rod, parametrical trajectory, displacement velocity.*

Анциферов Сергей Игоревич, аспирант, инженер кафедры механического оборудования.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46
E-mail: anciferov.sergey@gmail.com