

УДК 664  
ББК 36.81  
М-74

*Меретуков Заур Айдамирович, кандидат технических наук, докторант кафедры технологии, машин и оборудования пищевых производств Майкопского государственного технологического университета, e-mail: [zamer@radnet.ru](mailto:zamer@radnet.ru);*

*Кошевой Евгений Пантелеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машины и аппараты пищевых производств Кубанского государственного технологического университета, e-mail: [Koshevoi@kubstu.ru](mailto:Koshevoi@kubstu.ru);*

*Следь Николай Иванович, соискатель кафедры машин и аппаратов пищевых производств факультета машиностроения и автосервиса Кубанского государственного технологического университета;*

*Косачев Вячеслав Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств факультета машиностроения и автосервиса Кубанского государственного технологического университета;*

*Верещагин Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов пищевых производств факультета машиностроения и автосервиса Кубанского государственного технологического университета*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ В ТРАНСПОРТЕРЕ СО СПИРАЛЬНЫМ ШНЕКОМ** (рецензирована)

*Статья посвящена изучению структуры потоков в транспортере со спиральным шнеком. Рассмотрена модель движения сыпучего материала в данном транспортере. Основной функцией модели является распределение времени пребывания сыпучего материала в камере транспортера. С помощью данной функции определены основные характеристики структуры потоков, обуславливающие процесс перемешивания сыпучего материала спиральным шнеком в камере транспортера.*

*Ключевые слова: транспортер, шнек, спираль, перемешивание, моделирование.*

*Meretukov Zaur Aydamirovich, Candidate Of Technical Sciences, assistant professor of Technology, Machines and Food Industry Equipment Department, Maikop State Technological University, e-mail: [zamer@radnet.ru](mailto:zamer@radnet.ru);*

*Koshevoi Eugene Panteleevich, Doctor Of Technical Sciences, Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, head of the Department of machines and equipment for food industry, Kuban State Technological University, e-mail: [Koshevoi@kubstu.ru](mailto:Koshevoi@kubstu.ru)*

*Sled Nicholai Ivanovich, seeker of the Department of Machines and Apparatus of Food Production of the Faculty of Mechanical Engineering and Service of the Kuban State Technological University;*

*Kosachev Vyacheslav Stepanovich, Doctor Of Technical Sciences, professor of the Department of Machines and Apparatus of Food Production of the Faculty of Mechanical Engineering and Service of the Kuban State Technological University;*

*Vereshchagin Alexander Gennadievich, Candidate Of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Machines and Apparatus of Food Production of the Faculty of Mechanical Engineering and Service of the Kuban State Technological University.*

## **MODELLING OF FLOW STRUCTURE IN THE SPIRAL AUGER CONVEYORS**

*The article studies the structure of flows in the auger conveyor. A model of the movement of bulk material in the conveyor has been studied. The main function of the model is the time distribution of bulk material in a cell carrier. This function identifies the key characteristics of*

*flow structures, causing the mixing process of granular material in a helical screw conveyor chamber.*

*Keywords: conveyor, auger, a spiral mixing modeling.*

Условия перемешивания материала в транспортере со спиральным шнеком [1] определяются характером и параметрами (средним значением и дисперсией) кривой распределения времени пребывания (РВП) обрабатываемых материалов в рабочем объеме аппарата [2].

Изучение кривых РВП транспортируемого сыпучего материала в транспортере со спиральным шнеком помогает понять состояние потока и позволяет прогнозировать процесс перемешивания.

Подход к моделированию структуры потоков в транспортере со спиральным шнеком заключается в рассмотрении основных особенностей течения потока, которые можно представить в виде следующих зон: идеального вытеснения, идеального смешения, застойного объема и байпасных течений.

В работе [2] показано, что основными параметрами в определении РВП технологической машины с рабочим органом в виде шнека являются две операционные переменные процесса: скорость шнека и величина подачи, при увеличении которых уменьшается время обработки. Из этого следует, что РВП может быть определено по эксплуатационным режимам. В нашем случае эксплуатационный режим изменяется основным фактором – частотой вращения шнека спирали.

Для определения РВП в транспортере со спиральным шнеком была разработана физическая модель структуры потоков, представленная на рисунке 1.

Для описания данной модели воспользуемся методикой, представленной в работе [2].

Соответственно рисунку 1, поток сыпучего вещества  $q$  входит в загрузочный бункер 1, характеризующийся, как реактор идеального вытеснения (РИВ) с объемной долей  $P$ , а затем попадает в камеру транспортера 2. Камера транспортера обеспечивает совокупность потоков, представленную рабочей зоной поверхности спирали – ячейка идеального смешения (ЯИС) с объемной долей:  $(1-d)(1-P)$ . Осевое отверстие в спиральном шнеке 3 образует обменный поток, движущийся в обоих направлениях, между самой ЯИС и застойным объемом. Данный поток имеет объемную долю  $d(1-P)$ . Доля оттока из ЯИС определяется параметром  $b$ , что соответствует величине потока  $bq$ .

Рассмотрим концентрацию на выходе из ЯИС для определения РВП.

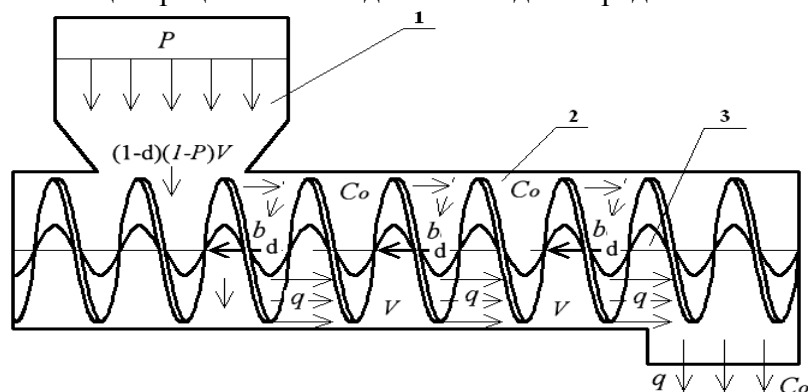


Рис. 1. Физическая модель структуры потоков транспортера со спиральным шнеком

Запишем преобразование Лапласа для описания концентрации на выходе из ЯИС:

$$\bar{C}_0 = Q \frac{d(1-P)\bar{t}S + b}{[1-P\bar{t}S + M_1][1-P\bar{t}S + M_2]}, \quad (1)$$

$$M_1, M_2 = \frac{b + d \pm \sqrt{d + b^2 - 4db(1-d)}}{2d(1-d)}, \quad (2)$$

где:  $b$  – доля потока из ЯИС в застойный объем;  $C_0$  – замеренная концентрация на выходе потока из ЯИС (г/см<sup>3</sup>);  $P$  – доля РИВ;  $d$  – доля застойного объема в ЯИС;  $q$  – объемная величина потока материала продукта (см<sup>3</sup>/с);  $Q$  – количество продукта (г);  $V$  – полный объем экструдера (см<sup>3</sup>);  $\bar{t}$  – среднее время обработки (с):

$$\bar{t} = \frac{V}{q}, \quad (3)$$

Значения РВП могут быть получены в виде дифференциальная  $E(t)$  и интегральной  $F(\Theta)$  функции, при объединении РИВ и застойного объема:

$$E(t) = \frac{M_1 \cdot M_2}{b(1-P)t} u(t) \left[ \frac{dM_1 - b}{M_1 - M_2} e^{\alpha_1} - \frac{dM_2 - b}{M_1 - M_2} e^{\alpha_2} \right], \quad (4)$$

где:

$$\alpha_1 = -\frac{M_1(t - P\bar{t})}{(1-P)\bar{t}}, \quad (5)$$

$$\alpha_2 = -\frac{M_2(t - P\bar{t})}{(1-P)\bar{t}}, \quad (6)$$

$$u(t) = 0, \quad t < P\bar{t},$$

$$u(t) = 1, \quad t \geq P\bar{t},$$

Примем:

$$\Theta = \frac{t}{\bar{t}}, \quad (7)$$

тогда:

$$F(\Theta) = u(\Theta) \left\{ 1 - \left[ \frac{dM_1 M_2 - bM_2}{b(M_1 - M_2)} \exp\left(-\frac{M_1(\Theta - P)}{1-P}\right) - \frac{dM_1 M_2 - bM_1}{b(M_1 - M_2)} \exp\left(-\frac{M_2(\Theta - P)}{1-P}\right) \right] \right\}, \quad (8)$$

$$u(\Theta) = 0, \quad \Theta < P$$

$$u(\Theta) = 1, \quad \Theta \geq P$$

Значения долей: РИВ ( $P$ ), застойного объема ( $d$ ) и доля потока из ЯИС в застойный объем ( $b$ ) могут быть получены из регрессии экспериментальных данных.

Таким образом, может быть описана структура потоков транспортера со спиральным шнеком. Для идентификации представленной модели был проведен однофакторный трехуровневый эксперимент. Определяемыми параметрами, которого явились: масса пробы сырья –  $m$  и масса меченых частиц в пробе –  $m_w$ . Общее количество меченых частиц составляло не более 10% от загружаемой массы сырья.

Фактором эксперимента была выбрана частота вращения шнека спирали  $n$  (об/мин) и соответствующая ей дискретная область применения, состоящая из трех уровней:  $n_{\min} = 4$ ,  $n_0 = 7$ ,  $n_{\max} = 12$ .

Обработка данных, полученных в результате эксперимента, позволила определить характер и значения функции РВП.

Определение долей РИВ ( $P$ ), застойного объема ( $d$ ) и доли потока из ЯИС в застойный объем ( $b$ ) и функции РВП  $F \theta$  проводилось с помощью процедуры «Поиск Решения» в программной среде Excel, реализующей подбор параметров с помощью метода наименьших квадратов Ньютона.

В качестве параметра оптимизации было выбрано среднее значение относительных отклонений ряда расчетных данных, полученных с помощью уравнений (2-8), от экспериментальных, выраженное в %.

В качестве изменяемых параметров были выбраны  $P$ ,  $d$  и  $b$ .

Подбор среднего времени обработки –  $\bar{t}$ , был произведен из условия близости его значения к среднему значению времени эксперимента.

Для определения РВП из экспериментальных данных была построена зависимость  $\mu \Theta$  ..

$$\mu_w = \frac{m_{w_i}}{\sum m_{w_i}} \quad (9)$$

где  $\mu$  – концентрация меченых частиц, выраженная долей меченых частиц в пробе к общей массе меченых частиц

Соотношение значение функции РВП в виде относительного отклонения данных рассчитанных по модельной зависимости  $F \theta$ , при соответствующих параметрах, относительно экспериментальных, а так же средние значения относительных погрешностей для рядов каждого экспериментального уровня представлены в таблице 1.

На рисунках 2-4 представлены зависимости РВП по экспериментальным данным и по модельной зависимости  $F \theta$  уравнения (8).

Как видно из рисунков 2-4 полученные значения модели имеют расхождение с экспериментальными менее 5%. Из этого следует, что функция  $F \theta$ , представленная уравнением (8) позволяет достоверно определять РВП при полученных значениях.

Таблица 1 - Значения функции РВП по экспериментальным и модельным данным зависимости  $F \theta$  (ур. 8)

$n$ , об/мин.	$\Theta$	$\mu_i$	$F_i$	$\delta\mu = \frac{ \mu_i - F_i }{\mu_i}, \%$	$\delta\bar{\mu}, \%$
4	0	0	0	0	2,87
4	0,342173	0	0	0	
4	0,684345	0,35365	0,35365	0	
4	1,026518	0,562721	0,562716	0	
4	1,368691	0,802977	0,812815	1	
4	1,710863	1	0,897597	10	
7	0	0	0	0	2,98
7	0,373865	0	0	0	
7	0,747731	0,447475	0,426131	5	
7	1,121596	0,690656	0,703195	2	
7	1,495462	0,864771	0,846506	2	
7	1,869327	0,901622	0,920615	2	
7	2,243192	1	0,958943	4	

12	0	0	0	0	4,10
12	0,457591	0,047841	0,047841	0	
12	0,915182	0,49825	0,573148	15	
12	1,372773	0,808635	0,808626	0	
12	1,830365	0,929288	0,9142	2	
12	2,287956	1	0,961532	4	

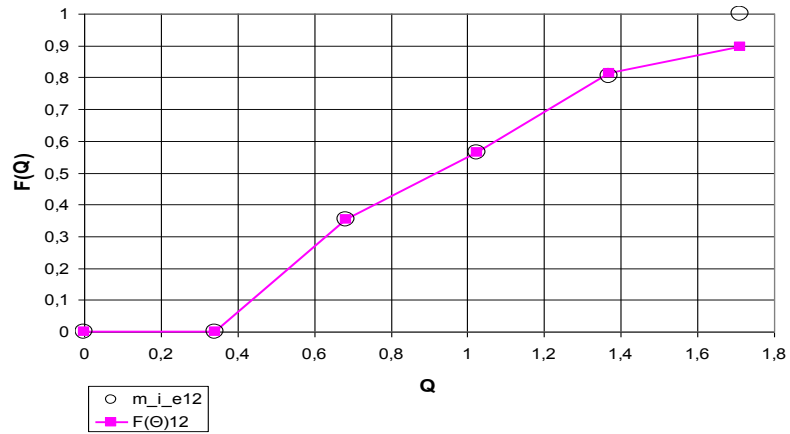


Рис. 2. Соотношение функции РВП по экспериментальным данным и по модельной зависимости  $F \theta$  при  $n_{\min} = 4 \hat{a} / \hat{i} \hat{e} \hat{i}$

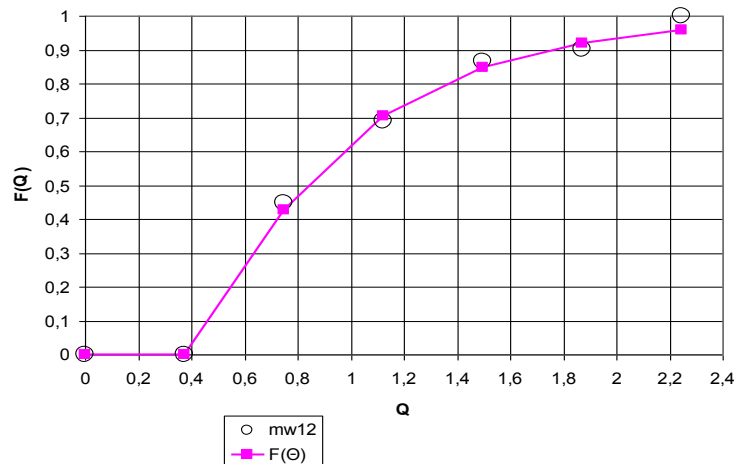


Рис. 3. Соотношение функции РВП по экспериментальным данным и по модельной зависимости  $F \theta$  при  $n_0 = 7 \hat{a} / \hat{i} \hat{e} \hat{i}$

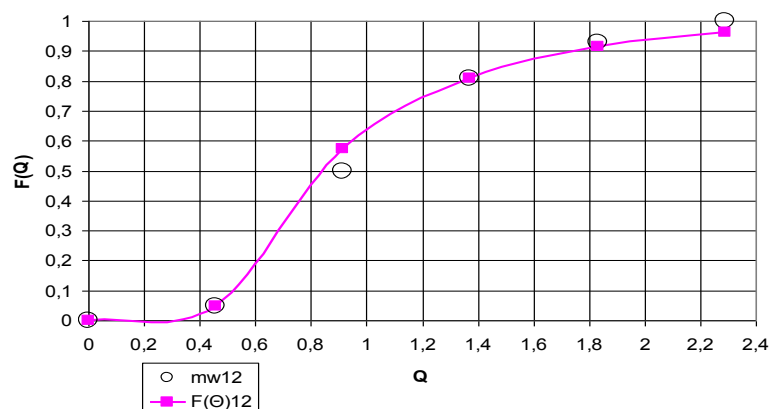


Рис. 4. Соотношение функции РВИ по экспериментальным данным и по модельной зависимости  $F \theta$  при  $n_{\max} = 12 \hat{a} / \hat{i} \hat{e} \hat{i}$

Значения  $P$ ,  $d$  и  $b$  определенные для каждого уровня эксперимента, представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Определенные значения структуры потока

Частота вращения вала спирали		$P$	$d$	$b$
n, об/мин	4	0,45015	0,03192	0,037784
	7	0,434302	0,018596	0,16638
	12	0,429782	0,009997	0,300052

Данные, полученные в результате эксперимента и моделирования, позволяют сделать вывод о том, что  $P$  – доля РИВ уменьшается с увеличением частоты вращения вала спирали  $n$ , об/мин и соответственно осевой скорости спирали. Значения  $d$  – доли застойного объема так же уменьшаются с увеличением частоты вращения вала спирали  $n$ , об/мин, а значение  $b$  – доли потока из ЯИС в застойный объем увеличивается.

Результаты исследований РВИ имеют важное значение для расчета основных конструктивных размеров шнека спирали, рабочей камеры и режимов работы транспортера, а так же расчета и контроля процессов протекающих в нем.

### Литература:

1. Герман Х. Шнековые машины в технологии: пер. с нем. / под ред. М.Л. Фридмана. Л.: Химия, 1975. 230 с.
2. Кошевой Е.П., Меретуков З.А. Меретуков М.А. Экструдеры (теория, конструирование и расчет) / Майкоп. гос. технол. ин-т. Майкоп, 2003. 95с. Деп. в ВИНТИ 30.10.2003, №1893-В2003.