

4. Основные факторы, влияющие на кинетику процесса сушки ферментированного пшеничного сырья / А.В. Прибытков [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья, - 2015. - № 5. – С. 33-35.

УДК 664.6/7

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ФАСОВАННОГО МАЙОНЕЗА**

*Андреев Владимир Николаевич, доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева*

***Аннотация:** Проведен всесторонний анализ процессов производства майонезной продукции. Разработаны операторные модели технологических систем производства фасованного майонеза.*

***Ключевые слова:** майонезы, операторная модель, моделирование, системный анализ, подсистема.*

Майонезная продукция представляет собой многокомпонентную эмульсию прямого типа (масло-вода), устойчивую в широком интервале температур.

В настоящее время при производстве майонезной продукции используются как отечественные, так и зарубежные линии непрерывного и периодического действия, за основной критерий функционирования которых принимается качество готового продукта, зависящее как от рецептурных компонентов, так и от технологических режимов обработки и применяемого аппаратного оформления. Ассортимент изделий майонезного производства весьма разнообразен. Это различные сорта майонезов и майонезных паст. В связи с этим существуют различия в технологическом процессе производства майонезов и используемом при этом оборудовании.

На основе анализа результатов проводимых ранее исследований выяснено [1,2], что комплексных работ по изучению влияния технологических процессов, протекающих на различных участках производства майонезной продукции, качество готовых изделий не проводилось.

В связи с этим необходимо тщательное изучение каждого участка майонезного производства, их взаимосвязей, степени влияния на качество готового продукта, рассматривая технологические линии производства майонеза как системы. Это возможно с применением системных методов исследований [3] с учетом специфики майонезного производства. Исходя из

данных всестороннего анализа технологических процессов производства майонезной продукции построен граф целей и задач системы технологической линии майонезного производства (рис. 1). Это позволило представить любую линию производства майонезной продукции в виде системы, состоящей из 5 подсистем А, В, С, Д и Е.

Исходя из результатов проводимых ранее исследований и на основе анализа процессов производства майонезной продукции выявлено, что на качество готовых изделий наиболее сильное влияние оказывают процессы образования грубой майонезной эмульсии (подсистема С) и гомогенизация эмульсии (подсистема В).

В результате проведенных исследований построены операторные модели технологических систем производства фасованного майонеза. На рис. 2, в качестве примера, представлена структура технологической системы производства майонеза «Провансаль» периодическим способом, которая состоит из следующих подсистем:

Е<sub>1</sub>, Е<sub>2</sub> и Е<sub>3</sub> – подсистемы подготовки растительного масла и сырья для получения майонезной пасты и уксусно-солевого раствора;

Д<sub>1</sub> – подсистема образования майонезной пасты;

Д<sub>2</sub> – подсистема образования уксусно-солевого раствора;

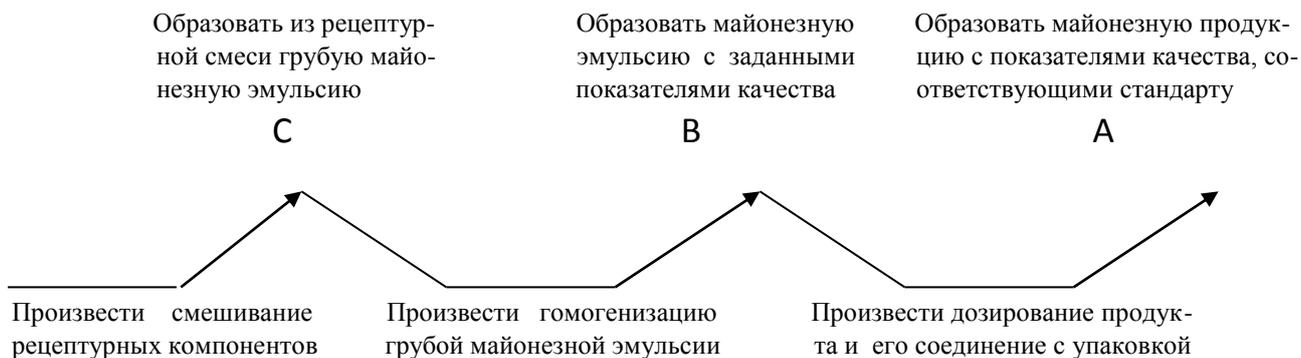
С – подсистема образования грубой майонезной эмульсии;

В – подсистема гомогенизации майонезной эмульсии;

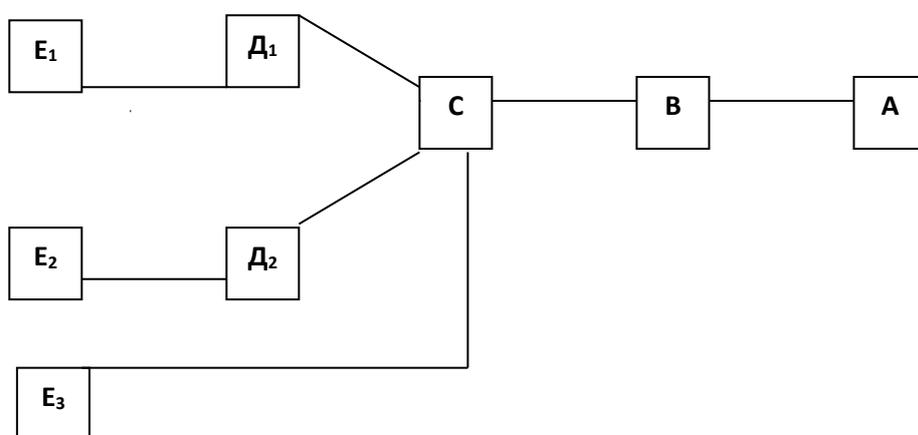
А – подсистема образования готового изделия.

В аспекте решения задачи оптимизации производства фасованного майонеза осуществляется моделирование производственных процессов [1], а также их анализ по критериям качества полуфабрикатов и готовых изделий для выявления «узких» мест в технологических линиях майонезного производства. С этой целью проводится работа по оценке стабильности функционирования технологических линий производства фасованной майонезной продукции.





**Рисунок 1 - Граф целей и задач технологической системы производства майонезной продукции**



**Рисунок 2 - Структура технологической системы производства майонеза «Провансаль» периодическим способом**

### **Библиографический список**

1. Андреев, В.Н. Моделирование процессов формирования структур пищевых полуфабрикатов и формирования готовых изделий./ В.Н.Андреев, Ю.М.Березовский. - М.: ООО «НИПКЦ Восход-А», 2019.-168 с.

2. Березовский, Ю.М. Вискозиметрический и гранулометрический анализ в процессах формирования структур пищевых масс./ Ю.М.Березовский, В.Н.Андреев. - М.: Издательство «Экон-Информ», 2015.-115 с.

3. Панфилов, В.А. Теория технологического потока : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов "Пищевая инженерия" / В. А. Панфилов. - 3-е изд., стер. - Москва : ИНФРА-М, 2019. - 319 с. :

УДК 532.133

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ЖМЫХА В КАМЕРЕ МАСЛОПРЕССА

*Мартеха Александр Николаевич, доцент кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств, ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»*

*Берестовой Алексей Андреевич, старший преподаватель кафедры машин и аппаратов пищевых производств, ФГБОУ ВО «ВГУИТ»*

**Аннотация:** Проведен анализ влияния основных факторов на кинетику процесса прессования семян сафлора в ультразвуковом поле. Выбраны основные факторы, влияющие на кинетику процесса прессования: частота ультразвука, амплитуда ультразвука, давление, создаваемое в зерной камере.

**Ключевые слова:** моделирование, прессование, растительное масло, жмых

Рассмотрим нестационарное изотермическое течение жмыха масляных культур в предматричной камере (рисунок 1). При формовании пищевой массы на шнековом прессе рассматриваемой конструкции возникает проблема сглаживания создаваемой им пульсации потока [1]. В связи с этим одно из основных назначений предматричной камеры маслопресса заключается в постепенном сглаживании перемещающегося потока продукта до его входа в формирующие области матрицы.

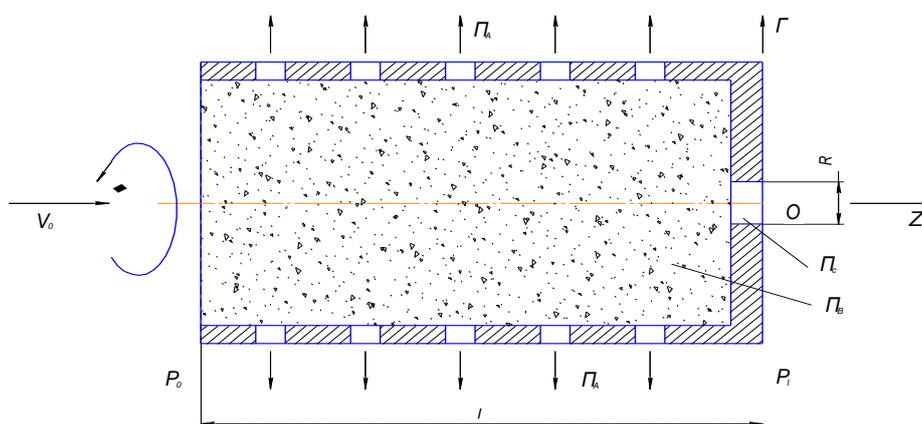


Рисунок 1 - схема разделения потоков при отжиме масла: П<sub>Д</sub> – поток масла; П<sub>С</sub> – поток жмыха; П<sub>В</sub> – формирующаяся пищевая масса; V<sub>0</sub> – скорость потока пищевой массы на входе;

$\omega$  – частота вращения шнека;  $l$  – длина камеры;  $P_0$ ,  $P_L$  – давления на входе и выходе;

$R$  – радиус выходного канала истечения жмыха при формовании.

Вращающийся шнек передает неравномерность подачи сырья в предматричную камеру, в связи с чем появляется пульсация давления в потоке, которая изменяется по гармоническому синусоидальному закону [2].

На участке от 0 до  $\pi$  присутствует синусоидальный закон изменения давления. Это изменение давления соответствует рабочей части витка шнека.

Далее делаем допущение о сбросе избыточного давления, соответствует отсутствующей части витка шнека. Таким образом, пульсация давления является периодической функцией с периодом  $2\pi$ .

$$P(\varphi) = \begin{cases} A \sin(\varphi), & 0 \leq \varphi \leq \pi, \\ 0, & \pi \leq \varphi \leq 2\pi, \end{cases} \quad (1)$$

или

$$P(t) = \begin{cases} A \sin \omega t, & 0 \leq t \leq t_k / 2, \\ 0, & t_k / 2 \leq t \leq t_k, \end{cases} \quad (2)$$

где  $A = |P_0 - P_L|$  - амплитуда пульсации давления;  $P_0, P_L$  - давление на входе и выходе предматричной камеры;  $t_k$  - время одного оборота шнека;  $\varphi = \omega \cdot t$  - фаза;  $\omega$  - угловая частота.

Так как форма предматричной камеры цилиндрическая, будет применяться цилиндрическая система координат. Обозначим ось  $z$  канала по направлению истечения (рисунок 1). Ввиду осевой симметрии окружной скоростью  $V_\varphi$  и производной по координате  $\varphi$  целесообразно пренебречь. Принимаем, что  $V_r \ll V_z$ . Предполагаем, что формуемый пищевой продукт относится к существующей реологической модели, которая описывается «степенным» законом истечения.

Для рассматриваемого истечения с учетом рассматриваемых допущений приведем уравнение перемещения, представленное через параметры тензора напряжений

$$\rho \frac{\partial g_z}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}). \quad (3)$$

Имеющееся уравнение состояния имеет связь между тензором напряжений  $\tau$  и тензором скоростей деформаций

$$\tau = -\eta_a \dot{\gamma}, \quad (4)$$

где  $\eta_a = \eta_a(\dot{\gamma})$  - вязкость степенной жидкости, Па·с;

$\dot{\gamma}$  - тензор скоростей деформаций определяется как

$$\dot{\gamma} = \nabla g + (\nabla g)^T, \quad (5)$$

где  $(\nabla g)^T$ - тензор, транспонированный из  $\nabla g$ ;

$\nabla g$  - тензор градиентов скорости (диадное произведение  $\nabla$  и  $g$ ):

$$\nabla g = \begin{pmatrix} \partial g_r / \partial r & \partial g_\theta / \partial r & \partial g_z / \partial r \\ \partial g_r / \partial \theta & \partial g_\theta / \partial \theta & \partial g_z / \partial \theta \\ \partial g_r / \partial z & \partial g_\theta / \partial z & \partial g_z / \partial z \end{pmatrix} \quad (6)$$

Единственная ненулевая компонента скорости в рассматриваемом течении – это  $\partial g_z / \partial r$  и тензор скоростей деформаций в соответствии с (4) и (6) принимает вид

$$\dot{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \partial g_z / \partial r \\ 0 & 0 & 0 \\ \partial g_z / \partial r & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Таким образом, определяющее уравнение (4) запишется в виде

$$\tau_{rz} = -\eta_a \dot{\gamma}_{rz}, \quad (8)$$

где  $\dot{\gamma}$  - скорость сдвига, представляющая скаляр и взаимосвязана со 2-ым инвариантом тензора  $\dot{\gamma}$  следующей зависимостью

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} I_2} = \sqrt{\frac{1}{2} (\dot{\gamma} : \dot{\gamma})}, \quad (9)$$

где  $I_2$  – второй инвариант тензора скоростей деформаций

$$I_2 = \dot{\gamma} : \dot{\gamma} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \dot{\gamma}_{ij} \dot{\gamma}_{ji}, \quad (10)$$

где символ «:» означает сумму произведений компонентов тензора скоростей деформации и транспонированного тензора скоростей деформации.

Эмпирическое уравнение степенной жидкости, которая предложена Освальдом-де- Вилем [3], представляет собой аналитическое выражение

$$\eta_a(\dot{\gamma}) = K \dot{\gamma}^{m-1}, \quad = \quad (11)$$

где  $K$ , (Па·с<sup>m</sup>) – обычно называют коэффициент консистенции [72, 73];

$m$  – безразмерный показатель степени.

Подставляя (11) в (8) и учитывая (9), (10) получим определяющее уравнение в виде

$$\tau_{rz} = -K \left| \frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial r} \right|^{m-1} \frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial r}. \quad (12)$$

Подставим выражение (12) в уравнение движения (3), получим

$$\frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left( rK \left( \frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial r} \right)^m \right). \quad (13)$$

Также выведем производную  $dP/dz$  через функцию изменения пульсации

$$\frac{\partial P}{\partial z} = f(t) = \frac{A}{l} \sin(\omega t), \quad (14)$$

где  $A = P_{max} - P_{min}$  – размах пульсации давления, Па;

$l$  – длина матричной зоны, м;

$\omega$  – частота вращения шнека, 1/с.

Подставляем полученное выражение (14) в (13), получим после дифференцирования

$$\frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial t} - \frac{K}{\rho} \left[ m \frac{\partial^2 \mathcal{G}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial r} \right] \left( \frac{\partial \mathcal{G}_z}{\partial r} \right)^{m-1} = -\frac{A}{\rho l} \sin \omega t. \quad (15)$$

Градиент скорости  $\partial \mathcal{G}_z / \partial r$  меняет знак в зависимости от координаты  $r$ , поэтому для областей с разными знаками получаются разные решения.

Приведем уравнение (15) к безразмерному виду, для этого принимаем следующие переменные

$$\mathcal{G} = \frac{\mathcal{G}_z}{\mathcal{G}_{cp}}; \quad \tau = \frac{t}{t_k}; \quad y = \frac{r}{R}. \quad (16)$$

В новых переменных (16) уравнение (15) принимает вид

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \tau} - \frac{1}{\text{Re}^*} \left[ m \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial y^2} + \frac{1}{y} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial y} \right] \left( \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial y} \right)^{m-1} = -Eu^* \sin(\beta \tau), \quad 0 \leq \tau \leq 1, \quad (17)$$

с краевыми условиями

$$\mathcal{G}(r, 0) = 0; \quad \frac{\partial \mathcal{G}(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad \mathcal{G}(1, \tau) = 0, \quad (18)$$

где  $Re^* = \frac{\varrho_{cp} \rho R}{K t_k} \left( \frac{\varrho_{cp}}{R} \right)^{-m}$  - модифицированное число Рейнольдса;

$Eu^* = \frac{A \cdot t_k}{\rho \cdot l \cdot \varrho_{cp}}$  - число Эйлера;

$\varrho_{cp}$  - основная скорость системы;  $\beta = \omega \cdot t_k$  - безразмерная величина частоты вращения шнекового вала.

В связи с значительными трудностями получения аналитического решения задачи прессования он может быть вычислен с использованием одного из численных методов [3, 4].

### Библиографический список

1. Математическое моделирование процесса прессования масличного сырья / В.Н. Василенко [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья, – 2016. № 8. – С. 10-14.
2. Оптимизация процесса прессования семян сафлора в ультразвуковом поле / С.Т Антипов [и др.] // Вестник ВГУИТ, – 2017. - № 1. – С. 40–45.
3. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов. – М.: Бинوم, 2010. – 636 с.
4. Гарифуллин, М.Ф. Численные методы интегрирования дифференциальных уравнений / М.Ф. Гарифуллин. – М.: Техносфера, 2020. – 192 с.

УДК 338.436.33:624.05

### СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ АПК

*Панфилов Виктор Александрович* академик РАН, д.т.н, профессор кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих производств ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,

*Бредихин Сергей Алексеевич* д.т.н, профессор заведующий кафедрой «Процессы и аппараты перерабатывающих производств ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,

Практика прогнозирования, проводимого в интересах перспективного развития технологий в отраслях народного хозяйства, показала, что для повышения эффективности работ необходимо создание систем прогнозирования, позволяющих непрерывно вырабатывать прогнозную