

## Интенсификация теплообмена при ротационной стерилизации упакованных пищевых продуктов

Анатолий Соколенко, Константин Васильковский

**Intensification of heat transfer in a rotary sterilization of packaged foods:** The article discusses issues related to the rotary sterilization of packaged food products. Impact on the product placed in a closed container under conditions of heat treatment in most cases is limited only by heat conduction from the wall of the product container. Mathematically modeling the kinematics of rotary sterilizer, the authors came to the conclusion that the intensification of the process due to kinematics, which are implemented transients, as well as through the use of potential fields of inertial forces.

**Key words:** rotary sterilization, kinematic parameters, process intensification, the forces of inertia, the rotational motion

### ВВЕДЕНИЕ

В технологиях тепловой обработки пищевой продукции, расфасованной в тару, затраты времени на процесс связаны с нагревом до заданной температуры, выдержке при температуре пастеризации (стерилизации) и охлаждением.

Параметры времени нагрева и охлаждения продукции при разных схемах обработки приведены в соответствующих формулах пастеризации и стерилизации [1, 2]. Очевидно, что с увеличением объема упаковки возрастает и время при нагревании и охлаждении продукции. Особенно длительными эти процессы являются для консистентной продукции, у которой конвективный теплообмен ограничен или вовсе отсутствует. В таких условиях нагрев продукции в упаковке осуществляется в основном за счет теплопроводности. Это же относится и к охлаждению упаковок после завершения пастеризации и стерилизации [3, 4].

Повышение скорости этих переходных процессов имеет решающее значение, тем более, что оно важно не только с точки зрения производительности технологического оборудования, но и с точки зрения качественных показателей продукции.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

В последнее время в промышленности для стерилизации консервированной продукции получили широкое распространение стерилизаторы непрерывного действия, осуществляющие вращательное движение вокруг главной оси, получивших название ротоматов. В связи с этим важна ориентация плоскости вращения. Так при горизонтальной ориентации последней, влияние инерционной составляющей и сил притяжения стабилизируются (рис. 1).



Рис. 1. Схема к определению силовых факторов при вращении ротора с упаковками

Величина результирующей сил инерции и сил тяжести при этом будет составлять:

$$P_{\text{рез}} = \sqrt{P_i^2 + (mg)^2} = \sqrt{m^2 \omega^4 r^2 + m^2 g^2} = m \sqrt{(\omega^2 r)^2 + g^2}. \quad (1)$$

На процессы, имеющие место при вращении упаковки накладываются перемещения газовой фазы. Поверхность раздела жидкостной и газовой фаз при

таких условиях примет форму части параболоида, а форма продукта в упаковке остается стабилизированной без признаков механического перемешивания, если угловая скорость  $\omega$  и радиус вращения  $r$  останутся неизменными.

Дестабилизация объема продукта возможна только за счет изменения величины и направления результирующей сил инерции. Такому условию соответствует наличие углового ускорения  $\varepsilon$  ротора стерилизатора, т.е.  $\omega \neq \text{const}$ . При этом полное ускорение упаковки будет состоять из нормальной и тангенциальной составляющих

$$\bar{a} = \bar{a}^n + \bar{a}^t = \omega^2 \bar{r} + \varepsilon \bar{r}. \quad (2)$$

Очевидно, что в последнем условии угловая скорость  $\omega$  может задаваться как функция времени (или угла поворота). Тогда, например,

$$\omega = \omega(\tau); \quad \varepsilon = \frac{d\omega(\tau)}{d\tau}. \quad (3)$$

Если при вращении ротора предусмотреть остановки, то это приведет к наличию переходных режимов. При этом сила инерции исчезает, остается только влияние силы тяжести, что приводит к перераспределению продукта в упаковке. С началом каждого движения генерируется потенциальное поле сил инерции, приводящий продукт к новому положению, то есть наступает режим активного перемешивания. На рис. 2 приведены диаграммы, которыми представлены зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$ ;  $\omega = \omega(\tau)$  и  $\varphi = \varphi(\tau)$  для рассматриваемого случая. При этом время одного цикла составляет величину  $\tau_{\text{ц}}$ , в который входит время рабочего хода  $\tau_p$  и время выстоя  $\tau_{\text{в}}$

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_p + \tau_{\text{в}}, \quad (4)$$

что отражено на рисунке.

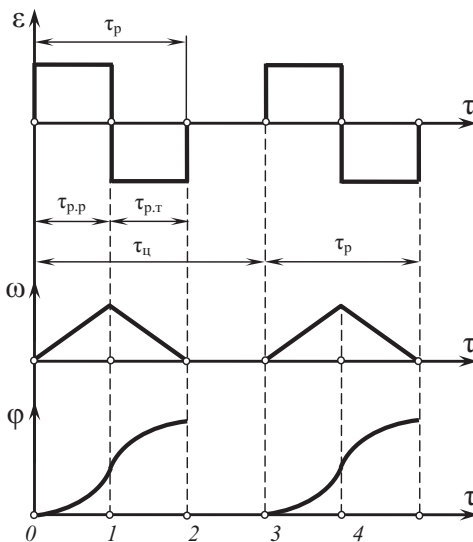


Рис. 2. Кинематические диаграммы перемещения ротора  
В свою очередь время рабочего хода разбивается на две части, а именно на

время разгона  $\tau_{p,p}$  и торможения  $\tau_{p,t}$

$$\tau_p = \tau_{p,p} + \tau_{p,t} . \quad (5)$$

Закон, который соответствует зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  на участке разгона  $\tau_{p,p}$  называется равноускоренным, а на участке  $\tau_{p,t}$  – равнозамедленным. В позициях 0, 1, 2, 3, 4, 5 ... имеет место мгновенное изменение углового ускорения звена, что отвечает мягким ударам. При этом угловая скорость изменяется по линейному закону, а угловое перемещение – по параболическому.

Полное ускорение упаковки определяется по формуле:

$$a = \sqrt{(a^t)^2 + (a^n)^2} = \sqrt{(\varepsilon r)^2 + (\omega^2 r)^2} , \quad (6)$$

а сила инерции, действующая на продукт

$$P_i = ma = m\sqrt{(\varepsilon r)^2 + (\omega^2 r)^2} . \quad (7)$$

Как видим, кинематическое возмущение касается переменной угловой скорости, которое сопровождается изменением силы инерции как по величине, так и по направлению. Изменение направления  $P_i$  определяется увеличением или уменьшением угловой скорости  $\omega$ . Результирующая сил инерции и сил тяжести в этом случае определяется выражением

$$P_{\text{рез}} = \sqrt{P_i^2 + (mg)^2} = m\sqrt{g^2 + (\varepsilon r)^2 + (\omega^2 r)^2} . \quad (8)$$

Итак, интенсификация теплообмена базируется на способах интенсификации массообмена, что требует выполнения одного из двух вариантов:

силы, прикладываемые к объекту должны быть переменными, желательно по величине и направлению;

объект должен изменять свою ориентацию в стационарном потенциальном силовом поле.

Поскольку к последним в наших условиях относятся гравитационное поле и потенциальное поле сил инерции, то именно на основе этих факторов возможна смена гидродинамических режимов продукции в герметизированной упаковке.

Силы инерции и силы тяжести объединяются понятием массовых сил.

Силы тяжести относительно пространственной системы координат, в которой происходит осуществление различных технологических процессов, имеют определенную ориентацию, а потому достичь за их счет интенсификации гидродинамического состояния, тепло- или массообмена возможно при изменении координат объектов манипулирования.

Силовые воздействия на среду при этом зависят только от физических характеристик последнего при стабилизированном потенциале гравитационного поля. В связи с этим указанные воздействия существенно ограничены.

Значительное наращивание интенсификации уровней силовых воздействий, массообмена, гидродинамических действий лежит на пути использования потенциальных полей сил инерции.

Рассмотрим некоторые из случаев, касающихся вращательных движений и за счет которых создаются центробежные силы.

Вращение массива упаковок вокруг главной оси и каждой упаковки вокруг вертикальной оси  $O_1$ , которая не совпадает с его геометрической осью (рис. 3), приводит к существенному изменению поверхности раздела жидкостной и газовой фаз.

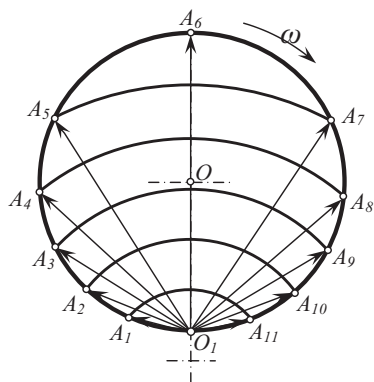


Рис. 3. Схема к случаю асимметричного расположения оси вращения упаковки

В случае с асимметричным расположением оси вращения поверхность раздела фаз будет иметь часть поверхности параболоида. Несимметричность последней относительно упаковки дает возможность влияния на гидродинамическое состояние объема среды. Следствием совмещения двух вращательных движений будет образование бегущей волны по поверхности жидкой фазы с дополнительным радиальным и круговым перемешиванием.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при вращении цилиндрической упаковки вокруг оси симметрии в переходном режиме, когда угловая скорость изменяется от нуля до установившегося значения происходит изменение формы объема продукта, то есть имеет место перераспределение массы в радиальном направлении. После стабилизации угловой скорости такое перераспределение прекращается и форма объема продукта стабилизируется. За счет сил трения между оболочкой и продуктом происходит раскрутка массы продукта и эффект интенсификации теплообмена существенно снижается. Остановка же упаковки или даже реверсирование ее направления вращения снова обеспечивают интенсивный теплообмен. То есть переход к кинематике, в которой реализуются переходные процессы является средством интенсификации, что обеспечивает положительный и ярко выраженный результат.

Значительное наращивание в интенсификации уровней силовых воздействий, массообмена, гидродинамических воздействий и т.п. лежит на пути использования потенциальных полей сил инерции, а так же за счет центробежных сил.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соколенко А.И., Шевченко О.Ю., Піддубний В.А. та ін. Фізико-хімічні методи обробки сировини і стабілізація харчових продуктів. Київ: Люксар, 2009.
- [2] Соколенко А.И., Костін В.Б., Васильківський К.В. та ін. Фізико-хімічні методи обробки сировини та продуктів харчування. Київ: АртЕк, 2000.
- [3] Флауменбаум Б.Л. Основы консервирования пищевых продуктов. Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1982.
- [4] Бабарин В.П. Стерилизация консервов. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2006.

### Для контактов:

Доц., к.т.н. Константин Васильковский, Кафедра технической механики и упаковочной техники, Национальный университет пищевых технологий, г. Киев, Украина, тел.: 044-289-19-04, e-mail: tmpt@nupt.edu.ua

**Доклад рецензирован**