

Черевичная Н.И., Шевченко Е.Е., Винникова В.А.  
Харьковский государственный университет питания и торговли

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОБНОГО ПОЛИСАХАРИДА КСАМПАНА С БЕЛКАМИ ЯЙЦА

### Аннотация

Рассмотрены вопросы использования микробного полисахарида ксампана в качестве пенообразователя и стабилизатора пенных кондитерских масс. Приведен механизм образования стабильной пены за счет добавления поверхностно-активных веществ (ПАВ). Исследован механизм взаимодействия биополимера ксампана с белками яиц путем определения их молекулярно-массовых характеристик. Показано природу структурных изменений простых белков яйца овальбумина и овоглобулина в присутствии микробного полисахарида ксампана при образовании белково-полисахаридных комплексов. Доказана целесообразность использования ксампана в технологии бисквитного теста.

**Ключевые слова:** биополимер, ксампан, пена, овальбумин, овоглобулин

Cherevychna N.I., Shevchenko O.Ye., Vinnikova V.O.  
Kharkiv State University of Food Technology and Trade

## RESEARCH OF INTERACTION OF KSAMPAN MICROBAL POLYSACCHARIDES WITH EGG WHITE

### Summary

The problems of using ksampan microbial polysaccharide as a foaming agent and a foam stabilizer in confectionery masses are researched. A mechanism of forming stable foam by the addition of surfactant substances (surfactants) is provided. The mechanism of interaction between the ksampan biopolymer and egg whites is studied by determining their molecular weight characteristics. The nature of the structural changes of simple egg proteins ovalbumin and ovoglobulin in the presence of ksampan microbial polysaccharide in the formation of protein-polysaccharide complexes is shown. The expediency of using ksampan technology in production of biscuit dough is proved.

**Keywords:** biopolymer, ksampan, foam, ovalbumin, ovoglobulin

УДК 664-404.9:663.865.004.12

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПРЕССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЦУКАТОВ

Черевко А.И., Маяк В.И., Ляшенко Б.В.  
Харьковский государственный университет питания и торговли

Для совершенствования процессов производства цукатов, уменьшения энергетических и материальных затрат на их осуществление, были проведены теоретические исследования, позволившие моделировать деформационные характеристики при производстве цукатов, получаемых по новой технологии. Полученные теоретические зависимости могут быть использованы при расчете и проектировании оборудования для производства высококачественных цукатов.

**Ключевые слова:** цукаты, оборудование, компрессионные характеристики, технология, методика, расчет, реология.

**Постановка проблемы.** Одним из видов механического воздействия в процессе производства цукатов является деформация при одноосном сжатии с различными скоростями [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Деформационные характеристики необходимы при расчете перерабатывающего оборудования.

**Выделение нерешенных ранее вопросов.** В то же время в литературе недостаточно данных для расчета процессов переработки цукатов, производимых по новой технологии, разработанной в Харьковском государственном университете питания и торговли.

**Формулирование целей статьи.** Поэтому, с целью совершенствования этих процессов, уменьшения энергетических и материальных затрат на их осуществление, необходимо было провести подробные экспериментальные и теоретические исследования, позволившие моделировать деформаци-

онные характеристики при производстве цукатов, получаемых по новой предложенной технологии.

**Изложение основного материала исследований.** Для описания деформационного поведения цукатной массы может быть использована реологическая модель П.А.Ребиндера-М.1 на рис. 1 (а). Однако из-за сложности этой модели с достаточной точностью можно использовать упрощенный вариант этой модели М.2 на рис. 1 (б).

Обратимся теперь к анализу деформационного поведения модели М.2 при более сложных режимах нагружения, представляющих практический интерес.

В реальных технологических процессах не приходится встречаться со случаями мгновенного приложения или мгновенного снятия нагрузки. Нагрузка на продукт возрастает в течение некоторого времени с определенной скоростью  $\frac{d\sigma}{dt} = \dot{\sigma}$  (которая сама зависит от времени) и так же постепенно сни-

мается. В первом приближении закон возрастания или убывания внешней нагрузки можно представить линейным  $\pm \dot{\sigma} = const$ . Поэтому рассмотрим деформационное поведение модели М.2 при линейном законе изменения нагрузки  $\sigma(t)$  на рис. 2 (б) Это поведение описывается более сложными соотношениями, чем в случае постоянной нагрузки.

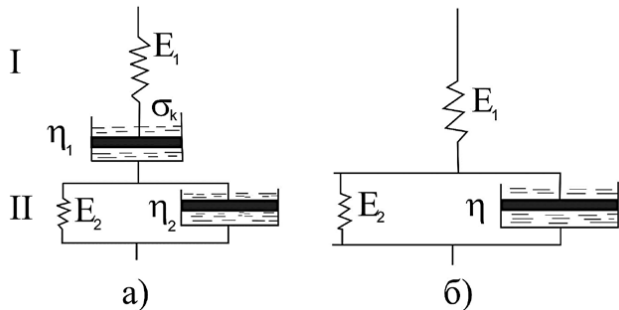


Рис. 1. Общая реологическая модель П.А. Ребиндера М.1 (а); упрощенная модель М.2, для случая  $\sigma$  ( $\sigma_k$ ) (б)

Будем считать, что увеличение  $\sigma$  при нагружении происходит по линейному закону:

$$\sigma = Ct, \tag{1}$$

где

$$C = \dot{\sigma} = const. \tag{2}$$

Величина  $C$  задается технологическими или экспериментальными условиями нагружения.

Решение ранее полученного уравнения для  $\varepsilon_2(t)$  при этом условии дает

$$\varepsilon_2 = const \cdot e^{-\frac{E_2 t}{\eta}} + \frac{C}{E_2} t - \frac{\eta C}{E_2^2}. \tag{3}$$

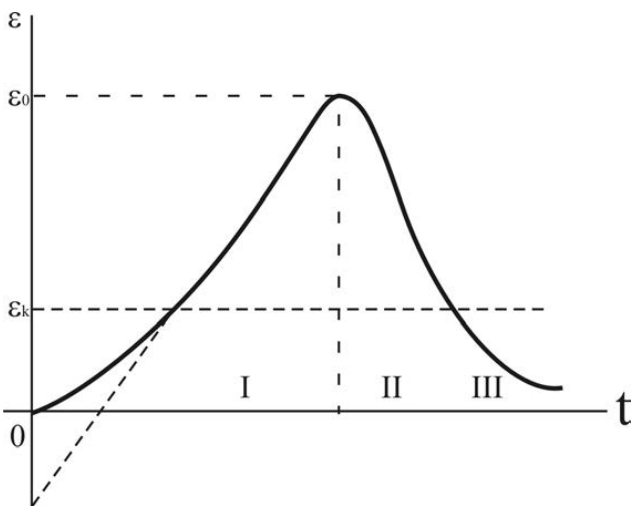


Рис. 2. Деформационное поведение модели М.2 при линейном росте внешней нагрузки (область I), при снятии нагрузки (область II) и после полной разгрузки (область III)

При начальном условии  $\varepsilon_2(t=0) = 0$  имеем,  $const = \frac{\eta C}{E_2^2}$  и вместо (3) получим

$$\varepsilon_2 = \frac{\eta C}{E_2^2} \left( e^{-\frac{E_2 t}{\eta}} - 1 \right) + \frac{C}{E_2} t. \tag{4}$$

Для  $\varepsilon_1$ , находим

$$\varepsilon_1 = \frac{C}{E_1} t. \tag{5}$$

Выражение для полной деформации  $\varepsilon$  принимает вид

$$\varepsilon = \frac{\eta C}{E_2^2} \left( e^{-\frac{E_2 t}{\eta}} - 1 \right) + \left( \frac{C}{E_1} + \frac{C}{E_2} \right) t. \tag{6}$$

Рассмотрим некоторые предельные случаи общего решения (6). При малых  $t$ , когда выполняется условие (1), для  $\varepsilon_2$  находим:

$$\varepsilon_2 = \frac{C}{2\eta} t^2, \tag{7}$$

для полной деформации  $\varepsilon$  имеем

$$\varepsilon_1 = \frac{C}{E_1} t + \frac{C}{2\eta} t^2. \tag{8}$$

Согласно (8), зависимость  $\varepsilon(t)$  в начальной стадии деформирования может иметь вид прямой или параболы 2-й степени. Линейный характер зависимости будет наблюдаться при выполнении условия:

$$\frac{C}{E_1} t > \frac{C}{2\eta} t^2, \tag{9}$$

или

$$t < \frac{2\eta}{E_1}. \tag{10}$$

Это условие будет наверняка выполнено, если  $E_1 \leq E_2$ . При условии (1) имеем  $t < \frac{\eta}{E_2}$ , чему соответствует подстановка величины  $2E_2$ , вместо  $E_1$ , в (10).

Напротив, при условии

$$t > \frac{2\eta}{E_1}, \tag{11}$$

что эквивалентно условию  $E_1 > E_2$ , начальная область зависимости  $\varepsilon(t)$  будет иметь вид квадратичной параболы; при этом «упругая» часть деформации  $\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1}$  мала по сравнению с «неупругой» частью  $\varepsilon_2$ . Этот случай представляет значительный практический интерес, т.к. продукты типа цукатных масс обнаруживают упругие свойства лишь при значительных деформациях.

В другом предельном случае – больших значениях времени  $t$ , когда  $\frac{E_2 t}{\eta} > 1$ , формула (6) принимает вид

$$\varepsilon = \left( \frac{C}{E_1} + \frac{C}{E_2} \right) t - \frac{\eta C}{E_2^2}. \tag{12}$$

Таким образом, при больших значениях  $t$  зависимость  $\varepsilon(t)$  асимптотически приближается к прямой линии с наклоном  $\left( \frac{C}{E_1} + \frac{C}{E_2} \right)$ . Общий характер роста  $\varepsilon$  со временем, при линейном увеличении внешнего напряжения  $\sigma = Ct$ , показан на рис. 2, область I.

Если после достижения некоторого значения внешнего напряжения  $\sigma_0$  и деформации  $\varepsilon_0$ , начать снимать внешнее напряжение со скоростью  $-\dot{\sigma} = C'$ , т.е. задать закон изменения напряжения  $\sigma(t)$  в виде,

$$\sigma = \sigma_0 - C't, \tag{13}$$

то величины  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  будут уменьшаться. Для  $\varepsilon_1$  имеем:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} - \frac{C'}{E_1} t = \varepsilon_{1_0}. \tag{14}$$

где  $\varepsilon_{1_0}$  – начальное значение величины  $\varepsilon_1$  в момент начала разгрузки.

$$\varepsilon_2 = \left( \varepsilon_{2_0} - \frac{\sigma_0}{E_2} - \frac{\eta C'}{E_2^2} \right) e^{-\frac{E_2 t}{\eta}} + \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\eta C'}{E_2^2} - \frac{C'}{E_2} t. \tag{15}$$

Тогда для зависимости полной деформации  $\varepsilon$  от времени в процессе разгрузки находим

$$\varepsilon = \varepsilon_{1_0} + \left( \varepsilon_{2_0} - \frac{\sigma_0}{E_2} - \frac{\eta C'}{E_2^2} \right) e^{-\frac{E_2 t}{\eta}} + \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\eta C'}{E_2^2} - \left( \frac{C'}{E_1} + \frac{C'}{E_2} \right) t. \tag{16}$$

Как ясно видно из (13) разгрузка до условия  $\sigma = 0$  длится в течение времени  $t' = \frac{\sigma_0}{C'}$ . Подставляя  $t'$  в (16), найдем конечное значение деформации  $\varepsilon_k$  в момент полной разгрузки:

$$\varepsilon_k = \left( \varepsilon_{2_0} - \frac{\sigma_0}{E_2} - \frac{\eta C'}{E_2^2} \right) e^{-\frac{E_2}{\eta C'} \sigma_0} + \frac{\eta C'}{E_2^2}. \quad (17)$$

Из формулы (16) видно, что характер зависимости  $\varepsilon(t)$  при разгрузке, в основном, определяется быстротой уменьшения нагрузки  $C'$ ; один из возможных видов зависимости  $\varepsilon(t)$  (при больших  $C'$ ) показан на рис. 2, область II. При  $C' \rightarrow \infty$  («мгновенная» разгрузка) формула (17) дает  $\varepsilon_k \rightarrow \varepsilon_{2_0}$ , так как «упругая» часть снимается мгновенно.

После полного снятия нагрузки ( $\sigma = 0, \varepsilon = \varepsilon_k$ ), деформация продолжает постепенно спадать до нуля («релаксация деформации»), в силу механической обратимости модели М.2. Согласно формуле (17) этот спад происходит по экспоненциальному закону

$$\varepsilon = \varepsilon_2 = \varepsilon_k e^{-\frac{E_2 t}{\eta}}. \quad (18)$$

Это показано на рис. 2, область III.

Полученные формулы полностью описывают деформационное поведение модели М.2 при линейном изменении нагрузки со временем.

Как уже отмечалось выше, особенностью модели М.2, по сравнению с моделью М.1, является отсутствие «истинной» пластической деформации. Если характерное время  $\tau_2 = \frac{\eta}{E_2}$  велико, то модель ведет себя «квазипластическим» образом – «остаточная» (после разгрузки) деформация  $\varepsilon_k$ , согласно формуле (18), не исчезает в течение длительного времени после полной разгрузки. Если же деформация продукта («истинная» пластическая, т.е. механически необратимая деформация) не исчезает в течение сколь угодно большого времени, то для описания свойств такого продукта необходимо применять модель М.1. Для этого достаточно к полученным выше выражениям для полной деформации  $\varepsilon$  модели М.2 прибавить еще третье слагаемое  $\varepsilon_3$ , обусловленное деформацией элемента  $\eta_1$  в модели М.1. Для определения  $\varepsilon_3$  имеем дифференциальное уравнение

$$\sigma - \sigma_k = \eta_1 \dot{\varepsilon}_3. \quad (19)$$

При этом во всех полученных выше формулах необходимо заменить  $\eta_1$  на  $\eta_2$ . Например, при  $\sigma = Ct$  решение (19) имеет вид

$$\varepsilon_3 = \frac{C}{2\eta_1} \left( t - \frac{\sigma_k}{C} \right)^2, \quad t \geq t_0 = \frac{\sigma_k}{C}. \quad (20)$$

Здесь отсчет времени начинается с момента  $t_0$ , когда поршень в элементе  $\eta_1$  приходит в движение. Деформация  $\varepsilon_3$  продолжает возрастать и, при линейном уменьшении  $\sigma$  в процессе разгрузки, сохраняет достигнутое в этот момент значение, являющееся мерой «истинной» пластической деформации. Очевидно, что применение модели М.1 усложняет расчеты и оправдано лишь в немногих случаях.

Рассмотрим еще деформационное поведение модели М.2 при циклическом (знакопеременном) изменении внешнего напряжения с угловой частотой  $\omega$ . Этот случай также представляет практический интерес, поскольку к пищевым массам могут прикладываться повторные нагрузки различных знаков. Представим закон изменения  $\sigma(t)$  в комплексной форме:

$$\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t}, \quad (21)$$

где  $\sigma_0$  – амплитуда внешнего напряжения.

Тогда решение для  $\varepsilon(t)$  можно записать в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)}, \quad (22)$$

где  $\varepsilon_0$  – амплитуда деформации;  $\varphi$  – сдвиг фаз между напряжением и деформацией.

Подставляя (21), (22), после некоторых преобразований, найдем величину  $\varphi$ :

$$\varphi = \arctg \frac{\omega \Delta \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (23)$$

где для сокращения записи введены обозначения:

$$\text{а) } \tau_2 - \tau_1 = \Delta \tau (> 0), \quad \text{б) } \sqrt{\tau_1 \tau_2} \equiv \tau. \quad (24)$$

Зная угол  $\varphi$ , можно рассчитать относительное рассеяние упругой энергии в материале  $\frac{\Delta W}{W}$ , определяющее затраты внешней работы на деформирование, и величину затухания  $Q^{-1}$ , характеризующую внутреннее трение в материале

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} = \sin \varphi. \quad (25)$$

С помощью формулы (25) находим величину  $Q^{-1}$

$$Q^{-1} = \frac{\omega \Delta \tau}{\sqrt{(1 + \omega^2 \tau^2)^2 + (\omega \Delta \tau)^2}}. \quad (26)$$

Формула (26) дает оценку величины затухания  $Q^{-1}$  и относительного рассеяния энергии  $\frac{\Delta W}{W} = 2\pi Q^{-1}$ , что можно использовать для расчетов необходимой мощности оборудования, осуществляющего знакопеременное нагружение при транспортировке пищевого сырья.

Ранее было рассмотрено деформационное поведение модели М.2, при заданном законе изменения  $\sigma(t)$ . Однако, на практике, часто возникает обратная задача – при заданном режиме деформирования  $\varepsilon(t)$  рассчитать необходимый для этого режим нагружения  $\sigma(t)$ . Эту задачу можно решить с помощью того же уравнения (22), симметричного по величинам  $\sigma_1 \dot{\varepsilon}$  и  $\varepsilon_1 \dot{\sigma}$ . При этом получаются результаты, сходные с приведенными выше для  $\varepsilon(t)$ .

Рассмотрим типичный пример. Пусть сжатие пищевой массы осуществляется рабочим элементом машины – штоком, движущимся с постоянной скоростью  $w$ . Тогда материал деформируется с постоянной скоростью деформации  $\dot{\varepsilon}$ , равной:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{h}}{h_0} = \frac{w}{h_0} = \text{const} = C, \quad (27)$$

где  $h_0$  – начальная толщина слоя материала в направлении сжатия.

Тогда для закона деформирования  $\varepsilon(t)$  имеем:

$$\varepsilon = \frac{w}{h_0} t = Ct. \quad (28)$$

Решая уравнение (22) при заданном законе  $\varepsilon(t)$  и начальном условии  $\sigma(t=0) = 0$ , получим закон изменения  $\sigma(t)$  со временем, т.е. искомый режим нагружения

$$\sigma = ECt + \frac{\eta CE^2}{E_2^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right). \quad (29)$$

Рассмотрим предельные случаи. При  $t < \tau_1$  (начальный период нагружения), имеем:

$$\sigma \approx E_1 Ct, \quad (30)$$

при  $t > \tau_1$ , (установившийся режим деформирования), получим

$$\sigma \approx ECt + \frac{\eta CE^2}{E_2^2}. \quad (31)$$

Как указывалось выше, практический интерес представляет случай  $E_1 > E_2$ , когда упругая часть деформации мала, тогда имеем,  $\dot{A} \approx \dot{A}_2 < \dot{A}_1$ , так что наклон прямой  $\sigma(t)$  при больших значениях  $t$  (31) значительно меньше, чем на начальной стадии (30).

Рассмотрим еще поведение модели М.2 при постоянной деформации. Пусть, при достижении некоторой деформации  $\varepsilon_0$  и напряжения  $\sigma_0$ , увеличение деформации (например, движение штока в приведенном выше примере) прекращено, и в дальнейшем будет:  $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$ . Тогда  $\dot{\varepsilon} = 0$ , и получаем:

$$\sigma + \tau_1 \dot{\sigma} = E\varepsilon_0. \quad (32)$$

При начальном условии:  $\sigma(t=0) = \sigma_0$ , решение (34) имеет вид:

$$\sigma = (\sigma_0 - E\varepsilon_0)e^{-\frac{t}{\tau_1}} + E\varepsilon_0. \quad (33)$$

Это выражение описывает релаксацию напряжения от начального значения  $\sigma_0$  до значения  $\sigma_0 = E\varepsilon_0$ , при  $t \rightarrow \infty$ . В частном случае, закон релаксации напряжения принимает более простой вид

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau_1}}. \quad (34)$$

Проведенное рассмотрение достаточно полно описывает деформационное поведение модели М.2 в наиболее интересных, с практической точки зрения, случаях: при линейном и циклическом законах изменения нагрузки и при постоянной деформации. В полученные формулы входят параметры  $E_1, E_2, \eta$ , которые могут быть определены экспериментальным путем.

**Выводы из исследования и перспективы.** Таким образом полученные теоретические зависимости могут быть использованы при расчете и проектировании оборудования для производства высококачественных цукатов.

#### Список литературы:

1. Белопольский М. С. Исследование деформационного поведения глиняной массы в условиях одноосного сжатия / М. С. Белопольский // Коллоидный журнал. – 1964. – Т. 26, в. 5. – С. 555–559.

**Черевко О.І., Маяк В.І., Ляшенко Б.В.**

Харківський державний університет харчування та торгівлі

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПРЕСІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК В СКЛАДНИХ РЕЖИМАХ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЦУКАТІВ

#### Анотація

Для вдосконалення процесів виробництва цукатів, зменшення енергетичних і матеріальних витрат на їх здійснення, були проведені теоретичні дослідження, що дозволили моделювати деформаційні характеристики при виробництві цукатів, одержуваних за новою технологією. Отримані теоретичні залежності можуть бути використані при розрахунку і проектуванні обладнання для виробництва високоякісних цукатів.

**Ключові слова:** цукати, обладнання, компресійні характеристики, технологія, методика, розрахунок, реологія.

**Cherevko O.I., Maiak V.I., Liashenko B.V.**

Kharkiv State University of Food Technology and Trade

## STUDY OF COMPRESSION CHARACTERISTICS IN COMPLEX LOAD CONDITIONS IN SUCCADE PRODUCTION

#### Summary

In order to improve the processes of production of succade (candied fruits), reduce energy and material costs for their implementation, there have been carried out theoretical research allowing modeling the deformation characteristics in the production of succade produced by the new technology. The theoretical dependences can be used in the calculation and design of equipment for the production of high quality candied fruit.

**Keywords:** succade, equipment, compression characteristics, technology, methodology, calculation, rheology.