

Упаковывание пищевых продуктов в гибкие материалы

В.Л. Шредер, ПуАО «Укрпластик», А.Н. Гавва, д.т.н., НУПТ, В.Н. Кривошей, к.х.н., ИАЦ «Упаковка», г. Киев

* Продолжение. Начало в № 1 (с. 38–43), 2 (с. 12–16), 3 (с. 23–27), 4 (с. 29–35), 5 (с. 30–35) 2011 г.

Интродукция

В предыдущей статье приведен анализ основных физических и механических свойств жидких продуктов, которые существенно влияют на способ дозирования и фасования, точность формирования дозы и время фасования, а также на качество формирования упаковки. В данной статье приведен анализ физических и механических свойств вязких, пластичных и штучных продуктов. Установлено, что без знания этих свойств сложно выбрать эффективные конструктивные схемы фасовочно-упаковочного оборудования (ФУО) и обеспечить оптимальные режимы упаковывания в гибкие упаковочные материалы (ГУМ) с сохранением начальных показателей качества продукта.

Вязкий продукт — это одно- и многофазные дисперсные системы, физические свойства которых соответствуют аномальной (неньютоновской) жидкости.

Вязкий продукт, как и жидкий, характеризуют такими основными физическими и механическими свойствами: объемный вес и объемная масса, вязкость, поверхностное натяжение, содержание в продукте газов, пенообразующая способность, краевой угол смачивания.

Основной отличительной особенностью вязких продуктов в сравнении с ньютоновскими жидкостями является увеличенное значение коэффициента вязкости. При заданных температуре и давлении он зависит от скорости деформации.

Для вязких продуктов характерно нелинейное течение, обусловленное изменением вязкости, которое может быть вызвано различными причинами:

- ориентацией частиц удлиненной формы дисперсной фазы при течении продукта;
- упругой деформацией частиц и их вращением;
- разрушением частиц, сопровождаемым их укорачиванием;
- уменьшением взаимодействия частиц с потоком жидкости;
- разрушением первоначальной структуры продукта.

У. Уилкинсон [1] предложил реальные жидкости с нелинейной кривой течения поделить на три группы:

- системы, для которых скорость сдвига в каждой точке представляет некоторую функцию напряжения в той же точке;

- системы, в которых связь между напряжением и скоростью сдвига зависит от времени действия напряжения;

- системы, обладающие свойствами как твердого тела, так и жидкости и частично проявляющие упругое восстановление формы после снятия напряжения (вязкоупругие жидкости).

Для неньютоновских жидкостей имеются различные эмпирические и теоретические уравнения, связывающие неньютоновскую вязкость η со скоростью сдвига или напряжением сдвига в случае простого сдвига. Для многих пищевых вязких продуктов можно рекомендовать степенную функцию, которая достаточно точно описывает изменение вязкости для псевдопластичных и дилатантных жидкостей:

$$\eta = \eta_0 \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right|^{n-1} = \eta_0 \left| \frac{\tau}{\tau_0} \right|^{\frac{n-1}{n}}, \quad (1)$$

где $\dot{\gamma}_0$ и τ^0 — соответственно скорость сдвига и напряжение сдвига в произвольно выбранном состоянии;

η_0 — вязкость неньютоновской жидкости в этом же состоянии;

n — индекс течения: ($n = 1$) — ньютоновская жидкость; ($n < 1$) — псевдопластичная жидкость — вязкость уменьшается с увеличением скорости сдвига; ($n > 1$) — дилатантная жидкость — вязкость увеличивается с увеличением скорости сдвига.

Для определения зависимости скорости деформации от напряжения для вязких продуктов в большинстве случаев используют ротационные вискозиметры [2]. Иные свойства вязких продуктов определяют по методикам,

приведенным для ньютоновских жидкостей [3].

Знание физических и механических свойств вязких продуктов дает возможность определить рациональные геометрические, кинематические и силовые параметры дозирующих устройств, а также за счет конструкции устройства фасования и режимов сваривания обеспечить герметичность упаковки.

В табл. 1 приведены некоторые показатели физических свойств вязких продуктов [1].

Пластичный продукт — это многофазная дисперсная система, дисперсной средой которой является жидкость. Модель идеально-пластичного тела Сен-Венана может быть представлена в виде элемента, лежащего на плоскости, с постоянным по величине трением, не зависящим от нормальной силы (рис. 1).

Статический и кинематический коэффициенты трения принимаются равными. Тело не начнет двигаться до тех пор, пока напряжение сдвига не превысит предельного напряжения сдвига. После этого элемент может двигаться с любой скоростью.

Уравнение, описывающее реологию пластичного продукта (уравнение Е. Бингама) можно записать в общем виде:

$$\tau = \tau_m + \eta_{nl} \frac{d\gamma}{dt}, \quad (2)$$

где τ — касательное напряжение сдвига;

τ_m — предел текучести;

η_{nl} — пластичная вязкость;

$\frac{d\gamma}{dt}$ — скорость относительной деформации сдвига.

Пластичный продукт характеризуют такими основными физическими и механическими свойствами: объемный вес и объемная масса, вязкость, прочность при растяжении и сжатии, предельное напряжение сдвига, адгезионное давление, сила внешнего трения.

Физические свойства

Объемный вес и объемная масса определяются по ГОСТу 3900-47 [3]. Так как в пластичных продуктах дисперсионной средой является жидкость, то при изменении температуры изменяется ее объем. Это приводит к изменению объемного веса и объемной массы. При фасовании продукции, температура которой выше температуры реализации, необходимо вводить поправку на величину дозы, если доза формируется по объему.

Механические свойства

Вязкость пластичной продукции. Определение упруго-пластичных свойств дисперсных пищевых систем по кривым кинетики деформации [3] проводится в основном на ротационном вискозиметре или методом тангенциальносмещаемой пластины на приборе типа Вейлера — Ребиндера. При определении параметров течения пластичных продуктов в ротационном вискозиметре используют зависимость

между пластичной и эффективной вязкостью:

$$\eta_{эф} = \eta_{пл} + \frac{\tau_m}{d\dot{\gamma}} \tag{3}$$

Метод тангенциального смещения пластины дает возможность определять не только τ_m , но и модули упругости, эффективную вязкость, изучать процесс релаксации, а также фиксировать деформационные кривые $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(t)$ при разных скоростях деформации.

На рис. 2 приведена схема сдвигометра С.Я. Вейлера — П.А. Ребиндера. В этом сдвигометре плоскопараллельный зазор расположен вертикально.

Такой сдвигометр бывает двух видов. В первом (рис. 2, а) кювета 1 с продуктом устанавливается неподвижно, в нее устанавливается пластина 2, приводимая в движение грузом 3 при помощи нити, переброшенной через блок. Часть груза уравнивает пластину 2, другая создает рабочую нагрузку. Между пластиной и нитью установлена микрорешетка 4, по которой с помощью катетометра 5 измеряют деформацию. Время отсчитывают по секундомеру. В модификации прибора (рис. 2, б) пластина 2 через микрокрышку 4 прикрепляется к заранее тарированной пружине 5. При опускании кюветы 1 пружина удлиняется, а величина удлинения измеряется катетометром 3.

Напряжение сдвига τ вычисляют по деформации пружины, соответствующей этой деформации при нагрузке P , и боковой поверхности пластины F :

$$\tau = P / 2F. \tag{4}$$

Предельное напряжение сдвига τ_0 , характеризующее прочность структуры исследуемой продукции, определяется по наибольшей нагрузке P_{max} :

$$\tau_0 = P_{max} / 2F. \tag{5}$$

Полученные на сдвигометре основные константы, характеризующие пластичный продукт, дают возможность определить характер их течения в каналах дозатора и фасовочного устройства.

Прочность при растяжении и сжатии.

В тех случаях, когда исследуемый продукт обладает высокой вязкостью и значительной неоднородностью структуры, определяют механические свойства при растяжении и сжатии (модуль упругости, удлинение, мгновенная деформация).

Для исследования растяжения пластичных продуктов используют экстенсограф, в котором цилиндр с продукцией закрепляют горизонтально и деформируют ее силой, направленной вертикально и приложенной в середине. На таком приборе определяют модуль упругости. На рис. 3 представлена схема экстенсографа фирмы «Брабендер». Для проведения исследований цилиндр 1 из продукта помещается в держатель 2 прибора. От перемещения продукт удерживается скобами 3. Рычаг 4 получает движение от электродвигателя 5 и перемещается с постоянной скоростью вертикально вниз, перпендикулярно оси исследуемого цилиндра. Усилия, возникающие при растяжении продукции, через систему рычагов 6 передаются механизму 7, к которому присоединен пишущий рычаг. Регистрирующее устройство 8 включается одновременно с электродвигателем 5. На бумаге вычерчивается кривая растяжения продукта — экстеннограмма. При обрыве жгута из продукции регистрирующее устройство автоматически выключается. Для смягчения колебаний рычажной системы установлен масляный амортизатор 9. Для измерения деформаций одноосного сжатия между параллельными плоскостями используют прибор Б.А. Николаева и А.С. Шпигельгласа (рис. 4). Прибор состоит из станины 1, в которой перемещается опорная стойка столика. Продукция помещается между параллельными плоскостями дисков 2 и 3.

Таблица 1.
Некоторые физические свойства вязких продуктов

Продукт	Вязкость при $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, Па·с·10 ³	Объемная масса при $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, кг/м ³
Сметана жирностью 20 %	63,9–83,6	995
Кефир нежирный	15,7	1002
Простокваша обыкновенная	13,2	1001
Сливки	4,6	996
Пюре из:		
• абрикосов	20,1	1003
• моркови и персиков	14,2	1004
Мед	65,0	1435
Крем:		
• атласный	55,0	911–926
• миндальный	62,0	915–921
• янтарь	25,0	925–927

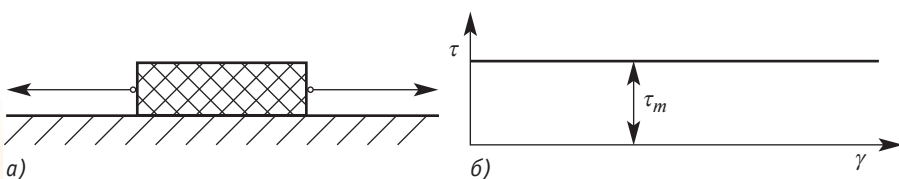


Рис. 1. Схемы представления идеально-пластичного тела: модель (а); реологическая кривая (б)

Верхний из них может перемещаться под действием груза 4, в то же время он связан с рейкой 5, входящей в зацепление с шестерней 6, на оси которой закреплена стрелка 7. Нижний диск 2 имеет возможность перемещаться в вертикальной плоскости при помощи эксцентрика 8. Для проведения опытов на столик укладывают образец продукта и измеряют его первоначальную длину. Затем быстро поднимают столик и устанавливают груз. Определяют величину мгновенной деформации по шкале 9, а также ее изменение, отсчитывая время по секундомеру. На данном приборе можно определить мгновенную упругую деформацию, модуль упругости сжатия, а также вязкость и предельное напряжение сдвига материала.

Предельное напряжение сдвига служит для оценки прочности пластичного продукта. Определяют напряжение сдвига при помощи конического пластометра или пенетromетра. На рис. 5 приведена схема малогабаритного пенетromетра. Прибор состоит из основания 1, на котором закреплены подвижный столик 2 и вертикальная стойка 3. На последней устанавливается скоба 4 с датчиком 5 дифференциально-трансформаторной системы передачи, кронштейном 6 на стойке 7 и блоками 8. Через блоки перебросена нить 9. К одному концу прикреплен подвижный шток 10 датчика 5. На штоке закреплена тарелка 11, служащая для установки дополнительных грузов, и сменная насадка 12. На другом конце нити закреплен груз 13 для уравнивания массы штока с тарелкой и насадкой, в нижней части скобы установлено механическое стопорное устройство 14.

В комплект входят насадки в виде конусов с углами при вершине (в град.): 30, 45, 60, 90, 120, а также в виде дисков.

Величина предельного напряжения сдвига θ вычисляется по максимальному погружению конуса h_{max} в продукт:

$$\theta = k_{\alpha} \frac{P}{h_{max}^2}, \quad (6)$$

где P — нагрузка, действующая на конус;

k_{α} — константа конуса, зависящая только от угла при его вершине:

$$k_{\alpha} = \frac{1}{\pi} \cos^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}; \quad (7)$$

α — угол при вершине конуса.

Значения напряжений растяжения, сжатия и сдвига необходимы для опре-

деления рациональных геометрических, кинематических и силовых параметров дозирующих устройств ФУО. Неправильно подобранные геометрические параметры дозатора (соотношение диаметра мерной емкости и диаметра насадки) могут привести к изменению структуры продукции и перерасходу энергии на перемещение дозы продукции.

Адгезионные и фрикционные характеристики. Адгезия ρ_0 (Па) определяется как

удельная сила нормального отрыва продукта от пластины [4]:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{F_0}, \quad (8)$$

где P_0 — сила отрыва, Н;

F_0 — геометрическая площадь пластины, м².

Отрыв может быть трех видов: по границе контакта (адгезионный), по слою продукта (когезионный) и смешанный (адгезионно-когезионный).

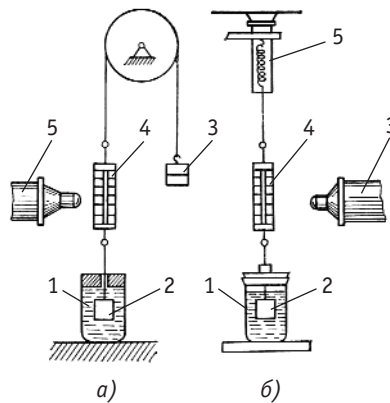


Рис. 2. Схема сдвигометра С.Я. Вейлера — П.А. Ребиндера (а) и его модификация (б)

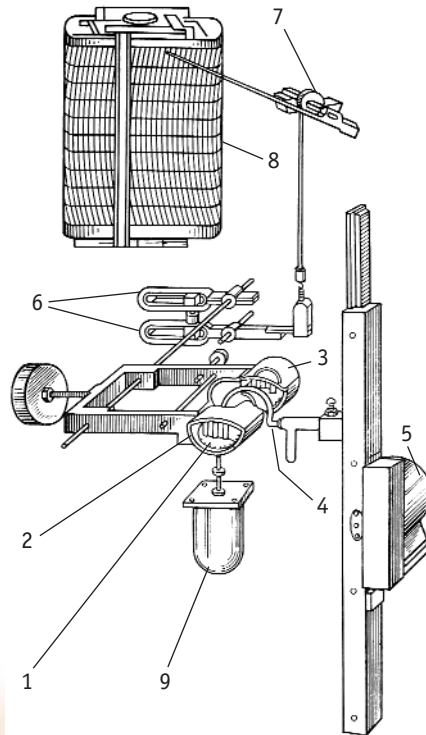


Рис. 3. Схема экстенсографа

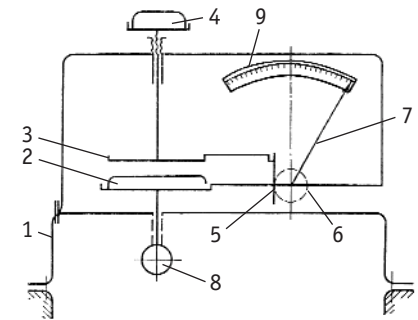


Рис. 4. Схема прибора Б.А. Николаева — А.С. Шпигельгласа для испытания на сжатие

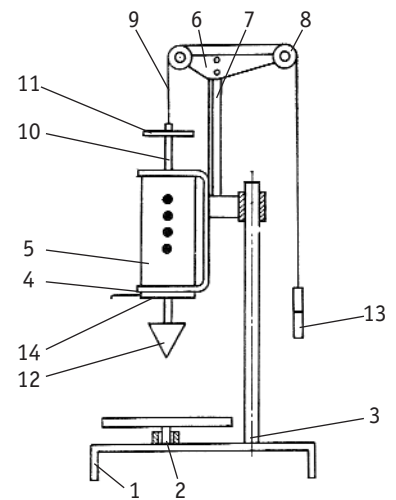


Рис. 5. Схема малогабаритного пенетromетра

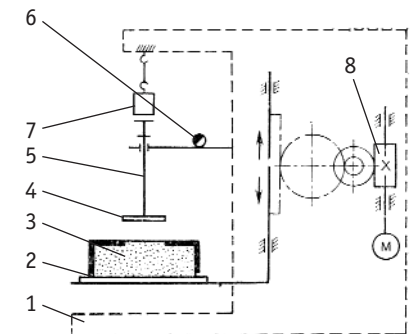


Рис. 6. Схема адгезиометра

Адгезионный отрыв происходит редко, поэтому удельную силу при любом виде отрыва называют липкостью или давлением прилипания.

Липкость определяет величину внешнего трения продукта. Для вычисления силы трения рекомендуют [2] такое уравнение:

$$P_{mp} = \mu_0(P_k + \rho_0 F_0), \quad (9)$$

где μ_0 — истинный коэффициент внешнего трения;

P_k — сила нормальная к поверхности сдвига.

В некоторых случаях оперируют эффективным коэффициентом внешнего трения, который вычисляется:

$$\mu_{эф} = \frac{P_{mp}}{P_k}, \quad (10)$$

или:

$$\mu_{эф} = \mu_0 \left(1 + \frac{P_0}{P_k} \right). \quad (11)$$

Для исследования адгезионных и фрикционных характеристик продуктов наибольшее распространение получили приборы, реализующие нормальный разрыв двух плоскопараллельных дисков, между которыми находится продукт, и касательное смещение продукта по твердой поверхности.

На рис. 6 приведена схема адгезиометра, действующего по принципу отрыва. Адгезиометр состоит из станины 1, подвижного столика 2, камеры для продук-

та 3, диска из исследуемого конструкционного материала 4, штока упора 5, тензометрической балки 6, груза 7 для создания напряжения предварительного контакта и привода с редуктором 8 для вертикального перемещения столика 2. Исследуемый пластичный продукт помещается в камеру, которая устанавливается на подвижный столик. Столик с помощью электродвигателя поднимает камеру с продуктом до соприкосновения с диском из исследуемого материала. Груз необходим для создания напряжения предварительного контакта. По прошествии определенного времени контакта столик с камерой опускается. Усилие отрыва диска через шток передается тензометрической балке.

В табл. 2 приведено адгезионное давление (в КПа) слабомолочной кондитерской помады для различных конструкционных материалов [4].

Высокие значения адгезионного давления продукции влияют не только на силовые параметры дозатора, но и на степень налипания продукции на ГУМ, что усложняет выполнение операций по образованию упаковки.

В табл. 3 приведены некоторые показатели физических и механических свойств пластичных продуктов [1].

Мелкоштучные и штучные продукты. В случае если мелкоштучные продукты дозируются объемным или весо-

вым способами, такие продукты характеризуются физическими и механическими свойствами, характерными для сыпучих продуктов [5]. При поштучном упаковывании мелкоштучных продуктов в потребительскую тару они характеризуются физическими и механическими свойствами, адекватными свойствам штучных продуктов.

Штучные продукты как объекты упаковывания рассматриваются в виде упруго-пластичных тел, причем при выполнении операций упаковывания не должно происходить деформаций продукта. Это условие предопределяет значение внешних нагрузок со стороны рабочих органов ФУО.

Для определения допустимых значений кинематических и силовых параметров рабочих органов ФУО штучные продукты должны характеризоваться следующими физическими и механическими свойствами.

Характерными физическими свойствами штучных продуктов являются: вес изделия, его геометрическая форма и размеры.

Вес изделия измеряется на технических весах и на момент упаковывания является постоянной величиной. Геометрическая форма идентифицируется в соответствии с классификатором геометрических форм штучных изделий (цилиндр, конус, призма и др.). В зависимости от геометрической формы изделия оцениваются разной группой геометрических параметров (длина, ширина, высота, диаметр и др.), которые измеряются миллиметровой линейкой или специальным штангенциркулем.

К характерным механическим свойствам штучных продуктов можно отнести: прочность на растяжение и сжатие, изгиб, смятие и срез, кручение; твердость внешней оболочки продукта, а также статический и кинематический коэффициенты трения. Эти свойства определяются по общепринятым методикам, примеры которых изложены в работе [3]. Знание физических свойств штучных продуктов дает возможность разработать рациональную по форме упаковку, подобрать режимы ее формообразования с обеспечением заданной герметичности, механических свойств — обеспечить целостность продукта при максимальной производительности ФУО.

В табл. 4 [6] приведены некоторые показатели физических и механических свойств мелкоштучных и штучных продуктов.

<i>Таблица 2.</i>	
<i>Адгезионное давление слабомолочной кондитерской помады для различных конструкционных материалов</i>	
Конструкционные материалы	Адгезионное давление, КПа
Металлы	
Сталь:	
• хромированная	53,6
• ст. 3	53,4
• 25	44,8
• 45	38,4
• У8	45,0
ХН78Т	43,8
Бронза Бр. АД9-2А	41,8
Дюралюминий Д-1Т	40,0
Титан	40,0
Полимеры	
ПЭВП	34,0
ПЭНП	29,2
ПС	35,4
ПП	24,0
Фторомат-4	16,2
Силиконовая резина	17,0

Таблица 3.
Некоторые физические и механические свойства пластичных продуктов

Продукт	Предельное напряжение сдвига, Па	Пластичная вязкость, Па·с	Объемная масса при $t = 15\text{ }^\circ\text{C}$, кг/м ³	Истинный коэффициент трения по нержавеющей стали		Эффективная вязкость, Па·с·10 ³
				Статический	Кинематический	
Фарш для:						$\eta_{эф} = \frac{\tau_{сд}}{\dot{\gamma}}$ *
• колбас:						
— любительской	700	18,0–28,0	1050–1060	0,14	0,19	
— докторской	540	16,0–19,0	1050–1060	0,14	0,19	
• сосисок свиных	450	9,0–11,0	1020–1070	0,11	0,14	
• котлет из свинины	400	9,0–14,0	1020–1050	0,12	0,15	
Котлеты из рыбы	780	66,2	1050–1120	0,16	0,21	
Треска фаршированная	540	6,9	1100–1120	0,13	0,17	
Маргарин:						
• сливочный	—	—	886	—	—	7 655
• молочный	—	—	899	—	—	7 689
Творог жирный	60–100	10,0–21,0	1060	—	—	0
Конфетная масса:						
• суфле «Кофейное»	10	8,7	1082	—	—	—
• «Юбилейные»	25	9,3	1247	—	—	—
• «Кара-Кум»	300	27,4	1331	—	—	—
• «Трюфели»	195	5,9	1265	—	—	—

* $\eta_{эф}$ — эффективная вязкость; $\tau_{сд}$ — напряжение сдвига; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвигаТаблица 4.
Некоторые показатели механических и физических свойств мелкоштучных и штучных продуктов

Продукт	Модуль упругости $E \cdot 10^3$, Па	Предельное напряжение растяжения $\sigma_p \cdot 10^3$, Па	Кинематический коэффициент трения по нержавеющей стали	Ударная вязкость, Н/м
Хлеб ржаной обычный формовой	686	65	0,18–0,20	—
Хлеб столовый формовой	387	40	0,16–0,21	—
Батон	106	40	0,16–0,19	—
Хлеб круглый подовый обдирный	117	105	0,18–0,21	—
Печенье:				
• шахматное	20	5	0,31–0,35	168
• сливочное	50	0	0,23–0,24	168
• крокет	50	0	0,21–0,23	518

Как следует из данных табл. 1–4, физико-механические свойства пищевых продуктов при одно- и трехосном действии нагрузки менее изучены, чем вязкостные. Это, видимо, объясняется недостаточным количеством или полным отсутствием серийных приборов для изучения подобного напряженного состояния. В то же время процессы дозирования и фасования протекают при одноосном и объемном деформировании. Незнание физико-механических свойств пищевых продуктов приводит к неэффективному проведению процессов упаковывания.

Литература

1. Реология пищевых масс / К.П. Гуськов, Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин, Л.Н. Лунин. — М.: Пищевая промышленность, 1970. — 280 с.

2. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. — 216 с.

3. Шредер В.Л., Гавва А.Н., Кривошей В.Н. Упаковывание пищевых продуктов в гибкие материалы // Упаковка. — 2011. — № 5. — С. 30–35.

4. Урьев Н.Б., Талейник М.А. Пищевые дисперсные системы. — М.: Агропромиздат, 1985. — 296 с.

5. Гавва О.М., Беспалько А.П., Волчко А.И. Обладания для пакування продукції у споживчу тару. — К.: ІАЦ «Упаковка», 2008. — 436 с.

6. Бурай Ю.В., Сухой Л.А. Определение прочностных и деформативных свойств кондитерских изделий // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1972. — № 5. — С. 18–21.

Пакування харчових продуктів у гнучкі матеріали

В.Л. Шредер, О.М. Гавва, д.т.н., В.М. Кривошей, к.х.н.

У даній статті автори привели аналіз фізичних і механічних властивостей в'язких, пластичних і штучних продуктів. Також вони обґрунтували, що без знань показників фізичних і механічних властивостей цих видів продуктів складно або практично неможливо вибрати ефективну конструктивну схему фасувально-пакувального обладнання та забезпечити оптимальні режими фасування і пакування в гнучкі пакувальні матеріали.

Ключові слова: в'язкий продукт; пластичний продукт; дрібноштучний і штучний продукт, фізичні і механічні властивості; пристрої дозування та фасування.

Packaging of food in flexible materials

V.L. Schreder, A.N. Gava, Dr., V.N. Krivoshey, Ph.D.

The authors have resulted in an analysis of physical and mechanical properties of viscous, plastic and piece products in this article. They also prove that without the knowledge of indicators of physical and mechanical properties of these types of products is difficult or almost impossible to choose an efficient constructive scheme of packing equipment and to ensure optimal conditions in the packing and packaging flexible packaging materials.

Key words: viscous product; plastic product; small sized piece product; physical and mechanical properties; the device of dispensing and filling.