

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) 2011 г.

Интродукция

В предыдущих статьях было выделено три основных компонента: продукт, гибкий упаковочный материал (ГУМ) и фасовочно-упаковочное оборудование (ФУО), которые взаимодействуют в процессе упаковывания пищевой продукции в ГУМ. Авторами было сформулировано определение и выделены отличительные признаки ГУМ, приведена их классификация и дана характеристика физико-химических, санитарно-гигиенических и физических свойств ГУМ с анализом их влияния на функционирование ФУО и качество изготавливаемой упаковочной единицы. В данной статье приведен анализ свойств пищевых продуктов как объектов упаковывания. Как правило, пищевые продукты — это сложные дисперсные системы. В процессе фасования и упаковывания продукции на нее действуют как внешние, так и внутренние нагрузки, которые вызывают деформацию продукта. Для определения рациональных параметров рабочих органов ФУО необходимо знать функциональные зависимости между внешними напряжениями и деформацией, а также основные физико-механические характеристики продукции. К одной из больших и многотоннажных групп пищевых продуктов относят сыпучие продукты. Они многообразны по биологическому и химическому составу и отличаются широким спектром физико-механических свойств. В данной статье приведен анализ основных физико-механических свойств сыпучих продуктов, которые существенно влияют на конструкцию и силовые параметры ФУО, а также на качество упаковывания.

Многообразие пищевой продукции можно классифицировать по значительному ряду признаков. Например, по происхождению, составу, молекулярной структуре, физическим и химическим свойствам и др. [1].

Если рассматривать процессы упаковывания продукции в потребительскую тару исходя из основных операций упаковывания и основных функций, которые должна выполнять упаковка, то пищевые продукты как объекты упаковывания можно классифицировать по двум основным признакам:

- структурно-механическим характеристикам;
- биологическому и химическому составу, который определяет способность пищевого продукта противостоять порче или изменениям показателей его качества.

Структурно-механические характеристики пищевых продуктов

Эти характеристики важны при накоплении, транспортировании и выполнении операций дозирования и фасования, которые характеризуются деформированием и перемещением продукта. В соответствии с общими физическими представлениями, вещества могут находиться в трех состояниях: твердом, жидком и газообразном [2].

Твердое тело при воздействии силы деформируется упруго до наступления текучести или разрушения. При снятии напряжения его деформация исчезает. Величина этой деформации пропорциональна вызывающему ее усилию.

Жидкость под воздействием любого по величине усилия деформируется необратимо, то есть ее деформация носит необратимый характер и имеет место до тех пор, пока действует это усилие.

Особенность газа состоит в том, что он может существовать только в напряженном состоянии — при воздействии внешней силы (давления), ограничивающей его объем. Состояние газа в большей степени характеризуется не деформацией, а интегральной по отношению к ней величиной — объемом.

Изучая реакцию физического тела на воздействие приложенных напряжений и устанавливая связь между напряжениями и вызываемыми ими деформациями, можно определить закономерности реологического поведения, деформационные характеристики, классифицировать продукты по типу поведения при деформировании [1].

Основные структурно-механические характеристики можно классифицировать по характеру приложения к продукту внешних усилий и вызываемым ими деформациям: сдвиговые свойства

проявляются при воздействии касательных усилий; компрессионные — при воздействии нормальных усилий; поверхностные — при сдвиге или отрыве продукта от твердой поверхности.

В большинстве своем пищевые продукты — это дисперсные многофазные системы, состоящие из твердых, жидких или газообразных веществ, не взаимодействующих друг с другом. Их реологическое поведение может рассматриваться путем синтеза на основе закона деформации диспергированных элементов [1].

В приближенном виде все пищевые продукты обычно разделяют на такие группы:

- сыпучие;
- жидкие;
- вязкие;
- пластичные;
- твердые (штучные);
- комбинированные.

Сыпучие продукты — это среда, которая является сложной физико-механической системой, изменяющей свои свойства в зависимости от напряженного состояния, плотности укладки частиц, влажности и т. д. [3].

Сыпучие продукты состоят из твердых тел различной формы и крупности, промежутки между которыми в сухих продуктах заполнены воздухом (газом),

во влажных — воздухом и влагой, частично вытеснившей воздух.

Решение вопроса о распределении внутренних сил в среде, являющейся сочетанием твердых тел, жидкостей и газов, представляет значительные трудности. Поэтому для определения деформационных свойств продукции принимают такие допущения [4]:

- продукт состоит из частиц столь малых по сравнению с размерами емкости, содержащей продукт, что может рассматриваться как сплошная среда;
- к продукту прилагаются напряжения, аналогичные понятиям механики сплошной среды;
- в толще сыпучего продукта могут возникнуть напряжение сжатия σ и касательное напряжение среза τ ;
- напряжения σ и τ могут возникать одновременно на одной площадке, выделенной в толще сыпучего продукта, причем они оба связаны функциональной зависимостью;
- частицы, составляющие сыпучий продукт, обладают упругостью;
- частицы сыпучего продукта обладают прочностью, обеспечивающей отсутствие пластических деформаций частиц при наличии напряжений σ и τ ;
- сыпучий продукт обладает одинаковыми механическими свойствами в различных направлениях.

Сплошная среда, обладающая перечисленными свойствами, называется сыпучей средой, ее часть, ограниченную замкнутой поверхностью (например, стенками бункера, дозатора), называют сыпучим телом.

Сыпучий продукт характеризуют такими основными физико-механическими свойствами: гранулометрический состав; объемная масса и объемный вес;

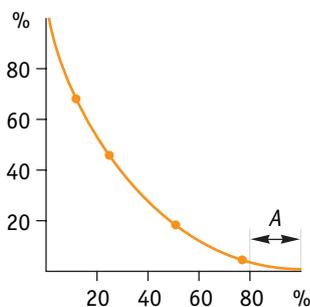


Рис. 1. Графическое изображение гранулометрического состава сыпучих продуктов: А — группа наибольших частиц

угол естественного откоса; твердость частиц; влажность; липкость и др.

Гранулометрический состав сыпучего продукта — это количественное распределение составляющих его частиц по величине. Величина частиц определяется линейными размерами (длина, ширина и толщина). Длина частицы является размером, характеризующим величину частиц.

Гранулометрический состав продукта определяют ситовым анализом — просеиванием пробы последовательно через ряд решет или сит с отверстиями различной величины. Класс фракций определяется размером отверстий в соседних ситах. Процесс просеивания сыпучих продуктов называют грохочением. Для грохочения применяют листовые решета со штампованными отверстиями или проволочные сита (обычно для мелких фракций). Размеры отверстия в ситах в метрической системе определяют в миллиметрах [4]. Результаты ситового анализа обрабатывают в виде графика, характеризующего состав сыпучего продукта по крупности частиц. Ордината графика показывает весовые доли отдельных фракций в процентах, а абсцисса — размеры отдельных фракций пробы в процентах от размера наибольших частиц в общей массе продукта (рис. 1).

Группа частиц размером от максимального a_{max} до $0,8a_{max}$ носит наименование группы наибольших частиц (А).

Если масса группы наибольших частиц составляет меньше 10 % массы пробы, то наибольшей типичной частицей считают частицу размером:

$$a' = 0,8a_{max}. \quad (1)$$

Если же масса группы наибольших частиц превышает 10 % массы пробы, то наибольшей типичной частицей считают частицу размером $a'' = a_{max}$. В этом случае:

$$a'' = a_{max}. \quad (2)$$

Применительно к однородности состава частиц различают сыпучие продукты сортированные и рядовые (в сортированных продуктах $a_{max}/a_{min} < 2,5$, в рядовых $a_{max}/a_{min} > 2,5$). По гранулометрическому составу, определенному ситовым анализом, сыпучие продукты подразделяют на следующие категории: с крупными частицами ($a_{max} > 160$ мм), со средними частицами ($a_{max} = 60–160$ мм), с мелкими частицами ($a_{max} = 10–60$ мм), мелкозернистые ($a_{max} = 0,5–2,0$ мм), по-

рошкообразные ($a_{max} = 0,05–0,50$ мм), пылевидные ($a_{max} < 0,05$ мм).

Пылевидные частицы с наибольшими линейными размерами менее 0,04 мм не могут быть разделены на фракции с помощью просеивания. Для определения состава столь мелких частиц пользуются методами гидравлического анализа, основанного на том, что частицы разной величины имеют различную скорость оседания в воде или воздухе. Существуют и другие методы определения гранулометрического состава сыпучего продукта [5].

Знание гранулометрического состава сыпучего продукта дает возможность правильно выбрать конструктивную схему и геометрические параметры бункера, дозатора, устройства фасования и других узлов упаковочной машины.

Объемная масса и объемный вес. Объемной массой ρ_0 сыпучего продукта называют массу единицы занимаемого им объема. Прибор для определения в лабораторных условиях объемной массы сыпучего продукта (рис. 2) [4] состоит из мерной емкости 1 и штыря 2. При определении объемной массы продукт насыпается в емкость 1 через рамку 3 до ее верха. По окончании заполнения емкости рамка поворачивается вокруг штыря 2 в положение α , причем излишек продукта срезается и падает на поднос 4. Затем рамка снимается со штыря и емкость с продуктом взвешивается. Объемная масса определяется по формуле:

$$\rho_0 = \frac{M_0 - M_1}{V_1}, \text{ кг/м}^3, \quad (3)$$

где M_0 — масса емкости с продуктом, кг; M_1 — масса емкости без продукта, кг; V_1 — объем емкости, м³.

Объемный вес определяется по формуле:

$$\gamma_0 = \rho_0 \cdot g, \text{ Н/м}^3, \quad (4)$$

где g — ускорение сил гравитации, $g = 9,81$ м/с².

По величине объемной массы сыпучие продукты разделяют на: легкие ($\rho_0 < 600$ кг/м³), средние ($\rho_0 = 600–1100$ кг/м³), тяжелые ($\rho_0 = 1100–1200$ кг/м³) и весьма тяжелые ($\rho_0 > 2000$ кг/м³).

В некоторых случаях, особенно при проектировании пневмотранспортных систем, кроме объемной массы сыпучего продукта необходимо знать физический объемный вес твердых частиц, из которых состоит сыпучий продукт. Физическим объемным весом сыпучего

продукта называют средним объемный вес составляющих его частиц. Для определения этого параметра используют стеклянный мерный сосуд. В сосуд насыпают порцию сухого продукта $G_{сп}$, наливают определенный объем $V_{жс}$ жидкости, смачивающей, но не растворяющей частицы продукции. Тщательно перемешивают их и затем определяют по делениям на сосуде объем получившейся суспензии V_c . Искомая величина физического удельного веса сыпучего продукта находится по формуле:

$$\gamma_{ф} = \frac{G_{сп}}{V_c - V_{жс}} \quad (5)$$

Угол естественного откоса. Угол α , образуемый плоскостью естественного откоса сыпучего продукта с горизонтальной плоскостью, называется углом естественного откоса.

Величина угла α зависит от подвижности частиц сыпучего продукта: чем большей подвижностью обладают продукты, тем меньше угол.

Относительная взаимная подвижность частиц сыпучего продукта определяется наличием сил сцепления между отдельными частицами и величиной сил трения, возникающих при перемещении частиц относительно друг друга.

Определение угла естественного откоса проводится различными способами и с помощью различных приборов.

Простейший прибор для определения этого параметра — ящик с застекленными

стенками (рис. 3) [4]. Прибор состоит из ящика 1 с вертикальной задвижкой 2 и со стеклянной передней стенкой. Будучи поставленным на меньшее основание, ящик наполняется сыпучим продуктом примерно на 0,5 емкости. При опрокидывании его на длинную грань продукция располагается под углом естественного откоса α , замеренным с помощью угломера сквозь стеклянную стенку.

На рис. 4 показана схема прибора, который состоит из воронки 1 с задвижкой 2, укрепленных на стержне 3. После заполнения воронки сыпучим продуктом задвижка вынимается и груз высыпается на горизонтальную поверхность площадки 4, падая с высоты h . Угол естественного откоса α замеряется угломером. Угол естественного откоса также легко определяется при помощи полого цилиндра. Продукт насыпается в полый цилиндр, не имеющий нижнего и верхнего дна, поставленный на горизонтальную опорную поверхность. Затем цилиндр медленно и плавно поднимается и высыпавшаяся продукция располагается в виде конуса с образующей, наклоненной к горизонту под углом естественного откоса α .

Угол естественного откоса зависит также от состояния опорной поверхности. Для определения этой зависимости используют две подвижные платформы, расположенные вплотную одна к другой и принудительно удерживаемые в таком положении. Если насыпать на них продукт и предоставить им свободу движения, то под действием внутренних сил в продукции платформы разойдутся и продукт будет высыпаться в образовавшуюся щель. Так как сила сопротивления катка является величиной известной, то угол α , при котором платформы остановятся, опреде-

ляется однозначным образом и, следовательно, будет установлена зависимость α от состояния опорной поверхности.

Влажность. Влага может содержаться в сыпучем продукте: в виде конституционной влаги, химически связанной с твердой составляющей продукта; в виде гигроскопической влаги, впитываемой частицами продукции из окружающего воздуха; в виде внешней влаги, образующей водяную пленку на поверхности частиц сыпучего продукта (молекулярная влага) или заполняющей свободные пространства между частицами (гравитационная влага) [5].

Сыпучие продукты, содержащие внешнюю влагу, называют влажными.

При длительном хранении продукта на открытом воздухе внешняя влага испаряется, а в продукте остается конституционная и гигроскопическая влага. Продукт в таком состоянии называется воздушно-сухим или находящимся в состоянии естественной влажности.

Сыпучий продукт, содержащий лишь конституционную влагу, называется сухим. Влажность определяется высушиванием предварительно взвешенной порции сыпучего продукта в сушильном шкафу при температуре примерно $+105^\circ\text{C}$ в течение 2–4 ч. После высушивания производится повторное взвешивание. Влажность находится как отношение веса испарившейся воды к весу твердых частиц сыпучего продукта по формуле:

$$W = \frac{G_1 - G_2}{G_2} \quad (6)$$

где W — искомая влажность; G_1, G_2 — вес порции продукта соответственно до и после просушивания. От влажности сыпучего продукта зависит подвижность его частиц. Увеличение

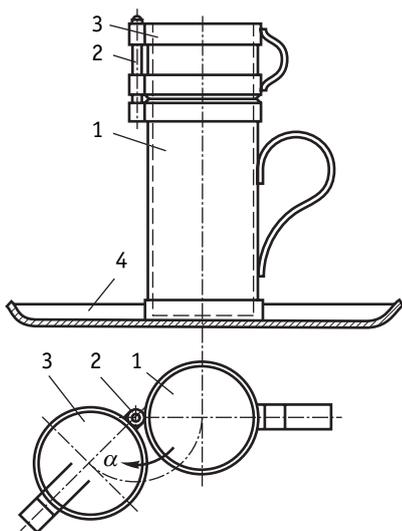


Рис. 2. Прибор для определения насыпной объемной массы сыпучего продукта

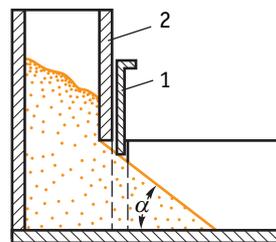


Рис. 3. Прибор с вертикальной задвижкой для определения угла естественного откоса сыпучего продукта

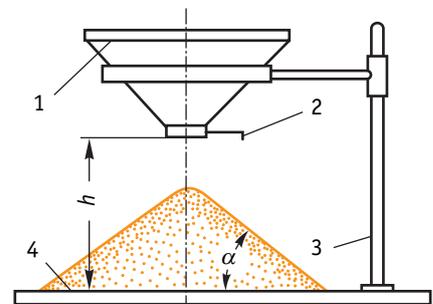


Рис. 4. Прибор с воронкой и горизонтальной задвижкой для определения угла естественного откоса сыпучего продукта

влажности, как правило, ухудшает характеристику истечения сыпучего продукта. Сыпучий продукт с повышенной влажностью обладает большими силами сцепления частиц, что способствует образованию комьев и статических сводов над отверстием воронки бункера. Влажность сыпучего продукта также влияет на коэффициент внутреннего трения, смерзаемость, объемный вес и другие параметры.

Для измерения влажности в потоке продукта используют косвенные методы. Наиболее широко получил распространение электрический метод, а самым точным считается емкостный, основанный на измерении диэлектрической проницаемости сыпучего продукта.

Текучесть. Способность сыпучего продукта вытекать с той или иной скоростью из отверстий называют текучестью. Текучесть зависит от гранулометрического состава материала, формы и размера частиц, коэффициента внутреннего трения, влажности и т. д.

Текучесть сыпучего продукта определяет многие конструктивные особенности бункерных и дозирующих устройств, так как от нее зависит продолжительность операций заполнения и опорожнения емкостей.

Текучесть характеризуют коэффициентом текучности, который можно определить по формуле:

$$K = t(r)^{2,58} / G, \quad (7)$$

где t — время вытекания сыпучего продукта из воронки, с;

r — радиус отверстий воронки, мм;

G — вес продукта, засыпанного в воронку, г.

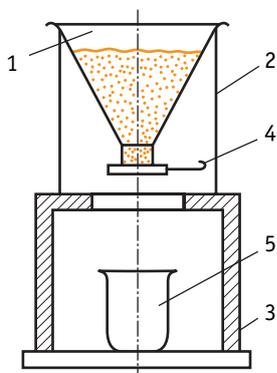


Рис. 5. Схема прибора для определения коэффициента текучности дисперсных сыпучих продуктов

Прибор для определения коэффициента текучности K (рис. 5) состоит из конусной стеклянной воронки 1, закрепленной в стойке 2, опирающейся на подставку 3. Угол конусности воронки равен 60° . Диаметр нижнего отверстия в зависимости от размеров частиц сыпучего продукта составляет 1–7 мм. Трубка воронки срезается на расстоянии 3 мм от нижнего основания конуса и закрывается заслонкой 4.

В воронку при закрытой заслонке насыпают 50–100 г продукта. Открывают заслонку, одновременно включая секундомер. Измеряют время истечения из воронки порции продукта в колбу 5. Затем по формуле (7) находят значение K . Для различных сыпучих продуктов величина K изменяется в пределах от 1,2 до 6,4.

Адгезия. Частицы сыпучего продукта способны прилипнуть к твердым поверхностям бункера, дозатора, воронки, упаковочного материала и др. Это свойство называют адгезией. В процессах смешения, хранения, транспортирования адгезия — вредное свойство сыпучего продукта. Ее необходимо учитывать при конструировании, изготовлении и эксплуатации упаковочного оборудования. Адгезия частиц к твердым поверхностям обусловлена силами, различными по своей природе: молекулярными, капиллярными, электрическими и кулоновскими. Эти силы в большинстве случаев действуют одновременно. Однако в определенных условиях каждая из них может преобладать над другими.

Молекулярные силы адгезии обусловлены ван-дер-ваальсовскими силами взаимодействия молекул частиц сыпучего продукта и материала подложки. Они начинают проявляться еще до непосредственного контакта частиц с поверхностью и зависят от свойств пары контактирующих тел, размера частиц сыпучего продукта, шероховатости подложки, площади контакта.

Молекулярные силы адгезии можно уменьшить:

- лучшей обработкой поверхности подложки (шлифованием, полированием);
- уменьшением размера частиц сыпучего продукта (если это возможно).

Капиллярные силы адгезии возникают при конденсации паров воды из влажного воздуха, находящегося в порах сыпучего продукта, и при наличии пле-

точной влажности продукции. В этих случаях между частицей и подложкой возникает мениск, который силами поверхностного натяжения прижимает частицу к стенке. Капиллярные силы адгезии можно уменьшить гидрофобизацией подложки, то есть превращением ее поверхности в несмачивающуюся по отношению к жидкости, присутствующей в сыпучем продукте. Электрические силы адгезии проявляются только при контакте частиц с подложкой. В условиях перемещения сыпучего продукта его частички трутся друг о друга, о рабочие органы и стенки бункера, лотка, приобретаемая электрический заряд. Знак заряда, его величина при прочих равных условиях зависят от материала частиц и предметов, о которые они трутся. При контакте таких частиц с подложкой наведенные на их поверхности заряды притягивают равные по величине и обратные по знаку заряды, расположенные на поверхности подложки. Это приводит к появлению на границе контактирующих тел контактной разности потенциалов, под действием которой они притягиваются друг к другу. Чем больше контактная разность потенциалов, тем значительнее электрические силы адгезии.

Так, при соприкосновении частиц с полупроводником (окрашенный металл, полимер) возникает контактная разность потенциалов, значительно большая, чем в случае их контакта с проводником (металлы). Этим и объясняется тот факт, что к окрашенным поверхностям оборудования, ГУМ частицы пыли прилипают значительно сильнее, чем к неокрашенным.

Кулоновские силы адгезии возникают при подходе заряженных частиц к поверхности подложки. В этот момент на противоположной стороне подложки возникают заряды, равные по величине заряду частиц, но противоположные по знаку. Кулоновские силы проявляются только при наличии определенного зазора между частицами и подложкой. Чем больше проводимость стенки, тем меньше по величине остаточные кулоновские силы, а следовательно, и силы адгезии. Влага на стенке тоже этому способствует. Составляющие компоненты силы адгезии по-разному зависят от радиуса частиц r . Эта зависимость оценивается следующим образом: для кулоновских сил — $1/r^2$; электрических — $(r)^{2/3}$;

молекулярных — r , капиллярных — $r(1 - r^{x-1})$, где $x > 1$.

В настоящее время для экспериментальных исследований используют следующие способы создания отрывающей силы, которая равна или больше силы адгезии: путем наклона подложки к горизонту, центробежный и вибрационный способы.

При первом способе величину отрывающей силы F_{om} определяют по углу наклона подложки к горизонту, при котором частица начинает двигаться:

$$F_{om} = V(\rho_1 - \rho_2)g \cdot \sin\beta, \quad (8)$$

где V — объем отрывающейся частицы; ρ_1, ρ_2 — объемная масса соответственно частицы и окружающей среды;

β — угол наклона подложки к горизонту. При центробежном способе подложку вместе с частицами вращают, при этом:

$$F_{om} = V(\rho_1 - \rho_2)(\bar{j} + \bar{g}), \quad (9)$$

где \bar{j} — вектор центробежного ускорения;

\bar{g} — вектор ускорения силы тяжести.

При вибрационном способе подложку вибрируют, применяя низкочастотные и высокочастотные колебания, при этом:

$$F_{om} = V(\rho_1 - \rho_2)(\bar{a} + \bar{g}), \quad (10)$$

где \bar{a} — вектор ускорения колебательного движения.

Адгезию также характеризуют величиной v_F (числом адгезии), равной отношению веса частиц, оставшихся на подложке после приложения к ним силы F_{om} , к первоначальному их весу на подложке G_0 :

$$v_F = \frac{G}{G_0} \cdot 100 \%. \quad (11)$$

Число адгезии зависит от приложенной силы отрыва F_{om} .

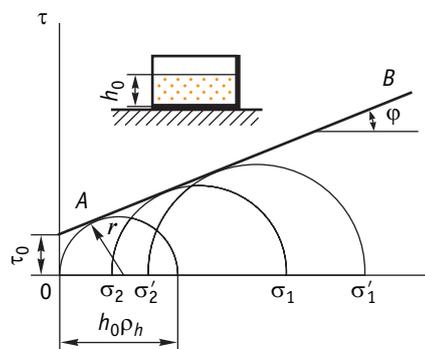


Рис. 6. Зависимость предельных касательных напряжений от нормальных напряжений

Слеживаемость. При длительном хранении без перемещений многие мелкозернистые и порошкообразные продукты способны уплотняться, слеживаться, теряя сыпучесть. Это происходит вследствие перераспределения частиц в слое: мелкие частицы под влиянием незначительных вибраций вклиниваются в зазоры между крупными частицами. Это приводит к увеличению площади контакта между частицами и, как следствие, к росту сил адгезии частиц между собой, которую иногда называют аутогезией.

Слеживаемость повышается с увеличением влажности воздуха, что объясняется увеличением капиллярной силы адгезии.

Оценивают степень слеживаемости сыпучего продукта косвенными методами: по сопротивлению вдавливанию в слой продукта иглы определенного профиля; по сопротивлению разрушению столбика из продукта под нагрузкой. В последнем случае степень слеживаемости оценивается величиной разрушающей нагрузки σ_p , приходящейся на единицу площади испытываемого столбика.

По величине σ_p все сыпучие продукты можно условно разделить на следующие категории слеживаемости: легкая ($\sigma_p < 0,1$ МН/см²); незначительная ($0,1 \leq \sigma_p \leq 0,2$ МН/см²); средняя ($0,2 \leq \sigma_p \leq 1$ МН/см²); сильная ($\sigma_p > 1$ МН/см²).

Уменьшая любыми способами силу аутогезии между частицами, можно снизить степень слеживаемости сыпучего продукта. Наиболее радикальными средствами являются: снижение влажности продукта; увеличение диаметра частиц гранулированием; уменьшение площади контакта между части-

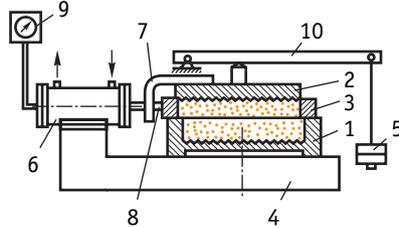


Рис. 7. Схема прибора Э.В. Дженике для определения сопротивления сыпучего продукта прямому сдвигу

цами путем придания им специальной формы; припудривание частиц различными наполнителями; введение в состав продукта частиц гидрофобизирующих веществ.

Предел текучести сыпучего продукта.

При действии на некоторую площадку сыпучего продукта касательного напряжения наступит момент, когда при некотором значении τ_{np} произойдет сдвиг слоев сыпучего продукта в этой плоскости. Это напряжение τ_{np} называют пределом текучести сыпучего продукта.

У идеально сыпучего продукта отсутствуют силы связи между частицами, при $\sigma = 0$ и $\tau_{np} = 0$. У связанного между частицами существующего силы сцепления, поэтому даже при $\sigma = 0$ предельное касательное напряжение имеет место. Величину τ_{np} при $\sigma = 0$ называют начальным сопротивлением сдвигу и обозначают τ_0 .

При сдвиге слоев происходит трение между частицами, поэтому для связанных сыпучих продуктов:

$$\tau_{np} = \tau_0 + \sigma_i \cdot f, \quad (12)$$

где σ_i — нормальное напряжение в слоях продукции;

f — коэффициент внутреннего трения сыпучего продукта, представляющий собой средний коэффициент трения, имеющий место при трении его частиц друг о друга.

Начальное сопротивление сдвигу можно приблизительно определить по формуле:

$$\tau_0 = \frac{h_0 \cdot \rho_h}{4}, \quad (13)$$

где h_0 — предельное значение высоты вертикально стоящего столба сыпучего продукта без поддерживающей стенки (рис. 6) [4];

ρ_h — насыпная объемная масса сыпучего продукта.

Коэффициент внутреннего трения f определяется как $\tan\phi$ где ϕ — угол внутреннего трения сыпучего продукта. Отношение предельного касательного напряжения τ_{np} к соответствующему нормальному напряжению σ называют коэффициентом сопротивления сдвигу f_σ , который можно определить по формуле:

$$f_\sigma = f + \frac{\tau_0}{\sigma}. \quad (14)$$

Для хорошо сыпучих сред угол естественного откоса равен углу внутреннего трения, в связанных же сыпучих

продуктах угол естественного откоса всегда больше, чем угол внутреннего трения.

Сдвиговые силы измеряют на приборе Э.В. Дженике (рис. 7) в такой последовательности. Пробы сыпучего продукта подвергают предварительному уплотнению. Для этого с измерительной камеры 1 снимают крышку 2, а на сдвигаемый цилиндр 3 надевают цилиндрическую обечайку. Затем в измерительную камеру 1 засыпают продукт. Выступающий из обечайки продукт счищают, и на него укладывают крышку 2. Заполненную измерительную камеру устанавливают на специальный уплотнительный станок, где с помощью рычажного механизма на крышку прикладывается вертикальная сила. В уплотнительном стакане может быть установлено до шести измерительных камер. После уплотнения образца с камеры снимают обечайку, а излишек материала счищают. Измерительную камеру с надетой крышкой 2 устанавливают на станину 4 при-

бора. С помощью грузов 5 на крышку 2 прикладывается вертикальная сила. После этого с помощью пневмоцилиндра 6 сдвигаемому цилиндру сообщается сдвигающая сила, деформирующая сыпучий продукт со скоростью 0,09 см/мин. Эта сила распределяется с помощью кронштейна 7 и стержня 8 равномерно между кольцом 3 и крышкой 2. Величина сдвигающей силы увеличивается до тех пор, пока не образуется в массе сыпучего продукта плоскость разрушения. Этот момент фиксируется самописцем манометра 9: после появления плоскости разрушения величина сдвигающей силы остается постоянной, а иногда даже несколько снижается. Предельное касательное напряжение $\tau_{пр}$ определяют по величине, зафиксированной в момент начала движения кольца 2 сдвигающей силы F_{τ} ($F_{\tau} = S \cdot \tau$), где S — площадь поперечного сечения сдвигающего элемента; а нормальное напряжение σ — по величине, приложенной к крышке

вертикальной силы F_{σ} ($F_{\sigma} = S \cdot \sigma$). Изменяя величину F_{σ} и соответствующие ей значения F_{τ} , строят круг Мора, с помощью которого вычисляют значение коэффициента внутреннего трения сыпучего продукта.

Значения предела текучести, начального сопротивления сдвигу, коэффициента внутреннего трения используются при определении скорости перемещения сыпучего продукта и практического значения выпускного отверстия.

В настоящее время имеются классифицированные таблицы сыпучих материалов. Однако нормативные показатели, приведенные в таких таблицах, могут служить для проведения лишь ориентировочных расчетов. Использование нормативных показателей позволяет избежать грубых ошибок при работе и выборе упаковочного оборудования.

В табл. 1, 2 представлена инженерно-технологическая классификация сыпучих продуктов с указанием размера критического выпускного отверстия,

Таблица 1. Инженерно-технологическая классификация сыпучих продуктов

Класс	№ группы	Наименование	Режим переработки	Начальное сопротивление сдвигу, $\tau_0 \cdot 10^2$, Па	Угол внутреннего трения, φ , градусы	Насыпная объемная масса, $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Предельная высота вертикального откоса, $h_c \cdot 10^2$, м	Размер сводообразующего отверстия, $B_c \cdot 10^2$, м
Несвязанные	I	Кусковые, зернистые	—	0	—	—	0	$B_c = (5 \div 7)d_3$
	II	Текучие (фонтанирующие)	—	0	12±18	—	0	
Связаннотекучие	III	Стабильные, неуплотняющиеся	Л	0,77	19	0,25	17	22
			С	1,12		0,27	23	30
			Т	1,67		0,30	31	40
	IV	Слабоуплотняющиеся	Л	1,59	20	0,32	28	36
			С	2,60		0,35	42	56
			Т	4,80		0,50	54	70
Связанные	V	Среднеуплотняющиеся	Л	3,55	22	0,50	41	52
			С	5,80		0,55	61	79
			Т	9,60		0,70	80	100
	VI	Сильноуплотняющиеся, нестабильные	Л	4,70	23	0,60	46	60
			С	9,60		0,70	81	105
			Т	16,0		0,80	120	155

Примечание

Индекс режима	Высота столба продукта, м	Время хранения продукта, ч	Эквивалентное давление столба продукта в емкости, Па	Краткое описание условий переработки
Л — легкий	1,0	2	$\sigma_1 < 10\rho$	Уплотнение продукта практически не происходит
С — средний	1,0–5,0	2–8	$\sigma_1 = (10 \div 56)\rho$	Продукт при хранении слеживается незначительно. Рассыпается под воздействием легких импульсов
Т — тяжелый	5,0	8	$\sigma_1 > 56\rho$	Начало образования жестких связей между частицами. При длительном хранении комкуется. Возможна цементация и полная потеря сыпучести

Таблиця 2.

Взаимосвязь классов сыпучих продуктов с их гранулометрическим составом, объемной массой и сыпучестью

Группа продуктов по гранулометрическому составу	Размер частиц, мм	Объемная масса, кг/м ³	Класс	Группа	Наименование	Описание внешних признаков групп сыпучих продуктов	Сыпучесть
Мелкокусковые	10–50	400–1 500	Несвязанные	I	Кусковые, зернистые	Кусковые и зернистые сыпучие продукты с размером частиц более 3 мм. Масса частиц значительно превосходит силы сцепления между ними	Хорошая
Зернистые	0,5–10,0	300–1 500		II	Текучие (фонтанирующие)	Мелкодисперсные сухие сыпучие продукты. Независимо от степени уплотнения образуют углы естественного откоса, способны к гидравлическому истечению через отверстия, незначительно (в 5–7 раз) превосходящие диаметр частиц	
Порошкообразные	0,05–0,50	200–1 000	Связанно-текучие	III	Стабильные, неуплотняющиеся	Сухие сыпучие порошкообразные продукты, преимущественно со сферическими или окатанными частицами, низким коэффициентом внутреннего трения, практически неуплотняющиеся и не меняющие физико-механических свойств при естественном длительном хранении	Затрудненная
				IV	Слабоуплотняющиеся	Сухие сыпучие порошкообразные и пылевидные дробленые продукты. В рыхлом состоянии текучи, после уплотнения приобретают вязкость. Для разрушения связей требуют сравнительно небольших затрат энергии	
Пылевидные	< 0,05	100–500	Связанные	V	Среднеуплотняющиеся	Пылевидные сыпучие продукты с гранулами вытянутой игольчатой формы, повышенным внутренним трением и сцеплением. Образуют вертикальные откосы и устойчивые своды	Весьма затрудненная
Хлопьевидные	Волокна, чешуйки, хлопья	50–300		VI	Сильноуплотняющиеся, нестабильные	Продукты, легко уплотняющиеся под воздействием собственной массы, преимущественно с гидростатическими связями между частицами, образующие устойчивые откосы и своды значительных размеров	

угла внутреннего трения и начального сопротивления сдвигу [2].

Література

1. Катальмов А.В., Любатович В.А. Дозирование сыпучих и вязких материалов. — Л.: Химия, 1990. — 240 с.
2. Рогинский Г.А. Дозирование сыпучих материалов. — М.: Химия, 1978. — 174 с.
3. Макаров Ю.Н. Аппараты для смешения сыпучих материалов. — М.: Машиностроение, 1973. — 216 с.
4. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А.В. Горбатов, А.М. Маслов, Ю.А. Мачихин и др.; под ред. А.В. Горбатова. — М.: Легкая и пищевая пром-ть, 1982. — 296 с.
5. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. — М.: Машиностроение, 1964. — 245 с. ✓

Пакування харчових продуктів у гнучкі матеріали

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

У даній статті наведено аналіз властивостей харчових продуктів як об'єктів пакування. У процесі фасування та пакування продукції на неї діють як зовнішні, так і внутрішні навантаження, які викликають деформацію продукту. Для визначення раціональних параметрів робочих органів ФПО необхідно знати функціональні залежності між зовнішніми напруженнями і деформацією. У зв'язку з тим що харчові продукти — це, зазвичай, складні дисперсні системи, для оцінювання впливу виду продукції на параметри і конструкцію робочих органів ФПО необхідно знати основні фізико-механічні характеристики продукції. До однієї з великих і багатотоннажних груп харчових продуктів відносять сипкі продукти. Вони різноманітні за біологічним і хімічним складом і відрізняються широким спектром фізико-механічних властивостей. Тому в даній статті наведено аналіз основних фізико-механічних властивостей сипких продуктів, які істотно впливають на конструкцію і силові параметри ФПО, а також на якість пакування.

Ключові слова: харчові продукти; сипкі продукти; гнучкі пакувальні матеріали; фасувально-пакувальне обладнання

Food packaging in flexible materials

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

This article analyzes the properties of food as packing facilities. In the process of filling and packaging on products are both external and internal stresses which cause deformation of the product. To determine the rational parameters of the working bodies of the packaging equipment you need to know the functional relationship between external stress and strain. Food is usually complex disperse systems, to assess the impact on the type of product specification and design of packaging machinery it is need to know the basic physical and mechanical characteristics of the product. One of the big food groups is dry products. These diverse biological and chemical composition and cover a wide range of physical and mechanical properties. Therefore, this article summarizes the basic physical and mechanical properties of dry foods, which significantly affect the structure and force parameters of packaging equipment, as well as the quality of packaging.

Key words: food; dry products; flexible packaging; filling and packaging equipment.

