

УДК 621.6

Поступила в редакцию 01.09.2018
Received 01.09.2018**З.В. Ловкис, А.И. Григель***РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию»,
г. Минск, Республика Беларусь***ПАРАМЕТРЫ И ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация: В процессах переработки и производства продуктов человек имеет дело с материалами различных агрегатных состояний — жидкости, газы, твердые и сыпучие вещества. Проектирование процессов технологической переработки базируется на взаимном влиянии свойств материалов и конструкции оборудования, реализующего цель технологического преобразования. Для перечисленных материалов в практике используют традиционные методики расчета конструктивно — технологических параметров установок. Однако характеризуя категорию «сыпучий материал», чаще всего понимают, что это массив частиц обладающих одной природой. Примерами материалов такого типа могут быть: зерна злаковых культур и продукты их переработки, крахмал, сахар, соль т.п. Область применения таких продуктов — сельское хозяйство, пищевая промышленность и др. Процессами, в которых объектом переработки являются сыпучие материалы или их смеси (композиции, содержащие в определенном соотношении два и более компонента) можно назвать: транспортирование, дозирование, смешивание, прессование, тепло- и массообменные и многие др., используемые в жизнедеятельности человека. В статье приведены основные параметры и фракционный состав сыпучих материалов, используемых в пищевой промышленной переработке и производстве продуктов питания.

Ключевые слова: сыпучий материал, свойство, угол откоса, коэффициент трения, частица, плотность, форма, размер, параметр

Z.V. Lovkis, A.I. Grigel*RUE “Scientific and Practical Centre for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk,
Republic of Belarus***PARAMETERS AND FRACTIONAL COMPOSITION OF BULK MATERIALS**

Abstract: In the processes of processing and production of products, a person deals with materials of various aggregate states — liquids, gases, solid and bulk substances. The design of processes of technological processing is based on the mutual influence of the properties of materials and the design of equipment that implements the goal of technological transformation. For the listed materials, traditional methods of calculating the design and technological parameters of plants are used in practice. However, characterizing the category of «bulk material», it is often understood that this is an array of particles possessing the same nature. Examples of materials of this type can be: grain cereals and their processed products, starch, sugar, salt, etc. The field of application of such products is agriculture, food industry, etc. Processes where the processing object is bulk materials or their mixtures (compositions containing two or more components in a certain ratio) can be named: transportation, dosing, mixing, pressing, heat and mass transfer, and many others used in human activity. The article presents the main parameters and the fractional composition of bulk materials used in food industrial processing and food production.

Keywords: bulk material, property, angle of slope, coefficient of friction, particle, density, form, size, parameter

Введение. Сыпучие материалы используются практически во всех отраслях промышленности и в сельском хозяйстве. Процесс смешивания — одна из ключевых операций многих технологических процессов и как правило сопровождается процессом дозирования компонентов. Интенсивность процесса смешивания и качество готовой смеси существенно зависят от физико — механических

свойств компонентов. Таким образом, при анализе научных исследований процессов дозирования и смешивания необходимо рассматривать исследования физико – механических свойств сыпучих материалов [10].

Основная часть. На предприятия пищевой промышленности поступает на переработку большое количество различных сыпучих материалов: зерно и продукты его переработки, крахмал, различные крупы (рисовая, гречневая и др.), сахар (в том числе, сахар песок и сахарная пудра), соль, различные пищевые концентратные смеси (приправы, специи, пряности) и многое другое.

Под названием «сыпучий материал», «сыпучая среда» или «сыпучее тело» понимается совокупность большого количества твердых частиц.

Свойства сыпучих материалов в отличие от жидкостей и твердых тел характеризуются рядом показателей. Некоторые из них весьма специфичны и используются для характеристики какого – то одного свойства сыпучего материала, проявляемого в конкретном случае воздействия на него тех или иных факторов [1].

Наиболее важными характеристиками свойств сыпучих материалов, которые следует учитывать при расчетах, проектировании и эксплуатации перерабатывающего оборудования, являются: размер и форма частиц, гранулометрический (дисперсный) состав сыпучего материала, плотность (насыпная плотность), порозность, влажность, гигроскопичность, текучесть, сводообразование, слеживаемость, витание, адгезия, угол естественного откоса, коэффициенты внешнего и внутреннего трения.

Считается, что размер и форма частиц являются наиболее фундаментальными характеристиками сыпучего материала, и относят их к так называемым первичным свойствам. *Гранулометрический или дисперсный состав сыпучего материала* – характеристика, показывающая, какую долю или процент по массе, объему, поверхности или числу частиц составляют определенные частицы или группы частиц во всей массе анализируемой пробы [2].

По гранулометрическому составу сыпучего материала оценивают количественное распределение составляющих его частиц по линейным размерам.

Большинство сыпучих материалов имеет частицы неправильной формы, для которых в качестве определяющего линейного размера может быть принят условный диаметр d_i , вычисляемый по трем измерениям частицы:

- ♦ как среднее арифметическое

$$d_i = \frac{lbh}{3}, \quad (1)$$

- ♦ или среднее геометрическое

$$d_i = \sqrt[3]{lbh}, \quad (2)$$

где l , b , h – соответственно длина, ширина и высота обмеряемой частицы.

В зависимости от размера (диаметра d) частиц сыпучие материалы подразделяют на пылевидные ($d < 0,05$ мм), порошкообразные ($0,05$ мм $< d < 0,5$ мм), мелкозернистые ($0,5$ мм $< d < 2$ мм), крупнозернистые (2 мм $< d < 10$ мм), кусковые ($d > 10$ мм) [1].

Например, крахмал как один из сыпучих материалов обладает свойственным для него гранулометрическим составом, размер зерен крахмала из различных видов сырья находится в интервале от 2 до 150 мкм (0,002–0,15 мм).

Зерна крахмала из картофеля считаются самыми крупными из известных видов крахмала – их размер от 15 до 100 мкм. Они имеют овальную форму в виде раковины с несимметрично расположенным глазком и выраженной слоистостью.

Крахмал из кукурузы включает две фракции зерен – многогранные и круглые. Крахмал мучнистой части зерна состоит из зерен округлой формы, а из роговидной – в виде многогранника. Размер зерен крахмала от 5 до 26 мкм, в среднем 15 мкм.

Крахмал из пшеницы имеет в своем составе две фракции зерен – мелкие (от 2 до 10 мкм) и крупные (от 20 до 35 мкм), по форме круглые или овальные, без бороздок.

Зерна крахмала из риса имеют самые малые размеры – от 3 до 8 мкм, многогранные единичные или собраны в конгломераты.

Ниже представлена табл. 1, в которой показаны морфологические характеристики нативных крахмалов различного ботанического происхождения. [17]

Таблица 1. Морфологическая характеристика нативных крахмалов различного ботанического происхождения
Table 1. Morphological characteristics of native starches of various botanical origin

Образец крахмала	Распределение гранул по размерам	Размер гранул, мкм		Форма гранул	Тип крахмала
		диапазон	среднее (P < 0,05)		
Пшеничный	бимодальное	2,8 - 27,0	12,4 ± 1,94	правильная овальная и округлая	зерновой
Рисовый	тримодальное	2,7 - 7,9	5,3 ± 0,29	неправильная многогранная	зерновой
Картофельный	бимодальное	7,7 - 60,0	21,7 ± 1,2	правильная овальная и округлая	клубневой
Кукурузный	мономодальное	3,6 - 19,2	9,8 ± 0,42	неправильная многогранная	зерновой

К наиболее часто используемым на практике физическим свойствам сыпучих материалов относят влажность, гигроскопичность, плотность, насыпную плотность, температуры плавления и воспламенения, взрыво – и пожароопасность и т.д. [9].

Насыпную плотность или объемную массу сыпучего материала ρ_n используют при определениях необходимого объема бункеров, смесителей, при расчетах расхода энергии на перемешивание сыпучего материала, давления столба сыпучего материала на стенки бункеров и т.д.

Насыпная плотность сыпучего материала зависит от размера составляющих его частиц, их средней плотности, влажности, от плотности укладки частиц в слое. Она не остается постоянной даже при покое сыпучего материала. Под влиянием вибраций стенок сосуда сыпучий материал со временем уплотняется, и его насыпная плотность достигает некоторого предельного значения ρ_{max} . В процессе движения, перемещения, смешения, наоборот, происходит разрыхление материала. Насыпная плотность при этом уменьшается, приближаясь к предельному значению ρ_{min} . Отношение ρ_{max}/ρ_{min} для некоторых материалов достигает значений 1,52.

Насыпная плотность ρ_n , кг/м³ исследуемого сыпучего материала равна:

$$\rho_n = \frac{G_1 - G}{V}, \tag{3}$$

где G_1 и G – вес стакана с материалом и без него, кг; V – внутренний объем стакана, м³.

По величине насыпной плотности различают сыпучие материалы: легкие ($\rho_n < 600$ кг/м³), средние ($600 < \rho_n < 1100$ кг/м³), тяжелые ($1100 < \rho_n < 2000$ кг/м³), весьма тяжелые ($\rho_n > 2000$ кг/м³).

Так, например, плотность воздушно – сухого картофельного крахмала находится в интервале 1500–1503 кг/м³, кукурузного 1528–1530 кг/м³, абсолютно сухого картофельного крахмала 1630–1648 кг/м³ и кукурузного 1590–1630 кг/м³.

Как было сказано выше, что насыпная плотность или объемная масса зависит от влажности сыпучего материала, так насыпная масса картофельного крахмала влажностью 20 % (в холодном состоянии) составляет 650 кг/м³, при влажности крахмала 50 % – 1250 кг/м³. [17]

Порозность слоя сыпучего материала:

$$\varepsilon = V_1/V_0, \tag{4}$$

где V_1 – свободный объем пространства между частицами в слое сыпучего материала объемом V_0 .

Величина ε зависит от способа укладки частиц, их формы, размера, воздействия внешних факторов. Например, под действием вибрации ε может изменяться для одного и того же сыпучего материала в 1,1–3,0 раза. Значения ε , ρ и ρ_n связаны простой зависимостью $\varepsilon = 1 - \rho/\rho_n$.

Изменение структуры слоя под действием сжимающей нагрузки характеризуют коэффициентом уплотнения:

$$K_y = \rho_{np}/\rho_n, \tag{5}$$

где ρ_n и ρ_{np} – насыпная плотность порции сыпучего материала соответственно начальная и после прессования [2].

Влажность сыпучего материала определяет подвижность его частиц. Она влияет на такие свойства, как текучесть, коэффициент трения, смерзаемость, сводообразование, комкообразование, плот-

ность и т.д. Увеличение влажности, как правило, ухудшает характеристику истечения сыпучего материала. Сыпучий материал с повышенной влажностью обладает повышенными силами сцепления частиц, что способствует образованию комьев и статических сводов над отверстием воронки бункера. Так, например, сыпучесть муки снижается с ростом ее влажности; при влажности 16 % и выше мука практически теряет сыпучесть [15], [16].

Для характеристики количества влаги, содержащейся в твердых телах, используют два понятия: влажность и влагосодержание.

Влажность W_g – это отношение веса влаги, содержащейся в сыпучем материале, к весу влажного материала:

$$W_g = \frac{G_a - G_c}{G_a}, \quad (6)$$

где G_a и G_c – вес влажного и вес абсолютно сухого материала; влагосодержание W – отношение веса влаги, содержащейся в сыпучем материале, к весу абсолютно сухого материала:

$$W = \frac{G_a - G_c}{G_c}. \quad (7)$$

Присутствие влаги в сыпучем материале увеличивает его плотность. Связь влагосодержания с плотностью ρ_a , кг/м³ для зернистых и кусковых материалов выражается формулой:

$$\rho_a = \rho(1 + W), \quad (8)$$

а для пылевидных и порошкообразных материалов:

$$\rho_a = \rho \frac{1 + W}{\left(1 + \frac{W}{3} \rho_1 / \rho_{ж}\right)}, \quad (9)$$

где ρ_a и ρ – плотность влажного и сухого сыпучего материала, кг/м³; ρ_1 – плотность частиц, составляющих сыпучий материал, кг/см³; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, заполняющей поры сыпучего материала, кг/м³ [7].

Гигроскопичность – свойство сыпучего материала сорбировать парообразную воду из воздуха:

$$W_n = \left[\frac{m_g - m_c}{m_c - m_g} \right] 100, \quad (10)$$

где W_n – максимальная гигроскопичность, %; m_g , m_c , m_g – масса соответственно пробы сыпучего материала с бюксой, бюксы и бюксы с высушенной пробой сыпучего материала.

Текучесть сыпучих материалов характеризует их способность вытекать с той или иной скоростью из отверстий. Она зависит от гранулометрического состава материала, формы и размера частиц, коэффициента внутреннего трения, влажности и т.д.

Текучесть сыпучих материалов определяет многие конструктивные особенности бункерных и дозирующих устройств, смесителей. От нее зависит продолжительность операций заполнения и опорожнения смесителей.

Текучесть характеризуется коэффициентом текучности:

$$K = tr^{2,58} / G, \quad (11)$$

где t – время вытекания сыпучего материала из воронки, с; r – радиус отверстия воронки, мм; G – навеска сыпучего материала, засыпанная в воронку, г.

Чем больше величина K , тем менее подвижен материал, тем медленнее он вытекает из отверстий.

Связные сыпучие материалы в определенных условиях могут и не вытекать из отверстий. Это происходит в том случае, когда над отверстием образуется свод из материала. *Сводообразование сыпучих материалов* объясняется возникновением в зоне разгрузочного отверстия такого напряженного состояния, при котором горизонтальные напряжения в слое частиц достигают наивысшего значения. Горизонтальные давления уплотняют материал, создают соответствующую вертикальную составляющую распора свода, которая становится достаточной для восприятия массы груза над отверстием.

Сводообразование можно устранить установкой вибраторов на наружной поверхности выпускного устройства, размещением в зоне разгрузки ворошителей или аэрацией находящегося там материала, выбором соответствующего размера отверстий. Среди перечисленных способов наиболее простым и действенным является последний: для предотвращения сводообразования при этом способе необходимо, чтобы размер выпускного отверстия был больше диаметра наибольшего сводообразующего отверстия $d_{св}$ [1].

Скорость воздушного потока, при которой частица находится во взвешенном состоянии или в состоянии безразличного равновесия, называется *скоростью витания*.

Любая твердая частица может находиться во взвешенном состоянии при условии равенства веса частицы силам, возникающим при движении воздушного потока, и действующим на частицу, в направлении, снизу вверх (рис. 1).

При этом имеем равенство:

$$G = P, \tag{12}$$



где G – вес частицы, Н; P – сила, действующая на частицу в направлении снизу вверх под воздействием воздушного потока, Н.

Эта сила действия движущегося воздуха может быть определена из выражения:

$$P = k \times F \times \rho_a \times v_s^2, \tag{13}$$

где k – безразмерный коэффициент пропорциональности; F – площадь Миделева сечения частицы, м²; ρ_a – плотность воздуха, кг/м³; v_s – скорость витания частицы, м/с.

В свою очередь скорость витания с учетом (12) равна, м/с:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{k \times F \times \rho_a}}. \tag{14}$$

Рис. 1. Движение твердой частицы в вертикальном воздушном потоке
Fig. 1. Movement of a solid particle in a vertical air stream

Установлено, что коэффициент k зависит от скорости движения воздуха и частицы, от формы частицы и от свойств воздуха. Для воздуха стандартные параметры: $k = 0,5$ и $\rho_a = 1,2$ кг/м³ [11], [12].

В качестве характеристик второго порядка обычно используют: углы естественного откоса, обрушения, трения, скольжения, трения о поверхность, предел текучести, начальное сопротивление сдвигу, модуль деформации, коэффициент Пуассона, слеживаемость и т.д. [9].

Углом естественного откоса характеризуется угол α , образуемый линией естественного откоса (отвала) сыпучего материала с горизонтальной плоскостью. Величина угла естественного откоса зависит от сил трения, возникающих при перемещении частиц сыпучего материала относительно друг друга, и сил сцепления между ними. Этот угол характеризует сыпучесть материала, т.е. способность скользить или скатываться по наклонной поверхности. Наименьшим углом естественного откоса обладают грузы, состоящие из тел с гладкой поверхностью (горох, просо, соя, яблоки, чистый картофель, свекла и др.). При отклонении от шарообразной формы сыпучесть уменьшается (сахар, поваренная соль, овес, морковь и др.).

При определениях угла α (рис. 2, а) исследуемый сыпучий материал выпускают из воронки 1 на горизонтальную площадку 3, в результате чего там образуется конус 2 из материала. Затем с помощью угломера измеряют угол наклона α образующей этого конуса к горизонту – это и будет угол естественного откоса исследованного материала. Угол α определяет подвижность сыпучего материала, его необходимо учитывать при конструировании лотков, течек, выпускных конических частей бункеров. Во всех случаях следует принимать угол наклона поверхности к горизонту, по которым стекает данный сыпучий материал, превосходящим по величине его угол естественного откоса.

Величина угла α зависит от состояния поверхности опорной площадки. Чем меньше шероховатость этой поверхности, тем меньше угол естественного откоса. Снижается значение угла α и в том случае, когда горизонтальная опорная поверхность вибрирует. Поэтому при проектировании бункеров и течек для малоподвижных с большим значением угла естественного откоса сыпучих материалов внутренние поверхности этих устройств шлифуют, а во время работы их с помощью вибраторов приводят в колебательное движение с весьма малыми амплитудами.

Угол естественного откоса необходимо знать при проектировании складов, бункеров, транспортирующих и погрузочно – разгрузочных устройств, так как соотношения размеров основания и высоты массива груза на несущем элементе зависят от величины этого угла. Тангенс угла α есть коэффициент внутреннего трения сыпучего груза $f_0 = \operatorname{tg} \alpha$.

Коэффициент внешнего трения f сыпучего груза о поверхности из различных конструкционных материалов (сталь, дерево, резина, пластмасса, бетон и т.п.) также необходимо знать при проектировании и эксплуатации транспортирующих устройств и различного вспомогательного оборудования (бункеров, воронок, плужковых сбрасывателей и т.п.). Угол, при достижении которого наклонной поверхностью груз начинает скользить по ней, называется углом внешнего трения φ и связан с коэффициентом f зависимостью $f = \operatorname{tg} \varphi$ [1, 2, 6, 7, 10, 14, 15, 16].

Поведение сыпучего материала в технологических процессах определяется его способностью оказывать сопротивление изменению объема, формы, нарушению целостности. Характерной особенностью сыпучих материалов является подвижность частиц относительно друг друга (сыпучесть) и способность перемещаться под действием внешней силы. Сыпучесть зависит от гранулометрического состава материала, его влажности, степени уплотнения и проявляется по-разному (рис. 2).

Так, при насыпании сыпучего материала на горизонтальную поверхность из воронки (рис. 2, *a*) образуется конус с углом естественного откоса при основании. При удалении подпорной боковой стенки свод материала обрушивается, а свободная поверхность материала располагается под некоторым углом к горизонтальной плоскости (рис. 2, *b*).

В случае открытия отверстия в плоском днище бункера происходит частичное осыпание материала с образованием свода (при малом диаметре отверстия) или кратера (рис. 2, *c, d*). При прекращении вращения полого барабана с засыпанным материалом свободная поверхность также образует некоторый угол с горизонтальной плоскостью (рис. 2, *e*).

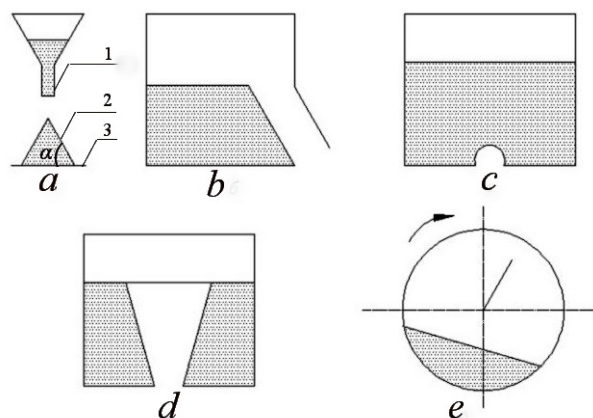


Рис. 2. Сыпучесть материалов:

a – из воронки; *b* – при удалении подпорной боковой стенки; *c, d* – из открытого отверстия в плоском днище; *e* – при прекращении вращения полого барабана; 1 – воронка; 2 – конус, образованный сыпучим материалом при его высыпании; 3 – горизонтальная площадка; α – угол естественного откоса

Fig. 2. Flowability of materials:

a – from the funnel; *b* – when removing the retaining side wall; *c, d* – from an open hole in a flat bottom; *e* – when not rotating the hollow drum; 1 – funnel; 2 – cone formed by bulk material during its pour out; 3 – horizontal platform; α – angle of natural slope

Сыпучесть характеризуется косвенными показателями, среди которых наибольшее распространение получил угол естественного откоса α_j . Широкое использование этого показателя при определении наклона стенок бункера, желобов объясняется простотой и надежностью его измерения.

Углом естественного откоса называется угол наклона образующей конуса сыпучего материала, отсыпанного без толчков и вибраций, к горизонтальной плоскости. Эта характеристика связана одновременно с аутогезией, внутренним трением и плотностью частиц порошка и его гранулометрическим составом.

Наряду с углом естественного откоса различают угол обрушения α_n , который характеризует положение поверхности откоса, образованной в результате сползания части сыпучего материала. Угол

обрушения всегда больше угла естественного откоса. Угол обрушения служит важным параметром при проектировании транспортных средств и бункеров для хранения сыпучих материалов и наряду с этим применяется в научных исследованиях. В литературе имеются и другие названия этих параметров: угол естественного откоса – динамический угол откоса, угол трения движения, угол насыпания; угол обрушения – статический угол откоса, угол трения покоя [7].

Частицы сыпучих материалов способны прилипать к твердым поверхностям (подложкам), что вызывает *адгезию*. В процессах смешения, хранения, транспортирования адгезия – вредное свойство сыпучих материалов. Ее необходимо учитывать при конструировании, изготовлении и эксплуатации смесителей, бункеров, выпускных устройств, транспортных линий.

Адгезия характеризуется величиной v_F (числом адгезии), равной отношению веса частиц G , оставшихся на подложке после приложения к ним силы F_{omp} , к первоначальному их весу на подложке G_0 :

$$v_F = \frac{G}{G_0} 100\%. \quad (15)$$

При длительном хранении без перемещений многие мелкозернистые и порошкообразные материалы способны уплотняться, слеживаться, теряя сыпучесть. Уплотняется материал 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. Некоторые материалы, например порошкообразные удобрения, способны слеживаться в плотные массы.

По величине разрушающей нагрузки σ_p все сыпучие материалы можно условно разбить 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) [1, 7].

Горючие сыпучие материалы могут при определенных условиях самовозгораться, а в смеси с воздухом – взрываться. Взрыв аэровзвеси сыпучих горючих компонентов происходит только в том случае, когда их концентрация в воздухе находится в диапазоне между нижним и верхним пределами воспламенения.

Взрывоопасными принято считать пылевоздушные смеси, нижний предел воспламенения которых меньше или равен 65 г/м³. Пыли с нижним пределом, превышающим 65 г/м³, считают *пожароопасными*.

Для предупреждения взрыва пылевоздушных смесей, необходимо выполнять следующие условия: исключать пылеобразование в производственном помещении (вентиляция, пылесборники, циклоны), проводить процесс смешения, транспортирования в среде инертного газа, тщательно заземлять металлическое оборудование, использовать взрывозащищенное оборудование, контролировать с помощью датчиков температуру в зоне наибольшего трения, не допускать попадания в смеситель металлических предметов, для чего загружаемую смесь необходимо пропускать через магнитный сепаратор [1, 2].

Р.Л. Карр (Ralph Lawrence Carr) предложил оценивать сыпучесть дискретных материалов суммой баллов по пяти показателям: угол естественного откоса, коэффициент уплотнения, угол обрушения, коэффициент неоднородности фракционного состава частиц, эффективность сцепления (коэффициент внутреннего трения) частиц. Каждый из этих показателей может быть оценен по 25 баллам. Таким образом, сыпучий материал с отличной сыпучестью имеет максимальную сумму баллов, равную 100. Самая плохая сыпучесть оценивается суммой баллов от 0 до 19. Все сыпучие материалы в зависимости от суммы баллов разделены Карром на семь классов и 21 группу (по три группы в каждом классе). По такой классификации ему удалось создать таблицу свойств сыпучих материалов [1].

Закключение. Таким образом, проведен анализ, как основных свойств сыпучих материалов, так и их классификацию, что особенно актуально при проектировании и создании машин и оборудования для их транспортировки, переработки и хранения.

Список использованных источников

1. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – Москва : «Машиностроение», 1973. – 216 с.

2. Падохин, В.А. Физико – механические свойства сырья и пищевых продуктов : учеб. пособие / В.А. Падохин, Н.Р. Кокина. – Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т., Институт химии растворов РАН, 2007. – 128 с.
3. Алексеенко, М.С. Применение кислотного гидролизованного крахмала / М.С. Алексеенко, В.В. Литвяк // Наука, питание и здоровье : материалы конгресса, Минск, 8–9 июня 2017 г. / Нац. акад. наук Беларуси, РУП «Научно – практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» ; редкол.: З.В. Ловкис [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2017. – С. 203–211.
4. Углеводы в пищевых продуктах / М.О. Полумбрик [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2016. – 592 с.
5. Картофель и картофелепродукты : наука и технология / З. В. Ловкис [и др.]; РУП «Научно – практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию». – Минск : Беларус. навука, 2008. – 537 с.
6. Исследование внутреннего и внешнего трения сыпучих грузов: метод. указания к лаб. раб. для студ. спец. 170600 / Санкт-Петербург. гос. ун-т низкотемператур. и пищ. технол. ; сост.: Ю.А. Бойцов. – Санкт-Петербург : СПбГУНиПТ, 2003. – 10 с.
7. Шубин, И.Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства : учеб. пособие / И.Н. Шубин, М.М. Свиридов, В.П. Таров. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2005. – 76 с.
8. Гячев, Л.В. Основы теории бункеров и силосов : учеб. пособие / Л.В. Гячев. – Барнаул : Алт. политехн. ин-т им. И.И. Ползунова, 1986. – 84 с.
9. Першин, В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В.Ф. Першин, В.Г. Однолько, С.В. Першина. – Москва : Машиностроение, 2009. – 220 с.
10. Осипов, А.А. Дозирование и смешивание сыпучих материалов: краткий обзор российских научных исследований / А.А. Осипов, С.В. Першина. – Тамбов : ФГБОУ ВПО Тамб. гос. техн. ун-т, 2009. – 9 с.
11. Лакомкин, В.Ю. Гидродинамика и тепломассообмен в газодисперсных потоках : учеб. – метод. пособие для выполнения лабораторных работ / В. Ю. Лакомкин, С.Н. Смородин, Е.Н. Громова. – Санкт-Петербург : ВШТЭ Санкт-Петербург. гос. ун-т пром. технологий и дизайна, 2017. – 57 с.
12. Жедяевский, Д.Н. Гидромеханические процессы. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов нефтегазопереработки : учеб.-метод. пособие / Д.Н. Жедяевский, В.Д. Косьмин, В.А. Лукьянов, С.С. Круглов. – Москва : Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – 60 с.
13. Общая технология пищевых производств : [Учебник для вузов по спец. «Машины и аппараты пищ. пр-ва» / Н.И. Назаров [и др.] ; под ред. Н.И. Назарова. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 360 с.
14. Борщев, В.Я. Оборудование для переработки сыпучих материалов : учеб. пособие / В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев, М.А. Промтов, А.С. Тимонин. – Москва : Машиностроение – 1, 2006. – 208 с.
15. Все о зерне. Технологии хранения и переработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://visacon.ru/tehnologiya-hraneniya-zerna/3581-sypuchest-zerna.html>. – Дата доступа: 10.08.2018.
16. Все о сельском хозяйстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hitagro.ru/fizicheskie-svoystva-zerna-i-plodoovoshhnoj-produkcii/>. – Дата доступа: 10.08.2018.
17. Крахмал и крахмалопродукты : монография / В.В. Литвяк, Ю.Ф. Росляков, С.М. Бутрим, Л.Н. Козлова; под ред. д-ра техн. наук, профессора Ю.Ф. Рослякова. – Краснодар : Изд. ФГБОУ ВПО «КубГТУ», 2013. – 204 с.

References

1. Makarov YU.I. Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov [Apparatus for mixing bulk materials], Moskva: “Mashinostroyeniye” [Moscow: “Mechanical Engineering”], Moscow, 1973, 216 p.
2. Padokhin V.A., Kokina N.R. Fiziko – mekhanicheskiye svoystva syr’ya i pishchevykh produktov: uchebnoye posobiye [Physical and mechanical properties of raw materials and food products: textbook], Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy khimiko – tekhnologicheskiy universitet, Institut khimii rastvorov

- RAN [Ivanovo: Ivanovo State University of Chemical Technology, Institute of Solution Chemistry Russian Academy of Sciences], Ivanovo, 2007, 128 p.
3. Alekseyenko M.S., Litvyak V.V. *Primeneniye kislotnogidrolizovannykh krakhsyalov* [The use of acid hydrolyzed starches]. *Nauka, pitaniye i zdorov'ye: materialy kongressa*, Minsk, 8–9 iyunya 2017 g. [Science, Nutrition and Health: Proceedings of the Congress, Minsk, 8–9 June 2017]. Minsk, 2017, pp. 203–211.
 4. Polumbrik M.O., Litvyak V.V., Lovkis Z.V., Kovbasa V.N. *Uglevody v pishchevykh produktakh* [Carbohydrates in food products], Minsk: IVTS Minfina [Minsk: ICC of the Ministry of Finance], Minsk, 2016. – 592 p.
 5. Lovkis Z.V., Litvyak V.V., Mazur A.M., Pochitskaya I.M., Petyushev N.N. *Kartofel' i kartofeleprodukty: nauka i tekhnologiya* [Potatoes and potato products: science and technology], Minsk: RUP “Nauchno-prakticheskiy tsentr Natsional'noy akademii nauk Belarusi po prodovol'stviyu” [Minsk: RUE “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Food”], Minsk: Belaruskaya Navuka, 2008, 537 p.
 6. Boytsov YU.A. *Issledovaniye vnutrennego i vneshnego treniya sypuchikh gruzov: metodicheskiye ukazaniya k laboratornoy rabote dlya studentov spetsial'nosti 170600* [Investigation of internal and external friction of loose cargo: methodological instructions for laboratory work for students of specialty 170600], Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet nizkotemperaturnykh i pishchevykh tekhnologiy [St. Petersburg: Saint - Petersburg State University of Low – temperature and Food Technologies], St. Petersburg: SPbSULiFT, 2003, 10 p.
 7. Shubin I.N., Sviridov M.M., Tarov V.P. *Tekhnologicheskiye mashiny i oborudovaniye. Sypuchiye materialy i ikh svoystva: uchebnoye posobiye* [Technological machines and equipment. Loose materials and their properties: textbook], Tambov: Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet [Tambov: Tambov State Technical University], Tambov, 2005, 76 p.
 8. Gyachev L.V. *Osnovy teorii bunkerov i silosov: uchebnoye posobiye* [The fundamentals of the theory of bunkers and silos: textbook], Barnaul: Altayskiy politekhnicheskiy institut imeni I.I. Polzunova [Barnaul: Altai Polytechnic Institute named after I.I. Polzunova], Barnaul, 1986, 84 p.
 9. Pershin V.F., Odnol'ko V.G., Pershina S.V. *Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa* [Recycling of loose materials in drum-type machines], Moskva: Mashinostroyeniye [Moscow: Mechanical Engineering], Moscow, 2009, 220 p.
 10. Osipov A.A., Pershina S.V. *Dozirovaniye i smeshivaniye sypuchikh materialov: kratkiy obzor rossiyskikh nauchnykh issledovaniy* [Dosing and Mixing of Bulk Materials: A Brief Survey of Russian Scientific Research], Tambov: Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet [Tambov: Tambov State Technical University], Tambov, 2009, 9 p.
 11. Lakomkin V.YU., Smorodin S.N., Gromova Ye.N. *Gidrodinamika i teplomassoobmen v gazodispersnykh potokakh: uchebno – metodicheskoye posobiye dlya vypolneniya laboratornykh rabot* [Hydrodynamics and heat and mass transfer in gazodispersnyh flows: educational - methodical manual for performing laboratory works], Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet promyshlennykh tekhnologiy i dizayna [St. Petersburg: Sankt-Petersburg State University of Industrial Technology and Design], St. Petersburg, 2017, 57 p.
 12. Zhedyayevskiy D.N., Kos'min V.D., Luk'yanov V.A., Kruglov S.S. *Gidromekhanicheskiye protsessy. Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam v laboratorii protsessov i apparatov neftegazopererabotki: uchebno – metodicheskoye posobiye* [Hydromechanical processes. The manual for practical studies in the laboratory of processes and apparatuses of oil and gas processing: educational – methodical manual], Moskva: Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet nefti i gaza imeni I.M. Gubkina [Moscow: Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkina], Moscow, 2012, 60 p.
 13. Nazarov N.I., Ginzburg A.S., Grebenyuk S.M., Marshalkin G.A., Machikhin YU.A., Nechayev A.P., Tregubov N.N., Flaumenbaum B.L., Shcherbakov V.G., Yarovenko V.L. *Obshchaya tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [General technology of food production], Moskva: Legkaya i pishchevaya promyshlennost' [Moscow: Light and food industry], Moscow, 1981, 360 p.

14. Borshchev V.YA., Gusev YU.I., Promtov M.A., Timonin A.S. *Oborudovaniye dlya pererabotki sypuchikh materialov: uchebnoye posobiye* [Equipment for the processing of loose materials: textbook], Moskva: Mashinostroyeniye – 1 [Moscow: Mechanical Engineering – 1], Moscow, 2006, 208 p.
15. *Vse o zerne. Tekhnologii khraneniya i pererabotki* [All about the grain. Technologies of storage and processing]. Available at: <http://visacon.ru/tehnologiya-hraneniya-zerna/3581-sypuchest-zerna.html> [accessed 10 August 2018].
16. *Vse o sel'skom khozyaystve* [All about agriculture]. Available at: <http://hitagro.ru/fizicheskie-svoystva-zerna-i-plodoovoshhnoj-produkcii/> [accessed 10 August 2018].
17. Litvyak V.V., Roslyakov YU.F., Butrim S.M., Kozlova L.N. *Krakhmal i krakhmaloprodukty: monografiya* [Starch and starch products: monograph], Krasnodar: Kubanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet [Krasnodar: Kuban State Technological University], Krasnodar, 2013, 204 p.

Информация об авторах

Ловкис Зенон Валентинович – заслуженный деятель науки Республики Беларусь, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, генеральный директор РУП «Научно-практический центр Национальная академия наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@belproduct.com

Григель Алексей Иосифович – инженер отдела сертификации, метрологии и систем качества РУП «Научно-практический центр Национальная академия наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: alex_10.92@mail.ru

Information about authors

Lovkis Zenon Valentinovich – Honored Science Worker of the Republic of Belarus, corresponding member of the National Academy of Science of Belarus, Doctor of Engineering sciences, Professor, General Director of RUE “Scientific and Practical Centre for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus” (29, Kozlova str., 220037, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: info@belproduct.com

Grigel Alexey Iosifovich – engineer of the certification, metrology and quality systems of RUE “Scientific and Practical Centre for Foodstuffs of the National Academy of Science of Belarus” (29, Kozlova str., 220037, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alex_10.92@mail.ru