

УДК 633.863.2:633.2(574.1)

DOI 10.52578/2305-9397-2021-2-1-84-89

**Бралиев М.К.**, доцент ВАК, ORCID ID 0000-0001-5347-9420

НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана», 090009, ул. Жангир хана, 51, г. Уральск, Республика Казахстан», aigul073@mail.ru

**Braliev M.K.**, Associate Professor at the Higher Attestation Commission

«Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian-Technical University» NPJSC, 090009, 51 Zhangir Khan Str., Uralsk, Republic of Kazakhstan

**СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ, ИХ ВОЗМОЖНОСТИ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
MODERN GRINDING MODELS AND THEIR PREDICTIVE CAPABILITIES**

**Аннотация**

В данной статье рассматриваются вопросы современного питания, требующего присутствия продуктов функционального питания, создание которых невозможно без использования дополнительных высокотехнологичных натуральных пищевых добавок. Ярким представителем таких добавок является порошок растительных материалов (овощных, фруктовых, травяных, ягодных), получаемый из высушенного сырья. Использование порошков растительных материалов широко внедряется в хлебобулочном производстве, колбасном, кондитерском, макаронном, в шоколадном изделий и т.д.

Питательность растительных материалов способно не только повысить пищевую ценность готового продукта, но и кардинальным способом изменять стандартные технологические процессы и качество готовых продуктов, т.е. помимо физико-химических свойств порошков, на ход процесса влияет его гранулометрический состав, что особенно важно при производстве продуктов имеющих в той или иной степени выраженную структурированность и дисперсность. Качество и технологические свойства шоколадной массы, как сложной структурированной системы, наиболее полно характеризуются ее эффективной вязкостью и дисперсной твердой фазы.

При измельчении большую роль играют сопутствующие процессы, которые часто носят случайный характер. Форма, геометрические размеры и свойства частиц неравномерно распределены по всему объему, поэтому экспериментальное нахождение этих распределений является сложнейшей задачей и не может быть в принципе задано и организовано корректно.

Вследствие этого, основная задача при исследовании процесса измельчения – установления связи между затраченной энергией и достигнутой при этом дисперсности материала, решается путем сопоставления результатов усредняющих испытаний исследуемого процесса результатам опытного измельчения порции материала в некоторых стандартных условиях.

**ANNOTATION**

This article discusses the issues of modern nutrition, which requires the presence of functional nutrition products, the creation of which is impossible without the use of additional high-tech natural food additives. A striking representative of such additives is the powder of plant materials (vegetable, fruit, herbal, berry), obtained from dried raw materials. The use of powders of vegetable materials is widely implemented in the bakery industry, sausage, confectionery, pasta, school products, etc.

The nutritional value of plant materials can not only increase the nutritional value of the finished product, but also radically change the standard technological processes and the quality of finished products, i.e. in addition to the physical and chemical properties of powders, its granulometric composition affects the course of the process, which is especially important in the production of products that have a more or The quality and technological properties of the chocolate mass, as a

complex structured system, are most fully characterized by its effective viscosity and dispersed solid phase.

When grinding, an important role is played by related processes, which are often random in nature. The shape, geometric dimensions and properties of the particles are unevenly distributed throughout the volume, so the experimental finding of these distributions is a very difficult task and cannot in principle be set and organized correctly.

As a result, the main task in the study of the grinding process – to establish a relationship between the energy expended and the achieved dispersion of the material, is solved by comparing.

**Ключевые слова:** *пищевые добавки, растительные материалы, гранулометрический состав, тонкое измельчение, дисперсность, геометрические размеры части, сопутствующие процессы, рецептурная смесь, моделированию процесса измельчения.*

**Key words:** *food additives, plant materials, particle size distribution, fine milling, dispersity, geometric particle size, associated processes, recipe mixture, modelling of the milling process.*

**Введение.** Современное питание все в большей степени требует присутствия в своем ассортименте продуктов функционального питания, создание которых невозможно без использования дополнительных высокотехнологичных натуральных пищевых добавок. Ярким представителем таких добавок является порошок растительных материалов (овощных, фруктовых, травяных, ягодных), получаемый из высушенного сырья. Использование порошков [1]. растительных материалов широко внедряется в хлебобулочном производстве, колбасном, кондитерском, макаронном, шоколадном изделия.

Питательность растительных материалов способно не только повысить пищевую ценность готового продукта, но и кардинальным способом изменять стандартные технологические процессы и качество готовых продуктов, т.е. помимо физико-химических свойств порошков, на ход процесса влияет его гранулометрический состав, что особенно важно при производстве продуктов имеющих в той или иной степени выраженную структурированность и дисперсность.

Качество и технологические свойства шоколадной массы, как сложной структурированной системы, наиболее полно характеризуются ее эффективной вязкостью и дисперсией твердой фазы.

При измельчении большую роль играют сопутствующие процессы, которые часто носят случайный характер. Форма, геометрические размеры и свойства частиц неравномерно распределены по всему объему, поэтому экспериментальное нахождение этих распределений является сложнейшей задачей и не может быть в принципе задано и организовано корректно.

Вследствие этого, основная задача при исследовании процесса измельчения – установления связи между затраченной энергией и достигнутой при этом дисперсности материала, решается путем сопоставления результатов усредняющих испытаний исследуемого процесса результатам опытного измельчения порции материала в некоторых стандартных условиях.

При производстве шоколада в промышленных условиях, важным элементом является измельчение рецептурной смеси (какао масла, орехи, сахар, кофе, сухое молоко).

Качество и технологические свойства шоколадной массы, как сложной структурированной системы, наиболее полно характеризуются ее эффективной вязкостью и дисперсией твердой фазы. Процесс смешивания рецептурных компонентов предназначен для получения жиросодержащей, однородной по своему составу массы с пластичной консистенцией [2].

Таким образом измельчение рецептурной смеси является важнейшим технологическим процессом при приготовлении шоколадной массы, так как одним из важнейших показателей ее качества является дисперсность твердой фазы. Размеры частиц твердой фазы не должен превышать 35 мкм. Измельчение рецептурной смеси шоколадной массы осуществляется в основном на быстроходных пятивалковых мельницах.

Достаточно распространенным подходом к моделированию процесса измельчения является представление сыпучего материала в виде бинарной смеси крупной и мелкой

фракций. Во многих отраслях промышленности контроль гранулометрического (фракционного) состава [3] измельченного материала осуществляется не во всем спектре размеров частиц, по одному контрольному размеру  $x_c$ , типичному для исследуемой отрасли и материала. При таком модельном представлении единственной характеристикой гранулометрического состава является остаток на контрольном сите  $R_x$  размером  $x$ .

При таком модельном представлении сыпучего материала к моделированию процесса (кинетики) измельчения является уподобления измельчения химической реакции первого порядка с кинетическим уравнением вида:

$$dR/dT = -pR \quad (1)$$

имеющего решение:

$$R = R_0 \exp(-pt);$$

Где  $R_0$  – содержание крупной фракции в исходном материале (обычно значение  $R_0$  близко к единице);

$p$  – постоянная скорости измельчения;

$t$  – время измельчения.

Для экспериментального определения постоянной скорости измельчения  $p$  при полностью заданных условиях измельчения достаточно одной пары значений  $R_1$  и  $t_1$ , получаемых из эксперимента. Однако определение времени измельчения однозначно решается только для периодического измельчения. При непрерывном измельчении время пребывания частиц в мельнице может быть существенно распределено по частицам фракции, а сами фракции могут иметь разное среднее время пребывания. Неопределенность в определении времени  $t_1$  переходит в неопределенность восстановления величины  $p$ , в результате чего при другом времени прогноз может оказаться неточным. Попытки дать более улучшенное согласование расчетных и опытных данных процесса измельчения привели к модели вида

$$R = R_0 \exp(-pt^m), \quad (2)$$

где  $m$  – дополнительный постоянный параметр. Увеличения числа свободных параметров модели увеличиваем адекватность описания процесса, но при этом уравнение уже не является решением дифференциального уравнения типа, имеющего ясный физический смысл. Указанная модель не дает возможности оценить влияние технологических факторов на кинетику измельчения: свойств размалывания материала, условия передачи механической энергии, величины механической энергии мелющих тел, так как они в неявном виде входят в постоянную скорости измельчения  $p$ .

После появления формулы Розина-Раммлера для описания гранулометрического состава:

$$R(x) = \exp(-bx^n), \quad (3)$$

моделирование кинетики было ориентировано на отыскание изменения со временем измельчения ее параметров  $b$  и  $n$ . Наиболее  $n = 1$  и  $b \approx t$  имеет экспоненциальная кинетическая зависимость:

$$R(x) = R_0(x) \exp(-\alpha xt), \quad \alpha = \text{const}, \quad (4)$$

которая впоследствии была обоснована теоретически для случая движения всего материала в режиме идеального вытеснения и закона измельчения Риттингера. Связь времени измельчения с важнейшим технологическим показателем – производительностью  $Q$  – определяется по формуле:

$$t = M/Q, \quad (5)$$

где  $M$  – полная загрузка мельницы материалом.

Но применение формулы с учетом дает результаты, во многих случаях значительно расходящихся с опытными данными даже если используется один контрольный размер  $x = x_c$ , а не весь спектр частиц  $0 \leq x \leq x_m$ . Применение формулы ограничено типами мельниц и ее нельзя

использовать для вентилируемых мельниц, где разные фракции движутся с разной скоростью и, соответственно, имеют разное время измельчения.

При всех ограничениях, время измельчения рассчитывается по формуле и базируется на модели идеального вытеснения материала для барабанных (шаровых) мельниц.

В некоторых работах отражена попытка различных авторов достичь согласования с опытными результатами, что приводило к последовательному усложнению формулы, связанному с введением все большего числа опытных коэффициентов, то есть с прояснением сущности процесса, а с подбором все более многопараметрических поддерживающих кривых. Примеры некоторых кривых приведены ниже:

$$R = R_0 \exp(-k[\ln(t+1)^m]), \quad (6)$$

$$R = R_0 \frac{P}{\exp(-kpt) + p - 1}, \quad (7)$$

$$R = R_0 \frac{P}{(1 + kmR_n^m t)^m}, \quad (8)$$

$$R = R_0 \frac{R_0(1-\phi)k_0 + (\phi k_1 - (1-\phi)k_0) \exp(-\phi k_1 t)}{\phi k_1}, \quad (9)$$

где  $k$ ,  $m$ ,  $p$ ,  $k_1$ ,  $\phi$  – постоянные коэффициенты. Параметры этих регрессионных моделей традиционно определяются методом наименьших квадратов. Подобные модели важны для построения режимных карт процесса измельчения, но сами они также не имеют физического смысла, что затрудняет их использование при измельчении технологических параметров процесса.

Наиболее перспективным являются популяционно-балансовые модели на уровне декомпозиции до элементарного объема. Основу этих моделей составляют уравнения баланса массы фракции [4]. Для замыкания описания модели необходима дополнительная информация о селективной и распределительной функции измельчения. А.И. Загустиным для описания изменения кривой полных остатков было получено интегро-дифференциальное уравнение, имеющее вид:

$$\frac{\partial R(x_0, t)}{\partial t} = \alpha X_0^k \int_{x_0}^{x_m} \frac{\partial R(x_0, t)}{\partial x} \frac{dx}{x^{k-1}}, \quad (10)$$

где  $R$  – остаток на сите с ячейкой  $x_0$ ;

$t$  – время измельчения;

$k$ ,  $\alpha$  – параметры функций разрушения;

$X_0$ ,  $x_m$ ,  $x$  – фиксированный, максимальный и текущий размеры частиц.

В это уравнение уже входит информация о характеристиках процесса разрушения материала: скорости измельчения узкой фракции (селективная функция измельчения), которая рассматривалась А.И. Загустиным как линейная функция ее размера –  $S(x) = \alpha x$  и распределительной функции измельчения (распределение по крупности осколков разрушения узкой фракции), которая описывалась степенной зависимостью:

$$b(x, x_0) = \frac{kx_0^{k-1}}{x^k}, \quad (11)$$

Наиболее полную информацию о кинетике измельчения дают популяционно-балансовые (селективные) модели, которые отражают закономерность изменения во времени содержания частиц во всех фракциях. Это возможно при декомпозиции мельницы до элементарного объема. Основу этих моделей составляет уравнение баланса массы фракции.

Б. Эйнштейном, а затем независимо Р.П. Гарднером и Л.Г. Аустиним была разработана селективная модель измельчения, основные уравнения которой для плотности распределения частиц по крупности  $f(x)$  и для кривых полных остатков соответственно имеют вид интегро-дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -fS + \int_{x_n}^{x_m} fSb dx,$$

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t \partial x} = -\frac{\partial R}{\partial x} S + \int_{x_0}^{x_m} \frac{\partial R}{\partial x} S b dx, \quad (12)$$

где  $f = f(x, t)$  - плотность распределения частиц по крупности, которая связана с интегральной характеристикой крупности – кривой полных остатков – соотношением:

$$f(x) = -dR(x)/dx, \quad (13)$$

При использовании уравнений (12) и (13) при моделировании кинетики измельчения основные трудности возникают из-за неизвестности селективной  $S$  и распределительной функций измельчения  $b$ . Их восстановление по экспериментальным гранулометрическим составам полидисперсного материала до и после измельчения за фиксированный промежуток времени неоднозначно, так как множество пар функций  $S$  и  $b$  может дать одинаковое преобразование гранулометрического состава. Методика их определения связана с исследованиями кинетики измельчения всех узких фракций, так как восстановление при измельчении узкой фракции однозначно, но объем экспериментов оказывается большим.

Наиболее полный методологический анализ процесса измельчения на основе селективной модели в настоящее время выполнен в работах В.В. Кафарова. В систему уравнений процесса включены уравнения сохранения массы фракций (селективная модель), уравнение импульса и энергии фракции с учетом взаимодействия частиц и они же для несущего потока. Однако, несмотря на то, что это описание играет важную роль в осмыслении процесса, непосредственные решения уравнений получены только для случаев значительной редукции исходной системы и с обязательным привлечением опытных данных по функциям измельчения и некоторым другим составляющим процесса.

**Заключение.** В данной статье рассматриваются сопутствующие процессы, которые часто носят случайный характер. Форма, геометрические размеры и свойства частиц неравномерно распределенные по всему объему, поэтому экспериментальное нахождение этих распределений является сложнейшей задачей и не может быть в принципе задано и организовано корректно.

Установлена связь между затраченной энергией и достигнутый при этом дисперсности материала, решаемое путем сопоставления результатов усредняющих испытаний исследуемого процесса результатам опытного измельчения порции материала в некоторых стандартных условиях.

Рассмотрена модели процесса измельчения, представив сыпучий материал в виде бинарной смеси крупной и мелкой фракций, рассмотревая фракционный состав измельчаемого материала по одному контрольному размеру  $x_c$ . При таком модельном представлении единственной характеристикой гранулометрического состава является остаток на контрольном сите  $R(x)$  размером  $x$ .

#### SPISOK LITERATURY

1. Kas Z.A., Granovskaya R.YA. Novoe v tehnologii proizvodstva ovonyh i plodovyh poroshkov. – М.: SNIITEİpieprom, 1972. – 44 s.
2. Chernesov D.A., Bezborodova M.V., Rodionov .V., İvanova İ.V. Şokolad funksionalnogo naznacheniya s dobavleniem rastitelnyh ingredientov Tambovskoi oblasti // İnnovatsionnye pievye tehnologii v oblasti hraneniya i pererabotki selskohozyaistvennogo syrya: fundamentalnye i prikladnye aspekty: mater. VI mejdunar. nauchn.-prakt. konf. - Krasnodar, 2016. – S. 105-108.
3. Smirnov S.F. Razrabotka nauchnyh osnov prosessov formirovaniya fraksionnyh massopotov v tehnologicheskikh sistemah izmelcheniya. – İvanovo, 2009. – 34 s.
4. Melnikov S.V., Aleşkin V.R., Roin P.M. Planirovanie eksperimenta v issledovaniyah selskohozyaistvennyh prosessov. – L.: Kolos, 1980. –168 s.



## **ТҮЙІН**

Бұл мақалада қосымша жоғары технологиялық табиғи тағамдық қоспаларды пайдаланбай жасау мүмкін емес функционалды тамақ өнімдерінің болуын талап ететін заманауи тамақтану мәселелері қарастырылады. Мұндай қоспалардың жарқын өкілі-кептірілген шикізаттан алынған өсімдік материалдарының ұнтағы (көкөніс, жеміс, шөп, жидек). Өсімдік материалдарының ұнтақтарын қолдану Нан-тоқаш өндірісінде, шұжық, кондитерлік, макарон өндірісінде, мектеп өнімінде және т.

Өсімдік материалдарының тағамдық құндылығы дайын өнімнің тағамдық құндылығын арттырып қана қоймай, сонымен қатар стандартты технологиялық процестер мен дайын өнімдердің сапасын түбегейлі өзгерте алады, яғни ұнтақтардың физика-химиялық қасиеттерінен басқа, процестің барысына оның гранулометриялық құрамы әсер етеді, бұл белгілі бір дәрежеде айқын құрылымы мен дисперсиясы бар өнімдерді өндіруде өте маңызды. Шоколад массасының сапасы мен технологиялық қасиеттері күрделі құрылымдық жүйе ретінде оның тиімді тұтқырлығы мен дисперсті қатты фазасымен толық сипатталады.

Тегістеу кезінде көбінесе кездейсоқ болатын ілеспе процестер үлкен рөл атқарады. Бөлшектердің пішіні, геометриялық өлшемдері мен қасиеттері бүкіл көлемде біркелкі бөлінбейді, сондықтан бұл үлестірімдерді эксперименттік табу ең қиын міндет болып табылады және оны дұрыс орнату және ұйымдастыру мүмкін емес.

Нәтижесінде, ұнтақтау процесін зерттеудегі негізгі міндет-жұмсалған энергия мен қол жеткізілген материалдың дисперсиясы арасындағы байланысты орнату, зерттелетін процестің орташа сынақтарының нәтижелерін кейбір стандартты жағдайларда материалдың бір бөлігін тәжірибелік ұнтақтау нәтижелерімен салыстыру арқылы шешіледі.

УДК 633.863.2:633.2(574.1)

DOI 10.52578/2305-9397-2021-2-1-89-94

**Бралиев М.К.**, доцент ВАК, ORCID ID 0000-0001-5347-9420

НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана», 090009, ул. Жангир хана, 51, г. Уральск, Республика Казахстан», aigul073@mail.ru

**Braliev M.K.**, Associate Professor at the Higher Attestation Commission

«Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian-Technical University» NPJSC, 090009, 51 Zhangir Khan Str., Uralsk, Republic of Kazakhstan

## **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СМАЗОК THEORETICAL EVALUATION OF THE EFFECT OF PLASTIC REDUCING GREASES**

### **Аннотация**

В данной статье на основе анализа литературных источников указывается, что для повышения ресурса подшипников качения в условиях эксплуатации, целесообразным с экономической и экологической точки зрения, является применение в качестве смазочного материала пластичной восстановительной смазочной композиции, специально подготовленной и легированной присадками для получения необходимых физико-химических и трибологических свойств.

При применении пластичной восстановительной смазки осуществляется эффект избирательного переноса металла при трении, и образуется сервовитная пленка. Сервовитная пленка - это особая структура на поверхностях трения толщиной в несколько сотен нанометров, которая защищает трущиеся поверхности от изнашивания. Особенностью пленки является тот факт, что в ней реализуется особый механизм деформации, протекающий без накопления дефектов, свойственных усталостным процессам. Открытие этого явления, сделано советскими учеными Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским в 1956 году.

В статье разработана теоретическая оценка влияния пластичных восстановительных смазок и определены: условия реализации восстановления, описываемое коэффициентом