

ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 664.71

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ДОСУШЕННОГО ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА

В.А. Шаршунов, А.В. Евдокимов, А.Е. Покатилов, В.Н. Попов

Рассмотрена задача построения математических моделей совмещенного процесса сушки и измельчения высоковлажного сырья в сушилке-диспергаторе. Показано, что при одновременной сушке и измельчении зерна эти процессы, имеющие разную физическую природу, не позволяют создать единую математическую модель измельчения досушенного зерна. Так, процессы сушки подчиняются законам массообмена, а измельчения описываются с помощью уравнений механики разрушения. В работе предложено исследовать данный комбинированный процесс с привлечением теории графов, позволяющей разделить процессы по времени и выполнить их сравнительную оценку. Предложены математические модели отдельно для процесса сушки в закрученных потоках и для процесса измельчения зерна. Также показана их взаимосвязь и выполнены расчеты по ряду количественных показателей совмещенного процесса сушки и измельчения пророщенного зерна в сушилке-диспергаторе.

Введение

Перспективным направлением расширения ассортимента хлебобулочных изделий является производство хлеба с добавлением пищевых порошков, полученных из пророщенных зерновых культур, в которых рационально используются все питательные вещества, заложенные в зерно природой. Данный хлеб по пищевой и биологической ценности превосходит все традиционные сорта хлеба и является важнейшим источником пищевых волокон, витаминов, микроэлементов, аминокислот. Пищевые порошки, полученные из пророщенных зерновых культур, можно использовать как для выпечки хлебобулочных изделий, так и для приготовления самых разнообразных продуктов – хлебных палочек, снеков, различных макаронных и кондитерских изделий, сухих супов, каш, соусов и салатов, продуктов для диетического, диабетического и детского питания [1].

По сравнению с нативным зерном пророщенное зерно содержит значительно больше витаминов, сахаров, макро- и микроэлементов в легкоусвояемой форме, в несколько раз возрастает количество клетчатки. В пророщенном зерне в большом количестве содержатся витамины В, Е, А, РР, а также витамин С, которого нет в сухом зерне, минеральные вещества (К, Са, Mg, Р, Fe и др.), микроэлементы, а также пищевые волокна, которые в совокупности оказывают специфическое высокоэффективное оздоравливающее воздействие на организм человека [2, 3].

Поскольку все жизненно важные процессы в зерне протекают при достаточном количестве влаги, то проращиваемое зерно должно иметь влажность не менее 40 %, что делает зерно скоропортящимся продуктом. Для обеспечения благоприятных условий хранения его необходимо подвергнуть операциям сушки или сушки с измельчением, с целью получения конечного продукта в виде муки (влажностью 13÷15 %), пригодной для длительного хранения, но при этом сохранившей биологически ценные вещества исходного продукта.

Производство натуральных пищевых порошков из пророщенных зерен различных культур неразрывно связано с механическими (измельчение) и тепломассообменными (сушка) процессами. Операции обезвоживания и измельчения могут быть разделены значительным промежутком времени, но являются звеньями одной технологической цепочки. Однако чем больше стадий включает в себя процесс получения готового продукта, тем выше процент потерь биологически ценных веществ, содержащихся в исходном сырье.

На предприятиях мукомольной промышленности наибольшее распространение получили инфракрасные сушилки. Данный тип сушилок применяется как для обезвоживания пророщенного зерна перед его измельчением на вальцовых станках, так и для консервирования высоковлажного зернового сырья с помощью вспучивания последнего методом кратковременного воздействия мощного инфракрасного излучения с целью получения обезвоженных (неизмельченных) зерновых продуктов, предназначенных в основном для быстрого приготовления сухих завтраков [4].

К недостаткам данного метода можно отнести увеличенное время пребывания материала в зоне термообработки (90–100 с) в сравнении с сушилками взвешенного слоя и значительный нагрев самого материала (до 100 °С), что может существенно снизить его пищевую и биологическую ценность.

К перспективным направлениям совершенствования технологического процесса относят совмещение в одном рабочем пространстве тепловых, массообменных и механических процессов, что обеспечивает минимальное время переработки сырья. Разработка оборудования, реализующего этот метод, позволит получать пищевые порошки с максимальным сохранением биологически активных веществ.

Целью данной работы является создание математической модели совмещенного процесса сушки и измельчения пророщенного зерна с использованием теории графов.

Результаты исследований и их обсуждение

Разработана экспериментальная установка (сушилка–диспергатор), позволяющая одновременно проводить сушку и измельчение зерновых культур и получать готовые пищевые добавки в виде порошка. Использование сушилок взвешенного слоя с малым временем пребывания в зоне термообработки позволяет вести сушку при температурах порядка 80–100 °С без потери качества готового продукта, сохраняя при этом биологически ценные вещества исходного сырья.

Общий вид оборудования (сушилки–диспергатора) и принцип его действия представлен в работе [1].

Особенностью совмещенного процесса сушки и измельчения пророщенного зерна является одновременное наличие нескольких различных по своей природе факторов: механического воздействия на каждую частицу в процессе измельчения и тепломассообменных процессов сушки. Для представления процесса одновременной сушки и измельчения зерна воспользуемся теорией графов и зависимостями дискретной математики. На рисунке 1 показана принципиальная схема процесса измельчения и сушки на примере одной зерновки в виде графа. Вершинами графа являются процессы механического разрушения частиц, ребра представляют собой процессы сушки каждой отдельной частицы материала, находящегося в аппарате. Граф является ориентированным, поэтому в дальнейшем ребра будем называть дугами [5]. Таким образом, граф на рисунке 1 представляет собой совокупность двух множеств P (вершины) и S (дуги). Элементы множества P представляют собой разовые акты разрушения $p \in P$, а дуги множества S – это процесс сушки $s \in S$. Таким образом, совмещенный процесс обработки зерна нами представлен как совокупность двух множеств P и S , между элементами которых определено отношение инцидентности.

Задать граф – значит описать множества его вершин и ребер, а также отношение инцидентности [6]. Совмещенный процесс обработки зерна можно представить в виде графа, который называется ориентированным деревом с корнем. Корнем является вершина графа, иллюстрирующая первое разрушение зерновки за счет резания ножом.

Для оценочных расчетов примем следующие допущения:

- 1) процесс измельчения для зерновки начинается с процесса резания ножом;
- 2) при каждом акте разрушения образуется постоянное число новых частиц;
- 3) число актов разрушения для всех конечных частиц одинаково.

Процесс начинается с загрузки материала в аппарат и попадания зерновки в рабочую зону измельчения, в которой находятся ножи. Измельчение представляет собой резание, дробление из-за ударного действия элементов аппарата и столкновения частиц, а также истирание материала при контакте частиц с аппаратом и другими частицами. При анализе резания учтем, что зазор между ножами равен 5 мм, толщина каждого ножа составляет 1 мм, а эквивалентный диаметр зерна ржи – 3,3 мм.

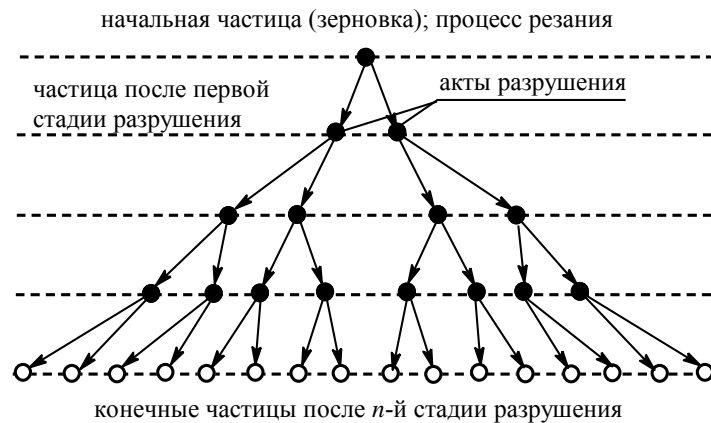


Рисунок 1 – Принципиальная схема процесса измельчения и сушки зерна

На рисунке 1 (также на рисунках 2 и 4) затемненные частицы еще подвергаются обработке, а для светлых частиц процесс обработки уже закончен.

Таким образом, одновременно зерновка может контактировать только с одним ножом, так как расстояние между режущими кромками соседних лезвий равно 6 мм. На рисунке 1 отражено, что процессы измельчения начинаются с одной частицы (зерновки) и этот процесс – резание. Под воздействием ножа каждая зерновка разделяется на две части, в общем случае разные по размеру и весу. На всех последующих стадиях предполагаем, что частица при резании делится только на две, в общем случае неодинаковые части.

На самом деле действительная картина разрушения и сушки материала сложнее. После первого цикла разрушения две получившиеся частицы могут подвергаться процессам резания, дробления и истирания. Наиболее вероятным на первой стадии представляется реализация резания, так как вновь образовавшиеся частицы находятся в зоне действия ножей роторного измельчителя, где процесс сушки только начинается и каждая частица содержит значительное количество влаги. При этом материал подвергается сушке на протяжении всего времени нахождения в аппарате, то есть на рисунке 1 отражают процесс комбинированной обработки зерна не только вершины графа, но и дуги. Покажем на рисунке 2 принципиальную схему всего процесса измельчения с одновременной сушкой для одной зерновки на основе измененного графа по отношению к рисунку 1.

Исследования проведенные различными авторами для измельчителей ударного типа показывают, что среднее время удара составляет $10^{-3} \div 10^{-5}$ с [7, 8].

Истирание может проходить большую часть времени нахождения продукта в аппарате [9]. В качестве гипотезы примем, что наиболее интенсивное истирание происходит в зоне наибольшей концентрации продукта, то есть там же, где реализованы дробление и резание. На данной стадии исследования не будем различать механизм разрушения частицы, только затраченное на этот процесс время.

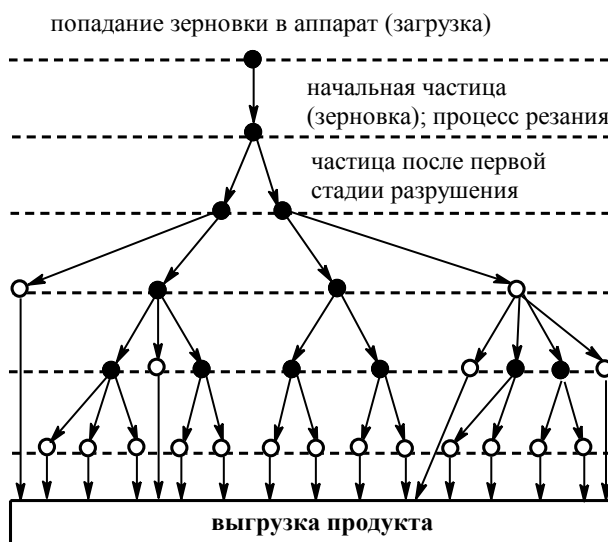


Рисунок 2 – Реальная схема процесса измельчения досушенного зерна

Важнейшей характеристикой вихревых сушильных камер является удерживающая способность и среднее время пребывания материала в сушилке. Экспериментально удерживающая способность вихревой камеры определялась методом мгновенной "отсечки" питания. Экспериментальные исследования показали, что среднее время нахождения частицы в аппарате в зависимости от режимных и технологических параметров составляет от 25 до 80 с [10].

Процесс обработки пророщенного зерна в сушилке–диспергаторе выполнялся исходя из следующих условий:

1) вес пророщенного зерна, подаваемого в аппарат, для каждого эксперимента составлял 1 кг.

2) после проведения ситового анализа полученного продукта определялось конечное число частиц (таблица 1). Эксперимент проводился для различной влажности исходного материала $W_{нач}$.

Общее количество конечных частиц определяли по следующей зависимости [11]:

$$n_1 = \frac{G}{\gamma d_{50}^3} . \quad (1)$$

где n_1 – количество частиц в классе;

G – массовый выход класса, кг;

d_{50} – средний размер частиц продукта, м;

γ – плотность продукта класса, кг/м³.

Результаты расчетов по формуле (1) показаны в таблице 1. В качестве среднего размера частиц продукта d_{50} принимался медианный диаметр, то есть размер частиц, при котором масса всех частиц в полученном порошке мельче или крупнее d_{50} и составляет 50 % [12].

Для численного определения величины медианного диаметра строились интегральные кривые распределения, показывающие суммарную массовую долю всех фракций меньше (или больше) данного размера.

Таблица 1 – Число частиц после измельчения и сушки зерна

$W_{нач}, \%$	$d_{50}, \text{м}$	n_1	n_2	z
33	0,000175	146344252	23000	6363
36	0,000187	119940263	23500	5104
39	0,000225	68856075	24000	2869
42	0,00026	44624131	24500	1821
45	0,000292	31502227	25000	1260

В таблице 1 приняты следующие обозначения:

n_1 – конечное число частиц;

n_2 – начальное количество зерновок;

z – количество частиц, на которое распадается измельчаемое тело (число конечных частиц для одной зерновки).

$$z = \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

Графам на рисунках 1 и 2 можно дать несколько интерпретаций:

1) графы показывают весь процесс сушки и измельчения зерновки с выходом на конечное число частиц пищевого порошка;

2) графы можно представить как схемы комбинированного процесса обработки зерновки, показывающие степень измельчения частиц материала.

Рассмотрим первый случай. Число получившихся частиц из одной зерновки z после измельчения, включающего в себя n стадий измельчения, запишем как

$$z = 2^n, \quad (3)$$

где n – число повторностей приложенных нагрузок (число стадий разрушения).

Первая вершина по рисунку 2 не учитывается, так как это исходная частица (зерновка), поступающая в аппарат без разрушения. Решим уравнение (3) относительно n . Получим

$$n = \log_2 z. \quad (4)$$

Таким образом, зерновка имеет n стадий разрушения с образованием при каждом акте измельчения двух частиц. Данные расчета по формуле (4) исходя из таблицы 1 покажем в таблице 2. Полученное число стадий разрушения n_m для каждого случая получилось дробным, так как при разрушении частицы в аппарате может образоваться не две частицы, как принято нами, а две и более частиц, поэтому точное значение n_m округляем до целого числа n в большую сторону.

Таблица 2 – Расчет числа стадий разрушения зерновки

$W_{нач}, \%$	z	n_m	n
33	6363	12,6	13
36	5104	12,3	13
39	2869	11,5	12
42	1821	10,8	11
45	1260	10,3	11

По таблице 2 делаем вывод, что число стадий разрушения уменьшается с увеличением влажности зерна, но уменьшение это незначительно. При изменении начальной влажности зерна $W_{нач}$ с 33 % до 45 % число стадий разрушения уменьшилось на 2 или на 15 %.

Усложним схему по рисунку 1. Для этого считаем, что первое разрушение происходит на ноже и из одной зерновки получается 2 частицы, а все последующие разрушения, как и его механизмы, неопределенны, то есть случайны – возможно резание, дробление и истирание. В качестве гипотезы примем наиболее сложные случаи, когда вновь образовавшиеся частицы подвергаются только истиранию или дроблению и количество частиц в таком процессе получается от 3 до k .

Если каждая частица разделяется только на 3, то формула (3) примет вид

$$\frac{z}{2} = 3^{n-1}. \quad (5)$$

В левой части уравнения (5) число частиц разделено на 2, так как этим учитывается первое деление зерновки на ноже на две частицы (рисунок 1), и только после этого начинается разрушение двух первичных частиц с кратностью измельчения равной 3. В правой части уравнения показатель степени на 1 меньше n из-за учета первого деления на ноже. В общем случае вместо 3 имеем кратность измельчения равную r . Запишем с учетом общего случая уравнение (5) относительно z в следующем виде:

$$z = 2r^{n-1}, \quad (6)$$

где r – кратность измельчения, $r = 3 \dots k$. Здесь k – любое конечное число.

Тогда из уравнения (6) число стадий измельчения при кратности r равно n и для конкретной зерновки определяется как

$$n = \log_r \left(\frac{z}{2} \right) + 1. \quad (7)$$

Выполним преобразование формулы (7) к виду

$$n = \frac{\lg z - \lg 2}{\lg r} + 1. \quad (8)$$

Введем численный коэффициент, зависящий от кратности разрушения при единичном акте разрушения, в виде

$$b = 1 - \frac{\lg 2}{\lg r}. \quad (9)$$

Коэффициент b по уравнению (9) является константой при выбранной кратности измельчения r . Тогда окончательно формула (8) примет вид

$$n = \frac{\lg z}{\lg r} + b. \quad (10)$$

При $r=2$ по уравнению (9) получим, что $b=0$. Тогда формула (8) действительна при любом целом r с учетом, что $r > 1$, т.е. при $r = 2 \dots k$.

Выполним расчет по формуле (10) для наиболее сложного случая, когда при влажности зерна $W_{нач} = 33\%$ имеем больше всего конечных частиц (таблица 1) и, соответственно, большее число стадий разрушения для каждой зерновки (таблица 2). Для оценки зависимости числа стадий измельчения для зерновки от принятой кратности считаем, что r меняется в диапазоне от 2 до 10. Расчет выполним без округления для n_m .

График на рисунке 3 показывает, что наибольшее число стадий разрушения, а значит и затраченного времени на процесс измельчения, имеет место при делении частицы на две части. При расчете общего времени разрушения частицы в аппарате будем исходить из гипотезы, что частицы при любом виде разрушения всегда разделяются только на две части. Этим мы учитываем самый затратный из возможных по времени разрушения случаев измельчения зерновки.

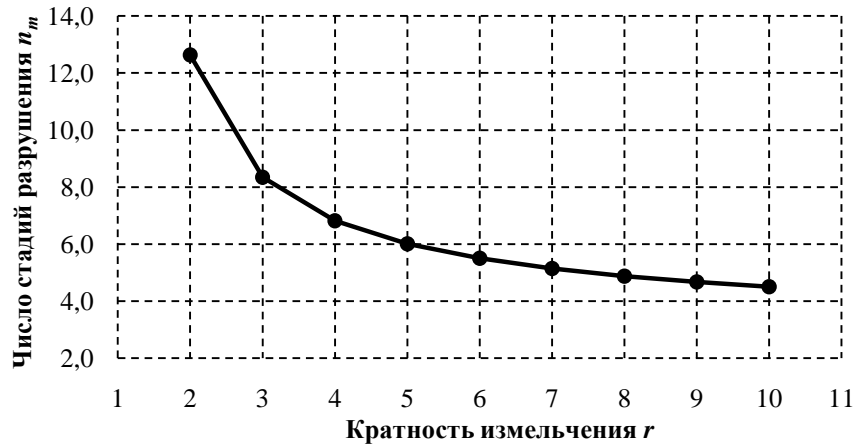


Рисунок 3 – Число стадий разрушения для частицы

Среднее время измельчения для одной частицы конечного продукта с учетом только ее разрушения в аппарате составляет

$$t_{cp} = n \cdot (10^{-3} \div 10^{-5}) = 13 \cdot (10^{-3} \div 10^{-5}) \text{ с.} \quad (11)$$

Сравнивая по уравнению (11) среднее время измельчения $t_{cp} = 13 \cdot (10^{-3} \div 10^{-5}) \text{ с}$, затраченное при получении одной частицы конечного продукта, и среднее время сушки $25 \div 80 \text{ с}$, получим, что время сушки превышает время измельчения примерно в $(2 \div 6) \cdot (10^3 \div 10^5)$ раза, то есть на 3 – 5 порядков. Это в самом худшем случае, а в реальности это превышение еще больше из-за кратности разрушения выше 2, то есть меньшего числа стадий разрушения (рисунок 3), а значит и меньшего затраченного времени.

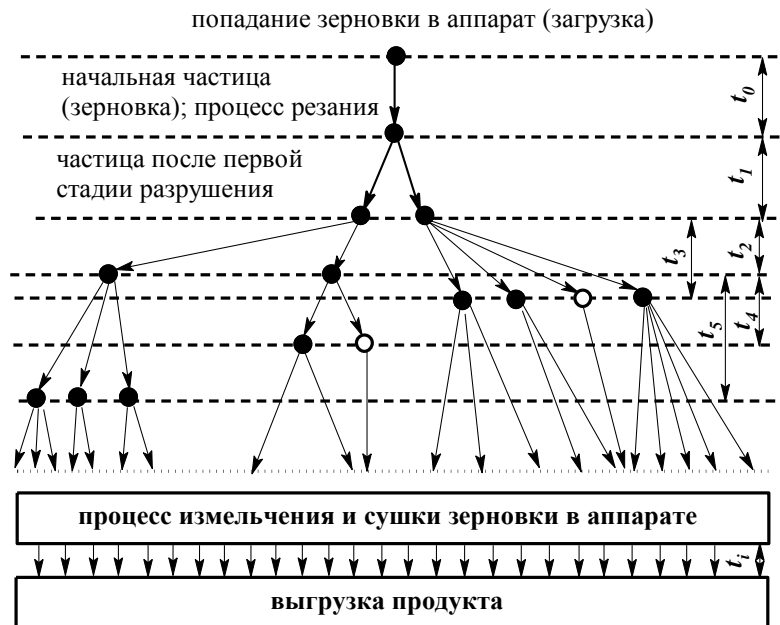


Рисунок 4 – Хронограмма процесса измельчения и сушки зерна

Если же сравнить время только единичного акта разрушения и полное время сушки, то получим превышение времени сушки над временем разрушения в $(2,5 \div 8) \cdot (10^4 \div 10^6)$ раза.

Поэтому сушкой в момент разрушения частицы пренебрегаем. Таким образом, вводим вполне обоснованное допущение, что на рисунке 1 и 2 вершины графа представляют собой

акты измельчения продукта, а дуги – это процесс сушки.

На самом деле картина реального процесса измельчения, происходящего при обработке зерна, сложнее, так как частицы разрушаются неравномерно, имеют разное число стадий разрушения и разделяются не на две частицы, а на две и более при каждом разрушении. Тогда измельчение досушенного зерна на примере одной зерновки покажем на рисунке 4 с учетом различного времени выхода из аппарата, из режима измельчения и различного числа стадий разрушения для каждой частицы. Показанная схема является хронограммой, так как кроме всех стадий комбинированного процесса на рисунке показано время сушки в масштабе, дающее представление о процессе во времени.

Подход, реализованный на рисунке 4, позволяет обосновано разделить сушку и измельчение, одновременно показывая общий процесс сушки и измельчения как одно целое.

Моделирование процесса измельчения

Анализ процесса измельчения досушенного пророщенного зерна в сушилке–диспергаторе, выполненный с помощью графов на рисунках 1 и 2 и с помощью хронограммы рисунка 4, показывает возможность и необходимость разделения моделей измельчения и сушки пророщенного зерна в одном рабочем объеме.

Основной закон измельчения предложен П.А. Ребиндером и имеет вид [13]

$$A = A_v + A_f, \quad (12)$$

где A – полная работа внешних сил, Дж;

A_v – работа, затрачиваемая на упругую деформацию объема разрушаемого куска материала (теория Кирпичева–Кикка), Дж;

A_f – работа, затрачиваемая на образование новой поверхности (теория Риттингера), Дж.

$$A_v = \frac{\sigma_p^2 V}{2E}, \quad (13)$$

где σ_p – предел прочности измельчаемого материала, Па;

E – модуль упругости, Па;

V – объем измельчаемого материала, м³.

$$A_f = k_f F_u, \quad (14)$$

где k_f – удельная поверхностная энергия, Н/м;

S_n – величина вновь образованной поверхности, м².

Формула (12) отражает работу только на одной стадии измельчения. С учетом многократного измельчения материала и уравнений (10), (13) и (14) формула (12) принимает вид

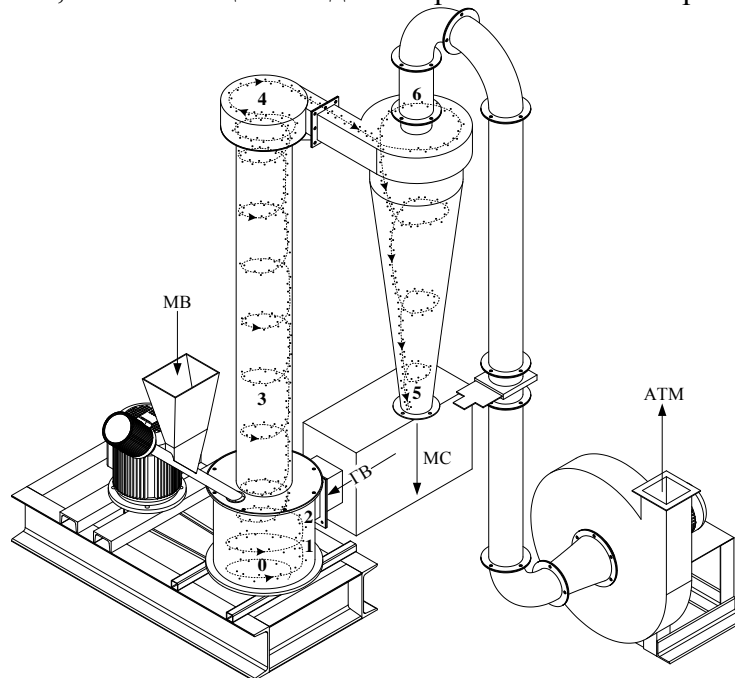
$$A = \frac{\sigma_p^2 V}{2E} n + k_f S_n = \frac{\sigma_p^2 V}{2E} \left(\lg \frac{z}{r} + b \right) + k_f S_n. \quad (15)$$

Таким образом, уравнение (15) в общем виде описывает процесс измельчения в сушилке–диспергаторе.

Моделирование процесса сушки

В сушилке-диспергаторе реализована схема сушки материала в вихревом закрученном потоке. Рабочая камера имеет вид барабанной вихревой камеры, в которой поток закручивается вокруг вертикальной оси.

Математические модели движения частиц в вихревых камерах, а также сам процесс сушки разработаны достаточно давно [14, 15]. В предлагаемой технологии, несмотря на то, что сушка также осуществляется в закрученном потоке, имеются серьезные отличия. Дополнительно к вращательному движению сушильного агента на движение продукта оказывает влияние вращательное движение ножей роторного измельчителя. Так как с процессом сушки совмещен процесс измельчения, то размер частиц и их активная поверхность теплообмена все время изменяются, пока частицы находятся в рабочей зоне аппарата.



АТМ – отвод сушильного агента в атмосферу;
 ГВ – горячий воздух; МВ – материал влажный; МС – материал сухой.
 Цифрами обозначены зоны обработки частиц.

Рисунок 5 – Схема сушилки–диспергатора с обозначением потоков

Выделим шесть зон в аппарате (рисунок 5), в которых происходит сушка и измельчение частиц дисперсного материала. В зоне 0 происходит доставка зерновки в рабочую зону. В зоне 1 реализуется одновременная сушка и измельчение материала за счет всех трех факторов: резания, дробления и истирания. Согласно схемам по рисункам 1, 2 и 4 и их анализу измельчение считаем кратковременным процессом, поэтому в данной зоне большую часть времени частица подвергается сушке. Оценочные расчеты показывают, что время сушки во всем аппарате на 3 – 5 порядков больше общего времени измельчения. По этой причине для зоны 1 рассмотрим только процесс сушки. В данной зоне закрученное движение материального потока осуществляется за счет тангенциальной подачи сушильного агента в рабочую камеру аппарата и за счет вращения роторного измельчителя.

В зоне 2 и 3 осуществляется процесс сушки и транспортировки частиц вверх. Далее следует сушка и транспортировка в зоне 4 (улитка) и перемещение потока в зону, где происходит разделение сушильного агента и материального продукта. Сушильный агент очищается и уходит вверх в зону 6, а частицы продукта, закручиваясь, оседают в зоне 5 (циклон), где происходит досушивание частиц.

Запишем общее время сушки в аппарате для частицы T_C^u в виде суммы

$$T_C^u = T_0^3 + \sum_{i=1}^n T_{1i}^3 + T_2^4 + T_3^4 + T_4^4 + T_6^4, \quad (16)$$

где T_C^u – полное время сушки для дисперсной частицы, с;

T_0^3 – время сушки зерновки от момента попадания в аппарата до первого акта измельче-

ния, с;

$\sum_{i=1}^n T_{li}^3$ – время сушки в зоне 1 при совмещении процессов измельчения и сушки, с;

T_2^u – время сушки при транспортировке в зоне 2 (верхняя часть рабочей зоны аппарата), с;

T_3^u – время сушки при транспортировке в зоне 3 (пневмотруба), с;

T_4^u – время сушки в зоне 4 (улитка), с;

T_5^u – время досушивания в зоне 5 (циклон), с.

Наибольшую сложность представляет зона 1, в которой зерновка измельчается при одно-временной сушке. В уравнении (16) время сушки представлено как сумма $\sum_{i=1}^n T_{li}^3$.

Для описания движения частицы в условиях тепло– и массообмена в сушильных аппаратах с закрученными потоками предлагается уравнение движения тела переменной массы [15]:

$$\frac{d(m_q \bar{v}_\tau)}{d\tau} = \bar{v}_1 \frac{dm_q}{d\tau} + \sum \bar{F}_i, \quad (17)$$

где m_q, \bar{v}_τ – текущие масса и скорость частицы соответственно, кг и м/с;

\bar{v}_1 – скорость отделяющейся (присоединяющейся) массы после отделения (до присоединения), м/с;

$\sum \bar{F}_i$ – вектор равнодействующих сил, оказывающих воздействие на частицу, Н.

С определенной долей приближения запишем уравнение движения потоков сушильного агента и дисперсного материала в зоне 1 в более простом, но развернутом виде как

$$\frac{d(m_q \bar{v}_\tau)}{d\tau} = \bar{G} + \bar{F}_A + \bar{N} + \bar{P}_a + \bar{F}_{mp}, \quad (18)$$

где \bar{G} – сила тяжести, Н;

\bar{F}_A – суммарная сила Архимеда в поле тяжести и в поле центробежных сил, Н;

\bar{N} – сила реакции стенки аппарата в направлении нормали или сила реакции ножа, Н;

\bar{P}_a – сила гидродинамического сопротивления со стороны потока сушильного агента, Н;

\bar{F}_{mp} – сила трения частицы о стенку аппарата или нож, Н.

Уравнения (17) и (18) подходят как для свободного движения частиц в потоке, так и в случае их контакта с ножами. Различие лишь в расшифровке некоторых сил и учете того факта, что уравнение для контакта частицы с ножом справедливо лишь между двумя соседними актами измельчения, когда частица постепенно меняет массу в процессе сушки, а не скачкообразно из-за разрушения.

Запишем уравнение кинетики сушки отдельной частицы в промежутке между двумя актами измельчения, которая соответствует периоду постоянной скорости сушки:

$$-\frac{dW}{d\tau} = \beta S_q (R_{II} T)^{-1} (\rho_{II R} - \rho_q) \quad (19)$$

Анализ задачи сушки возможен только численными методами, так как по мере перемещения частиц в аппарате постоянно меняются скорости обеих фаз, их температуры и влагосодержание [14]. К этому добавляется такой фактор, как дискретное изменение размера частиц.

Разобьем траекторию движущейся частицы в момент сушки (рисунок 4), то есть между актами разрушения, на малые участки с постоянными теплофизическими параметрами и значениями скорости сушильного агента ω и частиц материала v .

$$\bar{\tau}_i = \sum_{j=1}^q \Delta \bar{\tau}_j = \sum_{j=1}^q \left(\frac{\Delta \ell_j}{v_{\tau_j}} \right) \quad (20)$$

Тогда полное время с учетом разрушения частицы в период сушки для зоны 1 найдем как

$$\sum_{i=1}^n T_{1i}^3 = \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q \left(\frac{\Delta \ell_{ij}}{v_{\tau_{ij}}} \right) \quad (21)$$

В формулах (20) и (21) i отражает момент сушки между соседними актами разрушения частицы. Верхний предел в уравнении (21), то есть значение n необходимо уточнять в зависимости от выбранной модели разрушения.

Во всех остальных зонах математические модели процесса сушки не отличаются от выявленных закономерностей для сушки в закрученных потоках [15] и могут быть построены на уравнениях (17)–(20) без учета дискретного характера сушки.

Заключение

Применение теории графов и выполненные оценочные расчеты по времени процесса измельчения и времени сушки позволили разделить комбинированный процесс сушки и измельчения пророщенного зерна на независимые друг от друга этапы, несмотря на их одно-временный характер. Время сушки превышает время измельчения независимо от механизма последнего, то есть резания, дробления или истирания, на многие порядки. Оценочные расчеты в случае использования гипотез разрушения частиц по самым затратным с точки зрения времени вариантам дают превышение времени сушки над общим временем измельчения на 3–5 порядков, а для единичного акта измельчения это превышение составляет 4–6 порядков, и в верхней границе даже почти 7 порядков, т.е. сушка длительнее измельчения в миллионы или десятки миллионов раз. Время разрушения мало по сравнению со временем сушки, что дает доказанную возможность разделить процессы разрушения зерна и тепло- и массообменные процессы сушки и разработать математические модели этих процессов независимо друг от друга.

Тем не менее в работе установлено и показано влияние процесса разрушения частиц на модели сушки в закрученных потоках. Оно выражено в дискретном характере сушки, так как ранее выявленные закономерности сушки частиц не учитывают мгновенного по сравнению с сушкой изменения массы частицы и изменения условий сушки: открываются новые поверхности частицы; дискретно изменяется площадь частицы; скачкообразно меняется парциальное давление пара над поверхностью частицы.

Выявленные общие закономерности комбинированной обработки зерна позволяют на этой основе разработать единую модель такого сложного процесса, как измельчение досушенного пророщенного зерна, учитывающую одновременно механику разрушения зерна и кинетику процессов сушки.

Литература

- 1 Шаршунов, В.А. Разработка направлений совершенствования оборудования для получения порошковых пищевых добавок из пророщенного зерна / В.А. Шаршунов, В.А. Шуляк, А.В. Евдокимов // Известия НАН Беларуси. Серия аграрных наук – 2009. – № 4. – С. 114–119.
- 2 Шкирман, Т.Л. Пророщенное зерно пшеницы – перспективный сырьевой компонент в производстве мучных кондитерских изделий / Т.Л. Шкирман, С.В. Шевчук, Р.Г. Кондратенко // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VI-я Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов., Могилев, 24-25 апреля, 2008 г. / Мог. гос. ун-т прод.; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч.1. – С. 132.
- 3 Шаршунов, В.А. Биотехнологические приемы повышения эффективности использования зерновых ресурсов Беларуси / В.А. Шаршунов, Е.Н. Урбанчик, Л.А. Касьянова, П.Г. Иванов, О.В. Агеенко // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук – 2008. – №1. – С. 101–106.
- 4 Алексеенко, И.О. Изучение процесса сушки пророщенного зерна злаковых культур / И.О. Алексеенко, Е.Н. Урбанчик // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VI-я Междунар. науч. конф. студентов и

Процессы, аппараты и оборудование пищевых производств

- аспирантов., Могилев, 24-25 апреля, 2008 г. / Мог. гос. ун-т прод.; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч.1. – С. 3.
- 5 Березина, Л. Ю. Графы и их применение: Пособие для учителей / Л. Ю. Березина. – М.: Просвещение, 1979. – 143 с.
- 6 Кузнецов, О.П. Дискретная математика для инженера / О.П. Кузнецов, Г.М. Адельсон–Вельский. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 480 с.
- 7 Глебов, Л.А. Комбикормовая промышленность: Рациональные режимы и оценка эффективности работы дробилок ударного действия / Л.А. Глебов, Е.В. Семенов – М.: ЦНИИИИ, 1988. – 54 с. – (Обзорная информация / Центр. науч.-исслед. ин-т информации и техн.-экон. иссл-ний)
- 8 Стабников, В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н. Стабников, В.М. Лысянский, В.Д. Попов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 503 с.
- 9 Демидов, А.Р. Измельчающие машины ударного действия / А.Р. Демидов, С.Е. Чирков. – М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1969. – 72 с. – (Обзорная информация / Центр. научн.-исслед. ин-т информ. и техн.-экон. иссл-д.).
- 10 Евдокимов, А.В. Исследование удерживающей способности и среднего времени пребывания материала в объеме рабочей камеры установки // Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості: матеріали доповідей, матеріали міжнародної науково–практичної конференції, Київ, 10-11 квітня, 2012 р. / Нац. ун-т харчових технологій: редкол.: С.В. Иванов [і др.]. – Київ, 2012. – С. 122–124.
- 11 Егоров, Г.А. Технологические свойства зерна / Г. А. Егоров. –М.: Агропромиздат 1985. – 168 с.
- 12 Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – Л.: Химия, 1987. – 264с.
- 13 Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – 8-е изд., перераб. – М.:Химия, 1971. – 784с.
- 14 Фролов, В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.
- 15 Муштаев, В.И. Конструирование и расчет аппаратов со взвешенным слоем: учеб. пособие / В.И. Муштаев, А.С. Тимонин, В.Я. Лебедев. – М.: Химия, 1991. – 344 с.

Поступила в редакцию 20.12.2016