

говых компаний и других организаций для повышения эффективности функционирования данной сферы оказываемых работ и услуг.

6. Для дальнейшего технического переоснащения сельского хозяйства является чрезвычайно актуальным создание сети современных машинно-технологических станций (МТС), обеспечивающих применение новых высокоинтенсивных технологий (в том числе на уборке зерновых и зернобобовых культур), позволяющих существенно повысить производительность труда, снизить издержки на производство сельскохозяйственной продукции. В этой связи необходимо дополнительно создать в 2008-2010 гг. по 2-3 МТС в каждой области, в первую очередь, в районах низкой технической обеспеченности.

7. Для повышения эффективности функционирования рынка зерноуборочной техники требуется современная организация региональных технических центров, развитие фирменных дилерских сетей для комплексного обеспечения сбыта и технического сервиса производимых зерноуборочных комбайнов в гарантийный и послегарантийный периоды эксплуатации.

8. Для продления срока службы зерноуборочной и кормоуборочной техники необходимо добиться

повышения качества ремонта узлов и агрегатов машин на базе новых технологий и оборудования для ремонта, обеспечивающих повышение ресурсов отремонтированных узлов и агрегатов до 100% от уровня ресурса новых. Для чего необходимо предусмотреть развитие предприятий специализированного ремонта узлов и агрегатов, обеспеченных высокоточным оборудованием, оснасткой и квалифицированными кадрами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная программа возрождения и развития села на 2005-2010 годы. – Мн.: Беларусь, 2005. – 96 с.

2. Справочник нормативов трудовых и материальных затрат для ведения сельскохозяйственного производства / Нац. акад. наук Беларуси; Институт экономики – Центр аграрной экономики; под ред. В.Г. Гусакова; сост. Я.Н. Бречко, М.Е. Суманов. – Минск: Бел. наука, 2006. – 709 с.

УДК 664.83

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 26.01.2007

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОГО КРАСИТЕЛЯ

**З.В. Ловкис, д.т.н., профессор, В.В. Чуешков, инженер (РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию»)**

### Аннотация

*В статье аналитически рассмотрен процесс измельчения и получено уравнение его кинематики, позволяющее определять основные параметры измельчающих аппаратов для получения натуральных продовольственных красителей.*

### Введение

При производстве ассортимента продуктов питания используются красители и ароматизаторы для придания продукту запаха, вкуса и цвета. В качестве сырья для производства красителей можно использовать сухой полуфабрикат свеклы, моркови, различных ягод и другого сырья, который подвергается измельчению в молотково-штифтовом аппарате. Качество измельчения следует рассматривать с точки зрения образования поверхности трения частиц обрабатываемого материала и рациональных параметров измельчителя.

В процессе производства широкого ассортимента продуктов питания применяются красители и арома-

тизаторы для придания продуктам определенного оттенка, запаха, вкуса и цвета [1].

Применяемые в отечественной пищевой промышленности красители ввозятся в Республику Беларусь из-за рубежа. Зачастую это продукты химического происхождения.

В Научно-практическом центре Национальной академии наук Беларуси по продовольствию осуществляется разработка импортозамещающей технологии и комплекса машин для производства красителя из натурального отечественного сырья. В предложенной технологии за основу взят один из способов тонкого измельчения растительного сырья – помол. Конструкция аппарата для производства натуральных продовольственных красителей построена на основе математической модели, характеризующей законо-

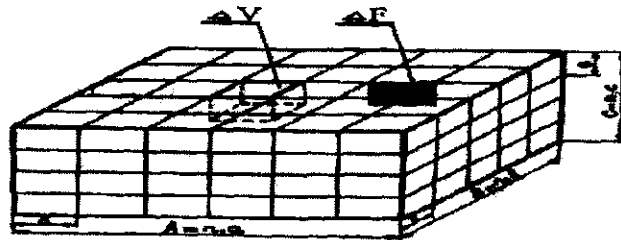


Рисунок 1. К определению  $F_{max}$  и  $\Delta F$ .

мерность процесса измельчения натурального растительного сырья (свеклы и моркови) [2].

Охарактеризуем основные особенности процесса измельчения полуфабрикатов продовольственного красителя, положенные в основу разработанной математической модели. Рассматривая процесс измельчения сухого полуфабриката в камере измельчителя с ротационными рабочими органами молотково-штифтового типа, следует исходить из положения, что качество измельчения материала в единице объема тем выше, чем больше общая поверхность трения частиц обрабатываемых материалов.

Количественное соотношение между величиной поверхности трения в данный момент  $F_t$  и продолжительностью взаимодействия  $t$  характеризует кинематику процесса измельчения, т.е.  $F_t = f(t)$ .

Предположим, что за время  $t$  была образована поверхность трения между частицами измельченных материалов  $F_t$ . Максимально возможная поверхность  $F_{max}$  будет при  $t = \infty$ . Изменение поверхности трения за время  $t$  будет  $F_{xt}$ .

При изменении времени от  $t$  до  $(t + \Delta t)$  поверхность трения изменяется на величину  $\Delta F_t$ , т.е.  $F(t + \Delta t) - F_{xt} = \Delta F_t$ . Для этого промежутка времени скорость изменения поверхности трения пропорциональна разности между их максимальной и фактической поверхностями.

$$\frac{dF_{xt}}{dt} = K(F_{max} - F_{xt}), \quad (1)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности. В результате интегрировании уравнения (1) и решая его потом относительно  $F_{xt}$  [3], получим

$$F_{xt} = F_{max} (1 - e^{-kt}). \quad (2)$$

Для определения физической сущности величины  $F_{max}$  обозначим факторы, влияющие на максимальную поверхность трения в выделенном из общего объема единичном объеме измельчаемого материала.

Из рисунка (рис. 1)  $K_v = n_1 n_2 n_3$  — общее число частиц состоит из элементарных объемов в единичном объеме  $V_v$ :

$(K_v - 1)$  — число поверхностей трения для рассматриваемого измерения.

Поверхность одной частицы:

$$2(bc + ac + ab) = F_v. \quad (3)$$

Поверхность единичного объема измельчаемого материала,

$$2(BC + AC + AB) = F_v. \quad (4)$$

Таким образом,

$$F_{max} = \frac{1}{2} (K_v F_v - F_v). \quad (5)$$

Так как

$$K_v = \frac{V_1}{\Delta V}; \quad a \quad \Delta V = a b c.$$

Окончательно получим

$$F_{max} = \frac{1}{2} \left( \frac{V_1 F_v}{\Delta V} - F_v \right). \quad (6)$$

Подставляя значение  $F_{max}$  из выражения (6) в формулу (2) получим,

$$F_{xt} = \frac{1}{2} \left( \frac{V_1 F_v}{\Delta V} - F_v \right) (1 - e^{-kt}). \quad (7)$$

Из уравнения (3)

$$F_v = 2(bc + ac + ab) = 2[ab + c(a + b)].$$

Следовательно, значение  $ab$  будет при данном объеме  $\Delta V$  тем больше, чем меньше  $c$  — один из размеров частицы.

Отсюда следует, что при данном объеме частицы  $\Delta V = abc$  ее поверхность  $F_v$  будет наибольшей, если два размера из них будут наименьшими, а любая из трех — наибольшей.

Полученные уравнения (2) и (6) характеризуют кинематику процесса измельчения при условии идеальной обработки материалов.

Можно предположить, что процесс измельчения является вероятностным, и необходимо стремиться к идеальному измельчению продукта в поступившем полуфабрикате. Процессы, происходящие в одинаковых условиях, при установившемся режиме приводят к измельчению и переизмельчению материала.

Физико-химические показатели материала, степень измельчения и методы испытаний принимались в соответствии с разработанными техническими условиями ТУ ВУ 190239501.112-2005 (Порошки овощные красящие).

В результате происходящих процессов и обработки материал достигает требуемого качества измельчения с соответствующими затратами энергии. Улучшение степени измельчения обусловлено как конструкцией и режимом работы измельчаемого аппарата, так и физико-механическими свойствами материала.

В реальных условиях практический процесс измельчения отличается от идеального, под которым понимается получение готового материала заданного качества без его переизмельчения. Путем выбора рациональных рабочих органов и определения оптимальных режимов работы можно только приблизить процесс измельчения к идеальному.

Таким образом, для полной характеристики процесса обработки полуфабриката необходим показатель, который характеризовал бы процесс переизмельчения. Для оценки этого показателя введем коэффициент переизмельчения  $q$ . Тогда уравнение кинематики измельчения (2) примет вид

$$F_{xt} = F_{max} (1 - e^{-kt}) (1 - q). \quad (8)$$

Теоретически коэффициент  $q$  можно определить следующим образом.

Если при измельчении образуется площадь поверхности трения  $F_c$ , то соответственно образуется и площадь поверхности переизмельчения  $F_q$ . Отсюда

$$F_{max} = F_c + F_q \quad (9)$$

или

$$F_q = F_{max} - F_c. \quad (10)$$

Тогда коэффициент  $q$

$$q = \frac{F_q}{F_{max}}. \quad (11)$$

На основании опытных данных при  $F_q = 4,7 \dots 8,2\%$ ,  $F_{max} = 92 \dots 96\%$  значение

$$q = 0,05 \dots 0,9.$$

Из равенства (11) следует, что чем меньше поверхность переизмельчения  $F_q$ , тем эффективнее процесс измельчения и ниже затраты энергии. Необходимо создавать такой технологический процесс и рабочие органы для измельчения, при которых  $F_q$  стремится к нулю.

С учетом (11) уравнение (8) примет вид

$$F_{xt} = F_{max} \left( 1 - \frac{F_q}{F_{max}} \right) (1 - e^{-kt}) = (F_{max} - F_q) (1 - e^{-kt})$$

Тогда

$$F_{xt} = F_c (1 - e^{-kt}). \quad (12)$$

Совместное решение уравнений (8, 10, 12) позволяет написать равенство

$$F_c = F_{max} (1 - q); \quad (13)$$

$$F_q = F_{max} q. \quad (14)$$

В формуле (12) величина  $F_{xt}$  характеризует равномерность измельченного материала.

В общем виде степень измельчения, выраженная зависимостью (13), возрастает, а степень переизмельчения, выраженная зависимостью (14), уменьшается.

Следовательно, для получения качественного материала измельчение должно преобладать над переизмельчением. Это достигается при условии, когда сам процесс измельчения целенаправлен. Готовый продукт, образуемый при этом, должен сразу же удаляться.

Уже в начальный период измельчения материал имеет некоторую поверхность трения, которая образуется в результате поступления частиц в камеру выхода продукта, различающихся по физическим свойствам. При активном воздействии рабочих органов площадь поверхности трения элементов частиц увеличивается под действием деформации сдвига и растяжения. Этот процесс в системе продолжается до тех пор, пока площадь поверхности трения не достигнет возможно максимальной величины. Тогда измельчение можно считать завершенным.

В выражении (12) величина  $F_c$  определяет поверхность трения между частицами, что соответствует равномерности измельчения.

Из анализа формулы видно, что максимально возможная поверхность между частицами достигается при  $t = \infty$ , тогда

$$F_{xt} = F_c (1 - e^{-kt}) = F_c.$$

Таким образом, формула (12) представляет собой выражение закономерности кинематики процесса измельчения. Однако этого недостаточно для определения  $F_{xt}$ , потому что значение  $F_c$  не может быть найдено экспериментально.

Если принять какой-нибудь единичный объем измельченной массы, состоящей из большого числа частиц, элементарный объем которых равен  $\Delta V$ , а поверхность из  $K_s$  равных элементарных поверхностей  $\Delta F$  (см. рис. 1), то качество обработки можно оценить степенью измельчения частиц, образованной поверхностью их трения. Для выполнения этого условия достаточно, чтобы в любой части элементарного объема присутствовал по крайней мере один элемент поверхностного касания частиц.

Пусть  $K_s$  большое, но определенное число. С увеличением поверхности трения значение  $\Delta F = F_c / K_s$  возрастает.

Вероятность  $E_i$  того, что элемент поверхности трения будет находиться в некотором элементарном кубике, пропорционально величине  $\Delta F$ . Следовательно,

$$E_i = K_i \Delta F, \quad (15)$$

где  $K_i$  - коэффициент пропорциональности,  $K_i = 0,9 \dots 1,1$ .

Так как все элементы поверхности трения равны между собой, а частицы элементарного объема являются случайно выбранными, это соотношение остается справедливым для всех элементов поверхности трения, независимо от их порядкового номера, т. е.

$$E_i = K_i \Delta F, \text{ причем } i \text{ меняется от } 1 \text{ до } K_s.$$

Вероятность того, что по крайней мере один из  $P_K$  элементов данной поверхности касания попадает в кубик  $\Delta V$  (см. рис. 1), оценивается на основании закона Пуассона [4], из которого следует, что

$$P_K = 1 - e^{-K_i \Delta F}, \quad (16)$$

где  $P_K$  - вероятность попадания элемента поверхности касания в кубик  $\Delta V$ .

Заменяв  $F$  его выражением  $F_{xt}$  из формулы (12), получим

$$P_K = 1 - e^{-K_i F_c (1 - e^{-kt})} \quad (17)$$

Формула (17) выражает вероятность появления в случайно выбранной части единичного объема материала одного из элементов поверхности трения в течение времени  $t$  [5]. Из формулы (17) можно определить из массы частиц долевую часть их элементарного объема, которая состоит из кубиков, содержащих один из элементов поверхности трения. Обозначив эту массу через  $E_i$ , имеем

$$E_i = 1 - e^{-K_i F_c (1 - e^{-kt})}. \quad (18)$$

Предположим, что для определения  $K_i F_c$  и  $K$  из уравнения (18) были взяты пробы объемом  $V_0$ . Согласно уравнению (17) вероятность отсутствия пере-

измельченных частиц в любой части объема  $V_e$  определяется выражением

$$\left[ e^{-KiFc(1-e^{-kt})} \right] \frac{Ve}{Vo}$$

На основании этого запишем:

$$(E_t)_E = 1 - \left[ e^{-KiFc(1-e^{-kt})} \right] \frac{Ve}{Vo} \quad (19)$$

По уравнению (19) можно определить значение той доли общего числа объемов  $V_0$ , которая состоит из объемов  $V_e$ , содержащих измельченный материал частиц  $A$ .

Решения уравнений (18) и (19) характеризуют процесс измельчения материалов в реальных условиях. Применение и решение их позволяет определять отдельные параметры процесса обработки полуфабриката.

Рассмотрим на примере применение предложенных теоретических зависимостей для определения частоты вращения ротора измельчителя. В дробилке измельчается материал из моркови с минимальной частотой вращения рабочих органов, равной  $2,8 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ . При этой частоте вращения ротора выход измельченной массы определялся через три минуты. Он составил 35% от загрузочной массы. При частоте вращения ротора  $4,2 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$  через этот же промежуток времени выход измельченной массы составил 46%. Для полного выхода измельченного материала с учетом потерь (налипание на рабочие поверхности измельчителя, оседание в фильтре), т. е. 95%, определим необходимую частоту вращения ротора измельчителя. Используя уравнение (18) и применяя графоаналитические методы расчетов, определим значения показателей, т. е.  $K = -1,25$  и  $KiFc = 2,75000$ . Значение  $p$  определяем по уравнению (19). В уравнении значение объема  $V_0$ , согласно опытных данных принималось равное  $4000 \text{ см}^3$ . Объем измельченного материала  $V_e$  с учетом потерь составлял в среднем  $3800 \text{ см}^3$ . Тогда подставляя данные в уравнение, имеем

$$0,95 = 1 - \left[ e^{-2,7 \cdot 5000(1-e^{t,25n})} \right] \frac{3800}{4000}$$

Решая это уравнение относительно  $p$ , получаем  $p = 5,4 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ . Результаты теоретического анализа подтверждают данные полученные экспериментальным путем (рис. 2).

Из графика видно, что при частотах вращения рабочих органов измельчителя  $(5...6) \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$  модуль измельчения достигает требуемого значения,

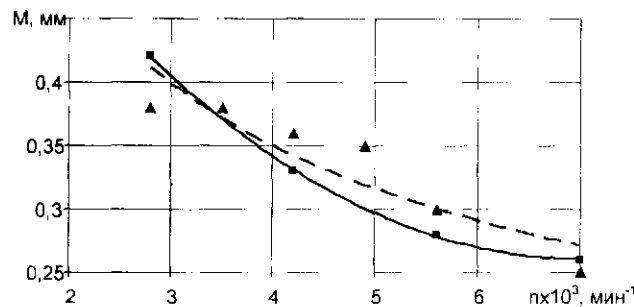


Рисунок 2. Зависимость модуля помола моркови от частоты вращения ротора измельчителя:

----- расчетная, - - - - - опытная.

равного около  $0,3 \text{ мм}$ , после чего значение его уменьшается незначительно.

Получены расчетные зависимости модуля измельчения от частоты вращения ротора. Было установлено, что при изменении скоростей ротора от  $2,8$  до  $7,0 \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$  выход измельченного материала изменяется соответственно от 35 до 100 %.

На основании решения уравнения (19) определены значения модуля измельчения для опытных частот вращения ротора измельчителя и построены расчетная и опытная зависимости модуля измельчения от частоты вращения ротора (рис. 2).

#### Выводы

1. Разработана математическая модель, характеризующая закономерность процесса измельчения полуфабрикатов натуральных продовольственных красителей.
2. Решения аналитических зависимостей (18) и (19) позволяют определить основные кинематические параметры измельчающих аппаратов для получения натуральных продовольственных красителей в реальных условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Харламова О. А., Кафка Б. В. Натуральные пищевые красители. М.: «Пищевая промышленность», 1979. — 192 с.
2. Ловкис З.В., Чусшков В.В., Зайченко Д.А., Дашкевич Ч.С. Комплекс для производства полуфабриката продовольственного красителя из растительного сырья // Агропанорама, № 4, 2005. — С. 5-8.
3. Бронштейн И.И., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М.: Наука, 1980. — С. 197, 784.
4. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. — М.: Наука, 1979. — 104 с.
5. Китун А.В., Передня В.И., Кузмицкий А.В. Исследование процесса работы измельчителя — смесителя кормов вертикального типа // Вестник БГСА, №3, 2004. — 112 с.