

**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
КРИСТАЛЛОВ САХАРНОГО УТФЕЛЯ**

Продукт массовой кристаллизации из растворов является полидисперсным. Для характеристики дисперсности кристаллов могут быть использованы различные виды распределений с числом параметров от одного до четырех. Чаще всего применяют двухпараметрические законы распределения.

Математически обоснованный выбор закона распределения кристаллов по размеру (l , мм) труден, так как классические методы требуют большого объема экспериментальных данных (выборка не менее 50 единиц), а методы, предложенные для небольшого объема данных, еще несовершенны.

Экспериментально установлено [6], что когда случайные отклонения l от его математического ожидания обусловлены множеством равновероятных случайных причин, распределение близко к нормальному [1], а когда разброс значений l увеличивается вместе с ростом кристаллов, распределение близко к логарифмически нормальному [4]. Другие виды распределений [5] физически менее обоснованы.

Форма и структура массивного кристалла и его зародыша часто различны, что обусловлено влиянием поверхностных молекул, у которых в зародыше число связей с ближайшими молекулами меньше [6]. Уже при ста молекулах эти отличия исчезают.

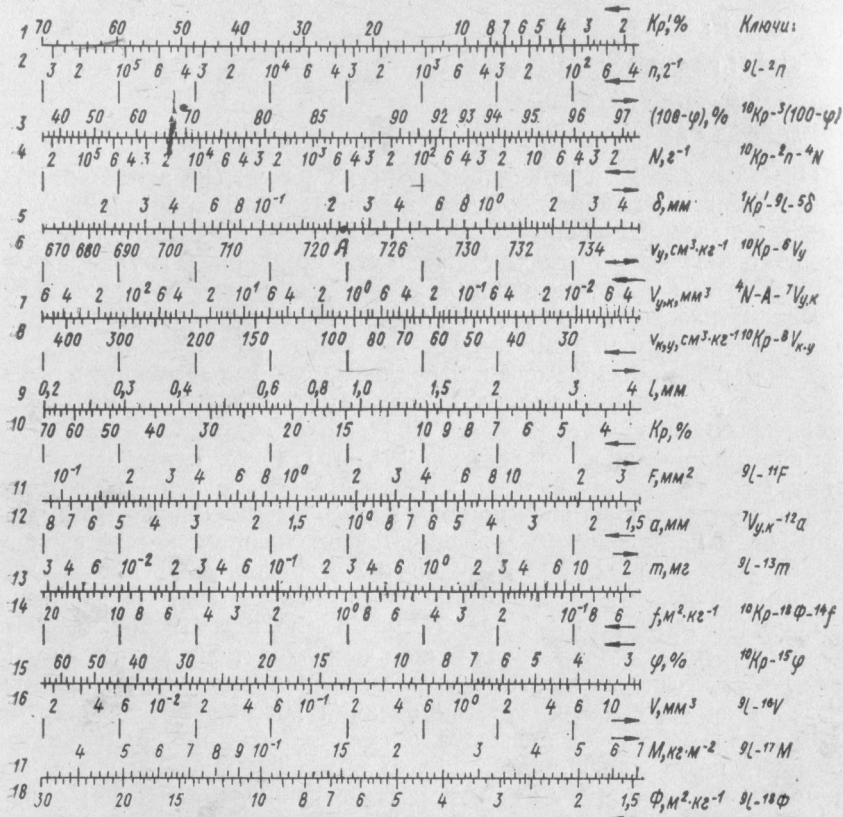
Быстрая обработка большого объема данных по гранулометрии возможна на основе анализа микроскопической картины с помощью специальных сканирующих устройств, связанных с ЭВМ. Но из-за сложности и высокой стоимости такие устройства пока не используются в промышленности.

В промышленных условиях кристаллы часто далеки от правильной формы. В процессе массовой кристаллизации различные кристаллы и грани одного и того же кристалла растут с разной скоростью. Тем не менее авторы в работах [8—10] считают, что в период роста форма кристалла остается подобной самой себе.

Коэффициент пропорциональности k в формуле связи между поверхностью кристалла F , мм², и его массой m , мг, $F = km^{2/3}$, по данным экспериментов, выполненных в разное время и в разных странах, составляет от 4,01 до 4,53. Для массовой кристаллизации ближе к средним значениям предложенное И. Н. Кагановым и использованное в данной работе $k = 4,23$, а не часто используемое $k = 4,12$, ко-

торое получено И. А. Кухаренко для весьма крупных одиночных кристаллов.

Молекулярный кристалл сахарозы (пространственная группа $P2_1$ аксиального класса моноклинной сингонии) образуется вследствие действия водородных связей. Молекула сахарозы несимметрична,



Геометрические характеристики кристаллов сахарозы и массива кристаллов в сахарном утфеле.

а пространственная симметрия элементарной ячейки кристалла обусловлена наличием в ней двух молекул.

Геометрические характеристики кристалла сахарозы в основном зависят от его размера, а кристаллов утфеля — еще и от их содержания в его массе ($Kp, \%$).

Трудности нахождения вида распределения кристаллов по размеру и степени их неоднородности привели к оценкам свойств кристаллов на основе их среднего размера [2, 3, 7].

В качестве характерного размера кристалла l автор взял длину кристалла (его размер вдоль кристаллографической оси b) с учетом

связи l с t и числом кристаллов в одном их грамме n (такая связь давно используется в сахарном производстве).

Чтобы упростить трудоемкий и сложный расчет геометрических характеристик кристаллов, создана 18-шкальная номограмма (рисунк). Для каждой шкалы слева приведен ее порядковый номер, а справа — буквенное обозначение соответствующей величины, единица ее измерения и ключ, с помощью которого эту величину можно найти. Левый верхний индекс возле буквенного обозначения величины указывает номер отвечающей ей шкалы. Стрелки показывают направление роста численных значений по шкале.

Ниже приведена характеристика шкал:

1. Вспомогательная шкала $Kp' = 1,9-70\%$ (используется только при определении толщины пленки раствора на кристалле).

2. Количество кристаллов размера l в 1 г этих кристаллов $n = 10^3/0,35 l^3 = 40-3,5 \cdot 10^5 \text{ г}^{-1}$. Значение 2n находится на одной вертикали со значением 9l . Чтобы облегчить проведение вертикальных линий, на свободном пространстве номограммы с равномерным шагом проведены участки вертикалей.

3. Содержание межкристального раствора в процентах к объему утфеля при 60°C (средняя для условий производства температура утфеля) и коэффициенте пересыщения межкристального раствора $\Pi = 1$ ($100-^{15}\varphi$) = $34-97,2\%$. Значение $^3(100 - \varphi)$ лежит на одной вертикали со значением ^{10}Kp .

4. Количество кристаллов размера l в 1 г утфеля $N = 0,01 n Kp = 2-2,5 \cdot 10^5$. Значение 4N лежит на одной прямой со значениями ^{10}Kp и 2n .

5. Средняя толщина пленки межкристального раствора на кристалле при 60°C и $\Pi = 1$. Она определена как разность между радиусом шарообразной ячейки утфеля с центром в центре кристалла и радиусом шара, имеющего объем, равный объему кристалла $\delta = (0,75/\pi)^{1/3} (V_{y,k}^{1/3} - V^{1/3}) = 0,12-4,2 \text{ мм}$. Значение $^5\delta$ лежит на одной прямой со значениями 9l и $^1Kp'$ (величина $^1Kp'$ равна Kp).

6. Удельный объем некипящего утфеля при 60°C , $\Pi = 1$ и разных значениях Kp : $V_y = 0,01 Kp/\rho_{kp} + (1-0,01 Kp)/\rho_m = 665-735 \text{ см}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$. Плотность межкристального раствора (ρ_m , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$) мало зависит от его чистоты. При $CB = 65-90\%$ и $t = 10-90^\circ\text{C}$ (с предельной относительной погрешностью $0,15\%$ для водного раствора сахарозы) $\rho_m = 970,4 \cdot 1,0047^{cb} - (t-20)(CB \cdot 10^{-3} + 0,515)$. С точностью того же порядка плотность кристалла $\rho_{kp} = 1592-0,17t$. Значение 6V_y лежит на одной вертикали с ^{10}Kp .

7. Объем утфеля, приходящийся на один кристалл при 60°C и $\Pi = 1$ $V_{y,k} = V_y/N = 3 \cdot 10^{-3}-600 \text{ мм}^3$. Значение $^7V_{y,k}$ лежит на одной прямой с 4N и точкой А шкалы 5.

8. Объем, занимаемый кристаллами в 1 кг утфеля при 60°C и $\Pi = 1$ $V_{y,k} = VN = 21-440 \text{ см}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$. Значение $^8V_{y,k}$ лежит на одной вертикали с ^{10}Kp .

9. Длина кристалла $l = 0,2-4,2 \text{ мм}$.

10. Содержание кристаллов в утфеле $Kp = 3,4-70\%$.

11. Площадь поверхности одиночного кристалла $F = 2,1l^2 = 0,09-35 \text{ мм}^2$. Значение ^{11}F лежит на одной вертикали со значением 9l .

12. Среднее расстояние между центрами равномерно распределенных в объеме утфеля кристаллов размера $l \mid a = V_{y.k}^{1/3} = 0,15-8 \text{ мм}$. Значение ^{12}a лежит на одной вертикали со значением $^7V_{y.k}$.

13. Масса одиночного кристалла $m = 0,35 \text{ г} = 3 \cdot 10^{-3}-25 \text{ мг}$. Значение ^{13}m лежит на одной вертикали со значением 9l .

14. Площадь поверхности кристаллов в 1 кг утфеля $f = 0,01 \text{ ФКр} = 5 \cdot 10^{-2}-20 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$. Значение ^{14}f лежит на одной прямой с $^{18}\Phi$ и $^{10}\text{Кр}$.

15. Содержание кристаллов в процентах к объему утфеля при 60°C и $\Pi = 1$ и $\phi = 100/[100/(Kp-1) \mid \rho_{кр}/\rho_m + 1] = 2,8-66\%$. Значение $^{15}\phi$ лежит на одной вертикали со значением $^{10}\text{Кр}$.

16. Объем одиночного кристалла $V = 0,2212 \text{ л}^3 = 1,8 \cdot 10^{-3}-16 \text{ мм}^3$. Значение ^{16}V лежит на одной вертикали со значением 9l .

17. Масса кристаллов с площадью поверхности в 1 м^2 $M = m/F = l/6 = 0,034-0,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$. Значение ^{17}M лежит на одной вертикали с 9l .

18. Площадь поверхности одного килограмма кристаллов $\Phi = 1/M = 6/l = 1,45-30 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$. Значение $^{18}\Phi$ лежит на одной вертикали с 9l .

Например, для кристаллов размером $0,5 \text{ мм}$ (9l) найдем, что их количество в 1 г составляет $2,3 \cdot 10^4$ шт. (2n), у одиночного кристалла площадь поверхности $^{11}F = 0,525 \text{ мм}^2$, масса $^{13}m = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ мг}$, а объем $^{16}V = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^3$; площадь поверхности в 1 м^2 будет приходиться на 83 г кристаллов, (^{17}M), а площадь поверхности 1 кг кристаллов равна 12 м^2 ($^{18}\Phi$).

Для рафинадного утфеля при 60°C , $\Pi = 1$ $^9l = 0,5 \text{ мм}$ и $^{10}\text{Кр} = 50\%$ получим, что объемное содержание межкристалльного раствора $^3(100-\phi) = 54\%$, количество кристаллов в 1 г утфеля составляет $1,15 \cdot 10^4$ штук (4N), толщина пленки межкристалльного раствора на кристалле $^{5\delta} = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$, удельный объем утфеля $^6V_y = 685 \text{ см}^3 \times \text{кг}^{-1}$, объем утфеля, приходящийся на один кристалл $^7V_{y.k} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^3$, занимаемый кристаллами в 1 кг утфеля объем равен 315 см^3 ($^8V_{y.k}$), среднее расстояние между центрами кристаллов $^{12}a = 0,4 \text{ мм}$, площадь поверхности кристаллов в 1 кг утфеля составляет 6 м^2 (^{14}f), а объемное содержание кристаллов в утфеле $^{15}\phi = 46\%$.

Номограмма при обычно используемых в процессе промышленной кристаллизации температурах $40-80^\circ\text{C}$ и пересыщениях $\Pi = 1,0-1,1$ для продуктов с доброкачественностью, близкой к 100% (рафинадное производство), дает относительную погрешность определения 6V_y (и связанных с объемом величин) порядка 1% . В других случаях значения $^3(100-\phi)$, $^{5\delta}$, 6V_y , $^7V_{y.k}$, ^{12}a и $^{15}\phi$ точнее находить по указанным для них формулам.

Приведенные формулы и номограмма позволяют быстро оценить

геометрические характеристики кристаллов утфеля, необходимые для расчетов кристаллизации и центрифугирования, а также геометрические характеристики массива кристаллов, необходимые в расчетах процессов сушки и хранения сахара. Легко прослеживается взаимосвязь между всеми геометрическими характеристиками кристаллов.

Список литературы

1. Белоконь И. А., Попов В. Д. Оценка качества кристаллизации утфелей.— Сах. пром-сть, 1962, № 10, с. 27—29.
2. Громковский А. И., Ремизова Н. А. Определение среднего размера кристаллов сахара методом фильтрования.— Сах. пром-сть, 1972, № 6, с. 41—45.
3. Даишев М. И., Люсый Н. А., Акиндинов И. Н. Определение среднего размера кристаллов утфеля.— Сах. пром-сть, 1971, № 5, с. 13—16.
4. Заборсин А. Ф., Васильева Т. К. Пневмотранспорт сахара в пищевой промышленности.— М.: Пищ. пром-сть, 1979,— 280 с.
5. Нывлт Я. Кристаллизация из растворов: Пер. со словац.— М.: Химия, 1974.— 152 с.
6. Петров Ю. И. Физика малых частиц.— М.: Наука, 1982.— 360 с.
7. Требин Л. И., Михайлик В. А., Штангеева Н. И. Колориметрическое определение среднего размера кристаллов сахара в утфеле.— Сах. пром-сть, 1977, № 7, с. 32—33.
8. Шефталъ Н. Н. Связь внешней формы кристаллов с однородностью и пересечением.— Докл. АН СССР, 1941, т. 31, № 1, с. 33—36.
9. Mather J. Applications de la technologie des pouders dans la mauntenion du sucre.— Sucrerie belge, 1972, 91, N 1, p. 467—489.
10. Saska M. Calculated form of the sucrose crystal.— I. S. J., 1983, N 9, p. 259—261.

Поступила в редколлегию 16.02.84.