

# К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УВАРИВАНИИ САХАРНЫХ УТФЕЛЕЙ

М. А. КАРАГОДИН

Московский технологический институт пищевой промышленности

Поступило: 4 января 1986 г.

Представлено: проф. д-р. Р. Ластить

## Abstract

The basic trends in the development of vacuum-pan crystallization have been discussed. The constructive and technological optimization in periodic vacuum-pans is described. The analysis have been made on the heating and mass transfer processes. The described methods are leading to decreasing of process time and vapor consumption.

При изучении процесса уваривания сахарных утфелей в вакуум-аппаратах периодического действия часто возникает вопрос, существует ли наилучшая стратегия уваривания, позволяющая получить требуемый объем утфеля с кристаллами однородного размера за наименьшее время и наиболее экономично. Однозначного ответа не существует в силу многообразия параметров, влияющих на этот процесс, таких, как конструкция вакуум-аппарата, параметры сиропа, давление греющего пара, мощность конденсатора и т. д. Однако могут быть сформулированы основные направления оптимизации процесса уваривания, характерные для любого типа вакуум-аппарата и сиропа, используемого при уваривании. Рассмотрим наиболее важные аспекты процесса уваривания, существенно влияющие на ход процесса.

Рассматривая, в первую очередь, конструкцию вакуум-аппаратов, следует отметить, что лучшими считаются прямостенные вакуум-аппараты, снабженные механическим циркулятором.

Преимущество прямостенных вакуум-аппаратов перед аппаратами, диаметр греющей камеры которых меньше диаметра остальной части вакуум-аппарата, заключается в получении более однородных по размеру кристаллов. Это связано с нарушением естественной циркуляции у II типа вакуум-аппаратов и наличием вследствие этого зон, в которых в силу более низкой пересыщенности кристаллы растут медленнее, чем в основной части вакуум-аппарата.

Наличие механических циркуляторов способствует ликвидации так называемых «застойных» зон в аппарате и обеспечивает более однородное распределение температур и концентраций по объему аппарата.

Наибольшего эффекта можно добиться с помощью циркулятора, имеющего лопасти не только под греющей камерой, но и в надутфельном пространстве [1].

При этом существенную роль играет место подачи сиропа в аппарат. При поступлении сиропа на уровне и выше уровня греющей камеры часть сиропа вследствие его сравнительно низкой плотности поднимается на поверхность утфеля, где циркуляция ограничена, тем самым создавая неоднородность пересыщения раствора по объему вакуум-аппарата. Преимуществом обладают вакуум-аппараты, в которых сироп поступает снизу, под греющую камеру в нескольких местах [1].

Требует внимания также вопрос о греющей камере, ее площади и расположении. В этой связи следует рассмотреть принципы соответствия потоков тепла, передаваемых от поверхности нагрева кипящему утфелю, потокам диффундирующих веществ, проникающих через пограничный слой к граням кристаллов.

На I стадии уваривания, после заводки кристаллов, скорость испарения воды  $Q_{\text{исп}} P - P_{\text{исп}}$  опережает (на I этапе — значительно) массовую скорость кристаллизации, то-есть выпаривается воды больше, чем это требуется для роста кристаллов. Это связано с малым значением поверхности кристаллов  $F$  и соответственно массовой скорости кристаллизации  $G_{\text{кр}}$ , являющейся функцией удельной скорости кристаллизации  $V_{\text{кр}}$  и  $F$ . На этой стадии вакуум-аппарат работает частично как выпарной аппарат, повышая количество пересыщенного межкристального раствора в аппарате  $M_m$ . Вторая стадия процесса наступает тогда, когда размер кристаллов и соответственно  $F$  кристаллов настолько выросли, что  $G_{\text{кр}}$  начинает опережать  $Q_{\text{исп}}$  (т. А) (рис. 1). С этого момента времени кристаллизация сахара осуществляется не только из поступающего сиропа, но и из накопленного межкристального раствора. В результате масса межкристального раствора  $M_m$  начинает падать, и расстояние между кристаллами  $d$  — соответственно уменьшаться. При

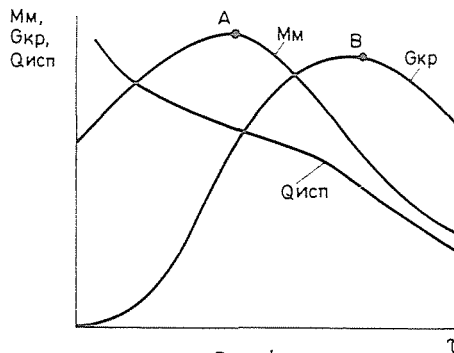


Рис. 1

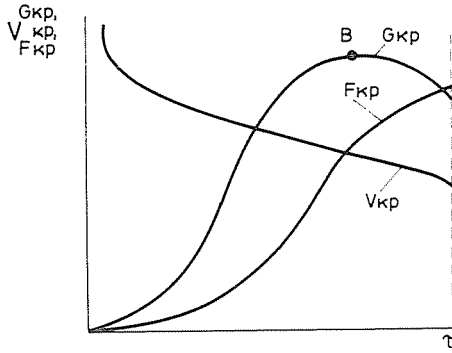


Рис. 2

этом несоответствие между  $Q_{исп}$  и  $G_{кр}$  все больше возрастает, так как  $Q_{исп}$  продолжает падать, а  $G_{кр}$  расти. Наконец, наступает такой момент, когда расстояние между выросшими кристаллами становится настолько малым, что их диффузионные слои начинают соприкасаться друг с другом, что ведет к понижению  $V_{кр}$  и увеличению скорости конгломерации, что вместе с падением  $ДБ$  межкристалльного раствора ведет к увеличению его вязкости и, в свою очередь, к уменьшению  $V_{кр}$  (рис. 2).

Совокупность описанных выше фактов ведет к тому, что  $G_{кр}$  начинает падать в т.  $B$  (рис. 2), что значительно снижает производительность вакуум-аппарата. При этом возникает вопрос, каковы пути дальнейшего повышения производительности вакуум-аппарата, что связано с поддержанием  $G_{кр}$  на максимальном уровне наиболее длительное время. Рассмотрим некоторые из них.

С целью увеличения расстояния между кристаллами, восстановления естественной циркуляции и уменьшения вязкости межкристалльного раствора целесообразно увеличить скорость подачи сиропа в аппарат  $Q_{сир}$  (в момент времени, соответствующий т.  $B$  на рис. 2). Для этого, с целью поддержания требуемой степени пересыщения раствора, соответствующей метастабильной зоне наращивания кристаллов, следует увеличить скорость испарения воды. Но, учитывая, что вентиль подачи пара открыт максимально, дальнейшее повышение  $Q_{исп}$  при неизменности конструктивных и физико-химических условий уваривания невозможно.

Как известно,  $Q_{исп}$  является функцией коэффициента теплопередачи  $K_{тп}$ , площади греющей камеры  $F_0$ , температур пара и утфеля, и разности энтальпий пара и воды  $i_1, i_2$ :

$$Q_{исп} = \frac{K_{тп} \cdot F_0 \cdot (T_{п} - T_{у})}{i_1 - i_2} \quad (1)$$

Исходя из уравнения (1), увеличение  $Q_{\text{исп}}$  возможно тремя путями: увеличением градиента температур  $\Delta T$ , увеличением коэффициента  $K_{\text{тн}}$ , увеличением поверхности греющей камеры.

Учитывая, что  $K_{\text{тн}}$  является функцией  $CB$  утфеля и  $\Delta T$ , первые два пути сводятся к увеличению  $\Delta T$ , что можно осуществить двумя методами:

- а) путем использования пара более высокого потенциала;
- б) путем увеличения разрежения в вакуум-аппарате, тем самым снижая температуру утфеля  $T_y$ .

Третий путь увеличения  $Q_{\text{исп}}$  предусматривает возможность увеличения площади поверхности греющей камеры в ходе уваривания утфеля, то-есть применение греющей камеры с «восходящим тепловым потоком».

Рассматривая вопрос о динамическом равновесии тепло- и массообмена при уваривании, следует сказать о существовании оптимального расстояния между кристаллами и, соответственно, оптимального процентного содержания кристаллов в утфеле. По данным ряда исследователей, кристаллизация сахарозы протекает наиболее интенсивно, а вероятность образования конгломератов близка к нулю, если при заводке кристаллов расстояние между ними  $d$  равно 0,4—0,5 мм, а основное наращивание кристаллов происходит при  $d$ , равном 0,1—0,2 мм. При этом процентное содержание кристаллов не должно превышать 25—30%, что связано также с необходимостью поддержания достаточной скорости естественной циркуляции.

Суммируя вышеуказанные выводы, можно предложить ряд принципов оптимального ведения процесса уваривания сахарных утфелей, которые заключаются в следующем.

Начальный набор кристаллов должен составлять 16—20% общего объема вакуум-аппарата с тем, чтобы  $d$  равнялось 0,4—0,5 мм.

Греющая камера должна состоять из нескольких (9—10) секций, подключаемых последовательно снизу вверх. На 1 этапе уваривания включается I секция греющей камеры, площадь которой соответствует площади поверхности кристаллов на данном этапе уваривания. Затем, когда вследствие увеличения размеров кристаллов расстояние  $d$  уменьшится до 0,1—0,05 мм, а процентное содержание кристаллов  $K_p$  поднимется выше 30%, подключается II секция греющей камеры, что ведет к увеличению  $Q_{\text{исп}}$ , а следовательно, и  $Q_{\text{сир}}$ . При этом увеличивается  $d$  и уменьшается  $K_p$ , достигая своих оптимальных для данного этапа значений. Затем, аналогичным образом подключаем последовательно остальные секции греющей камеры, поддерживая таким образом динамическое равновесие между режимом питания аппарата раствором, количеством выпариваемой воды и превратившегося в твердую фазу сахара.  $K_p$  при этом не превышает 30—32%, а  $d$  колеблется в пределах 0,1—0,2 мм.

Следует сказать, что общая площадь греющей камеры  $F_0$  должна превышать используемую обычно и занимающую обычно 30—40% высоты аппарата. Это позволит поддерживать приток тепла на достаточно высоком уровне на II стадии процесса, а также улучшает естественную циркуляцию в верхних слоях утфеля.

После подключения последней секции греющей камеры, когда  $K_p$  начинает превышать оптимальное значение 30—32%. Дальнейшее повышение  $Q_{исп}$  возможно либо путем подачи пара более высокого потенциала, либо путем понижения остаточного давления вторичного пара до минимальной величины. И лишь после этого на последней стадии следует отключить сироп и, подавая воду, довести  $K_p$  до значения 50—55%, а среднее значение размера кристалла до требуемой величины.

Важным аспектом процесса уваривания является физико-химическая оптимизация этого процесса, которая включает в себя химические свойства раствора, поступающего на уваривание, оптимальную степень пересыщения межкристалльного раствора, оптимальный температурный режим уваривания и т. д.

Представляет интерес «химический» оптимум концентрации водородных ионов, при котором наблюдается наименьшая скорость распада сахарозы. Минимум константы скорости разложения лежит вблизи 7,5—8 рН в довольно узком интервале изменения рН [2].

Важнейшим параметром является степень пересыщения раствора II, при которой осуществляют наращивание кристаллов. Оптимальным считается II, соответствующая максимальной  $V_{кр}$  при минимальной возможности образования вторичных кристаллов. Оптимальное значение II соответствует границе между метастабильной и лабильной зонами кристаллизации и зависит от доброкачественности раствора и его температуры, может быть выражено следующим уравнением:

$$P_{\text{опт}} = 1,129 - 0,284 \cdot [\text{НСХ}/(\text{НСХ} + \text{СХ})] + [(2,333 - 0,0709(T - 60))] \cdot [\text{НСХ}/(\text{НСХ} + \text{СХ})]^2, \quad (2)$$

где НСХ, СХ — количество несакхаров и сахара в растворе, кг,

$T$  — температура раствора, °С.

Например, для утфеля I оптимальная II изменяется от 1,11 в начале — до 1,16 в конце уваривания.

При заводке кристаллов следует учитывать, что образующиеся кристаллы имеют критический размер, ведущий к интенсивной конгломерации, равный 0,025—0,05 мм. Поэтому сразу после заводки кристаллов следует на 5—10 минут перевести пересыщение раствора из лабильной ( $II = 1,25 - 1,30$ ) в метастабильную зону наращивания кристаллов

( $P = 1,12 - 1,13$ ) с целью пройти этот критический размер, а затем вновь повысить значение  $P$  для «закрепления» кристаллов.

К температурной оптимизации относится создание максимального градиента температур на стадии сгущения путем поднятия значения разрежения на максимальный уровень (650–660 мм рт ст), вплоть до заводки кристаллов.

Кроме этого, температурная оптимизация включает в себя ведение процесса при температурах, соответствующих максимальной удельной скорости кристаллизации. Для утфеля  $I$  оптимальная температура утфеля в начале уваривания соответствует  $76 - 77^\circ\text{C}$  и понижается с уменьшением  $ДБ$  раствора к концу процесса до  $74 - 75^\circ\text{C}$ . Для утфеля  $II$  температура должна меняться от  $74 - 76^\circ\text{C}$ . Регулирование температурного режима может быть осуществлено путем соответствующего изменения разрежения  $P$  в вакуум-аппарате. Из сказанного выше следует, что оптимальное регулирование разрежения включает в себя поддержание после заводки кристаллов значения  $P$ , равного 600 мм рт. ст., повышение  $P$  к концу процесса до 630–640 мм рт ст, и в самом конце, при окончательном сгущении — до значения 650–660 мм рт ст.

Следует остановиться также на технологической оптимизации. Одним из путей технологической оптимизации процесса уваривания сахарных утфелей является уваривание последних с использованием готовой кристаллической основы с размером кристаллов 0,2–0,3 мм, находящихся на оптимальном расстоянии друг от друга.

В качестве кристаллической основы могут служить либо кристаллы, специально приготовленные в отдельном вакуум-аппарате небольшого размера, либо часть готового утфеля одного из продуктов  $I$ ,  $II$  или  $III$ , либо смесь сахара последней кристаллизации с сиропом, оттеком или смесью их (доведенной до пересыщенного состояния). Такой метод уваривания позволяет уваривать утфель при соответствии между массовой скоростью испарения  $Q_{исп}$  и массовой скоростью кристаллизации  $G_{кр}$ , что значительно сокращает время процесс и расход греющего пара.

Кроме этого, целесообразно проводить уваривание на густых сиропах ( $СВ = 70 - 75\%$ ), приготовленных в специальных «предварительных концентраторах». Это позволяет значительно сократить время процесса, сократить расход пара и уменьшить количество разложившейся сахарозы.

В заключение следует сказать, что техника оптимального ведения процесса уваривания сахарных утфелей в периодических вакуум-аппаратах далеко не ограничивается методами, описанными здесь, что невозможно в связи с многообразием оборудования, связанного с увариванием утфелей. Однако возможно, что предложенные методы совместно

с надежными контрольно-измерительными приборами, контролирующими основные параметры процесса, позволят улучшить результаты уваривания утфеля в любом типе вакуум-аппаратов.

### Литература

1. ЗИГЛЕР, Д.: Некоторые полезные методы уваривания сахарного утфеля. *Sug. J.*, янв., 1978, т. 40, 8, с. 8—13.
2. САПРОНОВ, А. Р.: *Технология сахара*. М., 1980, 256 с.
3. КАРАГОДИН, М. А.: Совершенствование процесса уваривания сахарных утфелей в периодически действующих вакуум-аппаратах. М., Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 1983.

МИХАИЛ А. КАРАГОДИН Московский технологический институт  
пищевой промышленности  
МОСКВА Волоколамское шоссе 11. СССР