

Повышение эффективности процесса уваривания утфеля, используя методы моделирования и оптимизации

С. П. Гольденберг¹, Н. Ю. Логунова²

Московский государственный университет пищевых производств

¹ gsp@mgupr.ru, ² nlogunova@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены вопросы оптимизации процесса кристаллизации сахарозы при ее уваривании в вакуум - аппарате. Показана возможность совершенствования технологии уваривания утфеля I кристаллизации на основе моделирования и оптимизации данного процесса.

Ключевые слова: моделирование процесса кристаллизации сахарозы; оптимизация процесса уваривания; утфель I кристаллизации; критерии оптимизации; параметрическая модель объекта управления; обобщенный критерий; распределение технологических потоков; целевая функция решения задачи оптимизации; экстремум целевой функции; критерий оптимальности

I. АНАЛИЗ ТП УВАРИВАНИЯ УТФЕЛЯ И МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для более глубокого изучения характера протекания процесса уваривания утфеля необходимо рассматривать этот процесс как сложную многопараметрическую технологическую систему. При этом следует ориентироваться на технологические особенности его реализации при уваривании утфеля I кристаллизации.

С этой целью были проведены соответствующие исследования и разработана математическая модель кристаллизации сахарозы [1, 2].

Для уточнения рациональных условий протекания процесса уваривания утфеля I кристаллизации в вакуум-аппаратах было проведено его моделирование. С этой целью были введены следующие допущения: концентрация сахарозы в исходном растворе выдерживается одинаковой; затравочные центры кристаллизации равномерно распределяются по всему его объему [5].

В результате выполненного количественного моделирования, процесса уваривания утфеля, была показана возможность использования данной модели для оценки эффективности процесса технологии получения сахара-песка в вакуум-аппарате в течение одного технологического цикла. Анализ данных, полученных в процессе моделирования, позволил выявить ряд математических зависимостей. Полученные при этом результаты были взяты за основу для проведения оптимизации данного процесса.

Оптимизация технологического процесса заключается в обеспечении его максимальной эффективности при заданных технологических условиях. С этой целью в самом начале делается выбор критерия оптимальности, под которым понимают количественный или качественный показатель, выражающий предельную меру эффекта принимаемого решения для сравнительной оценки возможных альтернатив и выбора наилучшего.

На основании соответствующего выбора составляется целевая функция, представляющая собой зависимость критерия оптимизации от параметров на нее влияющих. Методы оптимизации выбирают в зависимости от вида целевой функции, структуры ограничений и используемой для описания выбранной технологии математической модели. В данном случае задача оптимизации сводилась к нахождению таких значений технологических параметров, при которых целевая функция достигает экстремума в области установленных ограничений.

Так как проведенные исследования в этом направлении касались определения технологических условий уваривания утфеля I кристаллизации, то для оптимизации был выбран соответствующий критерий, отражающий изменение количественно-качественных показателей этого процесса.[4] Конечной целью уваривания утфеля I кристаллизации является обеспечение максимального выхода сахара независимо от качества исходного сырья. Поэтому данный показатель является одним из наиболее важных критериев оптимизации рассматриваемого процесса.

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТП УВАРИВАНИЯ УТФЕЛЯ

Для решения задач оптимизации процесса кристаллизации сахарозы при уваривании утфеля I были выбраны два определяющих ее критерия: объем сахарозы, диффундирующей на поверхности кристалла V и период времени кристаллизации τ .

Параметрическая модель объекта управления (уваривание утфеля I кристаллизации) приведена на рис. 1.

В качестве параметров модели были приняты:

\bar{X} – вектор входных параметров модели:

\bar{X} ($\text{Ч}_{\text{сир}}$, $\text{СВ}_{\text{сир}}$, $\text{СХ}_{\text{сир}}$, $\text{Ч}_{\text{кл II}}$, $\text{СВ}_{\text{кл II}}$, $\text{СХ}_{\text{кл II}}$, $\text{Ч}_{\text{кл III}}$, $\text{СВ}_{\text{кл III}}$, $\text{СХ}_{\text{кл III}}$)

где $\text{Ч}_{\text{сир}}$, $\text{Ч}_{\text{кл II}}$, $\text{Ч}_{\text{кл III}}$ – чистота соответственно сиропа, клеровки сахара II и клеровки сахара III;

$\text{СВ}_{\text{сир}}$, $\text{СВ}_{\text{кл II}}$, $\text{СВ}_{\text{кл III}}$, – содержание сухих веществ соответственно в сиропе, в клеровке сахара II и в клеровке сахара III и ;

$\text{СХ}_{\text{сир}}$, $\text{СХ}_{\text{кл II}}$, $\text{СХ}_{\text{кл III}}$ – содержание сахарозы соответственно в сиропе, в клеровке сахара II и в клеровке сахара III;

\bar{Y} – вектор выходных параметров модели:

\bar{Y} ($\text{Ч}_{\text{сах}}$, $\text{СВ}_{\text{сах}}$, $\text{СХ}_{\text{сах}}$, $\text{Ч}_{\text{от I}}$, $\text{СВ}_{\text{от I}}$, $\text{СХ}_{\text{от I}}$, $\text{Ч}_{\text{от II}}$, $\text{СВ}_{\text{от II}}$, $\text{СХ}_{\text{от II}}$)

где $\text{Ч}_{\text{сах}}$, $\text{Ч}_{\text{от I}}$, $\text{Ч}_{\text{от II}}$ – чистота соответственно сахара-песка, первого оттока и второго оттока;

$\text{СВ}_{\text{сах}}$, $\text{СВ}_{\text{от II}}$, $\text{СВ}_{\text{от I}}$ – содержание сухих веществ соответственно в сахара-песке, в первом оттоке и во втором оттоке;

$\text{СХ}_{\text{сах}}$, $\text{СХ}_{\text{от I}}$, $\text{СХ}_{\text{от II}}$ – содержание сахарозы соответственно в сахара-песке, первом оттоке и во втором оттоке;

\bar{U} – вектор управляющих параметров модели:

\bar{U} (D , c_n , c_n , W , J , V , λ , k , t)

где c_n – концентрация насыщенного раствора сахарозы;

c_n – концентрация пересыщенного раствора сахарозы;

D – коэффициент диффузии;

t – время;

k – степень пересыщения раствора по сахарозе;

λ – коэффициент, характеризующий среднее расстояние между частицами сахарозы;

J – объемное количество сахарозы, подводимой к единице поверхности кристалла в единицу времени; $J = 3c_n(k-1)\exp(-3F_0)$;

где $F_0 = Dt/h^2$ – число Фурье;

V – объем сахарозы, диффундирующей на поверхности кристалла за фиксированный период времени t ;

$V = c_n \cdot (k-1)h \cdot s[1 - \exp(-3 F_0)]$,

W – удельный объем сахарозы, перешедший из раствора в кристаллическое состояние, $W = 6c_n(k-1)\lambda[1 - \exp(-3F_0)]/(1 + \lambda)$, где $\lambda = h/d$;

h – расстояние между кристаллами.

\bar{U} (D , c_n , c_n , W , J , V , λ , k , t)

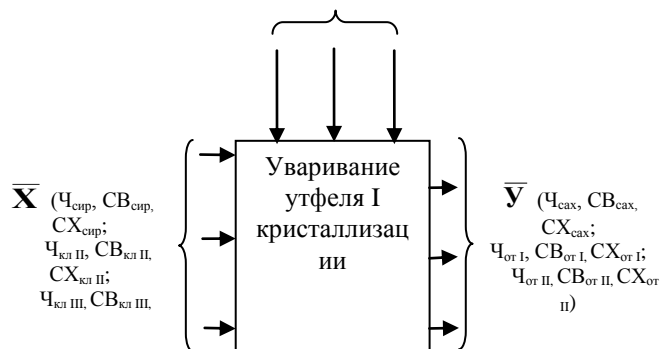


Рис. 1. Параметрическая модель объекта управления – процесс уваривания утфеля I кристаллизации

III. АНАЛИЗ ТП УВАРИВАНИЯ УТФЕЛЯ, КАК ОБЪЕКТА ОПТИМИЗАЦИИ

Используя один из методов перехода от множества критериев к одному обобщенному, был получен обобщенный критерий, зависящий от основных параметров процесса, и оценена их значимость.

Прежде чем сформулировать и решать задачу многопараметрической оптимизации, необходимо было провести исследования, которые позволили бы сделать вывод о наличии оптимума. Для этого были построены частные графики, отражающие зависимость выходной величины от двух входных при фиксированном значении остальных. Пример такого графика приведен на рис. 2.

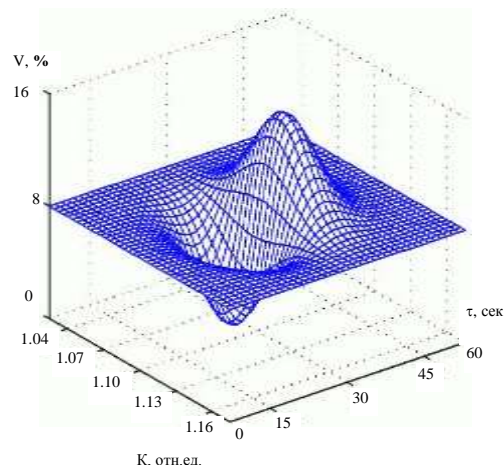


Рис. 2. Зависимость объема сахарозы, выкристаллизовавшейся на поверхности кристалла (V , %) от периода времени кристаллизации (τ , сек.) и степени пересыщения (K , отн. ед.) при фиксированных значениях остальных факторов.

Из анализа графиков, видно, что если в качестве управляющих параметров процесса выбрать период времени кристаллизации (τ , сек.) и концентрацию сахарозы (c_n , %), то максимальный объем сахарозы, выкристаллизовавшейся на поверхности кристалла (V , %) составит $V=12\%$ ($\tau=47$ с, $c_n=87\%$). [3] При выборе в качестве управляющих параметров процесса время

кристаллизации (τ , сек.) и степень пересыщения (K , отн.ед.), то максимальный объёма сахарозы, выкристаллизовавшейся на поверхности кристалла (V , %) составит $V=11\%$ ($\tau=35$ с, $K=1,1$). В том случае, когда в качестве управляющих параметров процесса будут степень пересыщения (K , отн.ед.) и концентрация сахарозы в растворе ($с_n$, %), то максимальный объёма сахарозы, выкристаллизовавшейся на поверхности кристалла (V , %) составит $V=14\%$ ($с_n=88\%$, $K=1,11$).

Как видно из вышеприведенного анализа, даже при выборе «n»-мерного пространства управляющих параметров $n=3$, при их различной вариации, были получены различные значения экстремумов (графическому представлению поддается только трехмерное пространство). В нашем случае пространство управляющих параметров (D , $с_n$, $с_h$, T , λ , h , k) $n=7$, и следовательно, для получения оптимальных значений вышеуказанных параметров, обеспечивающих эффективность процесса кристаллизации утфеля I, необходимо было решить многопараметрическую задачу оптимизации.

IV. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ТП УВАРИВАНИЯ УТФЕЛЯ

В качестве целевой функции для решения задачи оптимизации был принят обобщенный критерий, имеющий вид:

$$L = \frac{V}{t} \rightarrow \max_{\bar{x} \in Z}; \quad (5)$$

где \bar{x} – вектор управляющих переменных процесса;

$$\bar{x} \in \{c_n, c_h, k, t, D, \lambda, J, W, V, t\};$$

$$V = с_n \cdot (k-1) \cdot h \cdot s [1 - \exp(-3 F_0)];$$

$$t = F_0 \cdot h^2 / D.$$

Целевая функция (5) может быть выражена через основные параметры исследуемого процесса:

$$L = \frac{c_n (k-1) \cdot S \cdot (1 - e^{-3 F_0}) \cdot D}{h \cdot F_0} \rightarrow \max_{\bar{x} \in Z}. \quad (6)$$

$$Z \in \begin{cases} 84\% \leq c_n \leq 90\% \\ 73\% \leq c_h \leq 84\% \\ 1,06 \leq k \leq 1,15 \\ 10^{-4} \text{ м} \leq h \leq 3 \cdot 10^{-4} \text{ м} \\ 72^0 \text{ C} \leq T \leq 78^0 \text{ C} \\ 1,0 \cdot 10^{-4} \leq D \leq 4,5 \cdot 10^{-4} \\ 0,4 \leq \lambda = f(h, D) \leq 3 \\ 0,001\% \leq J = f(c_n, c_h, D, F_0(D, t, h), T, h) \leq 46,67\% \\ 7,86\% \leq W = f(c_n, \lambda(h, D), F_0, h, S) \leq 46,65\% \end{cases}, \quad (7)$$

где Z – область ограничений, содержащая в преобразованном виде условия поиска экстремума целевой функции.

Критерий оптимальности L : – максимум объема сахарозы, выкристаллизовавшейся на поверхности кристалла (V) при минимуме времени кристаллизации (t).

Таким образом, поставленная задача оптимизации процесса кристаллизации сахарозы требует нахождения значения параметров оптимизации

$\bar{x} \in \{c_n, c_h, k, t, D, \lambda, J, W\}$, при которых обобщенный критерий L достигает максимума с учетом ограничений, наложенных на область Z .

В данном случае математическая постановка задачи оптимизации попадает под класс задач нелинейного программирования и может быть решена одним из методов для решения задач данного класса, в частности методом неопределённых множителей Лагранжа [6].

Для решения этой задачи был использован пакет статистики и оптимизации (EUREKA).

В результате были получены значения исследуемых технологических параметров процесса кристаллизации сахарозы, при которых выбранный критерий достигает оптимума.

При изменении исходной технологической ситуации результаты решения задачи должны быть пересчитаны.

Общее количество сахара-песка, получаемого из одного аппарата по предлагаемой технологии, увеличивалось на 1–2 т по сравнению с известным способом.

V. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Создана автоматизированная система научных исследований, представляющая собой алгоритмическую базу для комплексного исследования процесса уваривания утфеля. Эта система была использована для математического моделирования процесса, его последующей оптимизации и проведения экспериментов на ЭВМ.

1. Анализ литературных данных показал, что при изменении условий протекания ТП уваривания утфеля общие потери сахарозы возрастают. Поэтому, необходимо создать условия, которые приведут к снижению потерь сахарозы. Исследования показали, что при неизменной схеме переработки, не всегда будет достигаться максимально возможный результат.
2. В процессе работы установлено, что существует такая область допустимых значений основных технологических параметров процесса уваривания утфеля, при которых возможен выбор оптимальной производительности с точки зрения снижения потерь сахара.
3. Как показали исследования, изменяя значения основных технологических параметров процесса уваривания утфеля в данной системе, можно повлиять на эффективность исследуемого процесса. Следовательно, используя поставленную

задачу оптимизации применительно к данной технологической системе, мы получаем оптимальные решения.

Таким образом, можно рекомендовать промышленности перерассчитывать задачу оптимизации при изменении исходной технологической ситуации для повышения эффективности процесса уваривания утфеля.

Так, как уровень развития современной вычислительной техники позволяет нам проводить подобные расчеты в течение нескольких минут, то можно рекомендовать технологам-операторам использовать данную систему для эффективного управления технологическим процессом в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Славянский А.А., Гольденберг С.П., Мохова Т.Б. Оптимизация процесса уваривания утфеля I кристаллизации.

Сб. «Совершенствование технологий переработки сырья для сахарной промышленности, освоение новых видов оборудования и компьютеризации производства, повышение качества» (Сахар 2008. Ч.2). М.: Издательский комплекс МГУПП, 2008. С.14...22.

- [2] Совершенствование технологии уваривания утфеля I кристаллизации /А.А. Славянский, Т.Б. Мохова, Р.В. Лукашевич, С.П. Гольденберг// Хранение и переработка сельхозсырья. 2008. № 3. С.18-22.
- [3] Brown D.J., K.A. and F.Boysan. Crystal growth measurement and modeling of fluid flow in a crystallizer. //Zuckerindustrie. 2015. Bd.117. №1. S.35...39.
- [4] Белостоцкий Л.Г. Интенсификация технологических процессов свеклосахарного производства. М.: Агропромиздат, 1989. 135с.
- [5] Соколов В.А. Автоматизация технологических процессов пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1991
- [6] Saska M. Modelling crystallization and inclusion formation in sucrose crystals. // Zuckerindustrie. 2011. V. 113. № 3. S. 224...229.