

Имитационное моделирование: экспертная оценка и оптимизация работы продуктового отделения сахарного завода

В.Г.МИРОНЧУК, О.А.ЕЩЕНКО
Национальный университет пищевых технологий, Киев

Разнообразие схем многоступенчатой кристаллизации, существующих в сахарном производстве, требует определения универсального метода для их сравнительной оценки и оптимизации с целью уменьшения удельных затрат энергии, увеличения выхода товарного сахара и улучшения его качества. Одно из новейших направлений в решении этой проблемы – использование компьютерных технологий при имитационном моделировании и аналитических методах оптимизации.

Применение математического аппарата, принципов кибернетики для развития моделирования сложных систем и алгоритмизации промышленных процессов, а также компьютерных технологий дают возможность не только совершенствовать, но и разрабатывать новые способы для промышленной кристаллизации сахарозы.

В условиях свеклосахарного производ-

ства каждую ступень кристаллизации рассматривали как отдельный объект технологического процесса (рис. 1), в котором часть выходов предыдущего объекта является входами следующего [1]. Учитывая, что процесс промышленной кристаллизации сахарозы осуществляется с возвращением части продуктов, его рассматривали как рециркуляционный с повторной переработкой непрореагировавшего сырья. Рециркуляты определяют обратные связи в объекте. Следовательно, именно изменение связей (направлений продуктовых потоков), а также добавление или изъятие простых объектов, позволяют моделировать все существующие схемы работы продуктового отделений.

Кроме изменения связей в объекте во время моделирования изменялись управляющие параметры. К ним относятся температура центрифугирования утфелей, количество воды на пробеливание сахара, коэффициенты насыщения и пересыщения раствора, растворимость сахарозы и др.

Нами была поставлена задача разработки модели, которая бы предоставляла возможность проследить влияние рециркулятов на характеристики продуктов в системе от состояния вхождения их в установившийся режим до изменения направлений потоков, соотношений продуктовых потоков и возмущающих факторов в установившемся режиме работы продуктового отделения [5]. Для этого был построен поточно-ориентированный граф [3] обобщенной аппаратурно-технологической схемы продуктового отделения сахарного завода (рис. 2):

$$L = (N, U, P), (1)$$

где $N \neq \emptyset$ – множество вершин (оборудование);

$U \neq \emptyset$ – множество ориентированных ребер-дуг (потоков продуктов);

$P(x_i, u_{ij}, x_j)$ – предикаты (трубопроводы).

Процесс, протекающий в каждом аппарате, рассматривали с точки зрения смешивания и разделения продуктовых потоков. Каждый простой объект имеет входные X и выходные Y (см. рис. 2) продуктовые потоки и может быть представлен как функционал $Y = F(X)$.

Функционалы простых объектов определены для всех троек элементов x_i, u_{ij}, x_j , для которых $x_i, x_j \in N$ и $u_{ij} \in U$ и $P(x_i, u_{ij}, x_j) \neq P(x_j, u_{ij}, x_i)$ (свойство ориентированности графа). Таким образом, $u_{ij} \neq u_{ji}$. Множество дуг U представлено в виде матрицы смежности

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{in} & u_{in} & \dots & u_{nn} \end{pmatrix}, (2)$$

где $0 \leq u_{ij} \leq 1$ для всех $i, j = \overline{1, n}$.

Если продуктовый поток, который выходит с i -го объекта, разделяется на два или более в процентном соотношении, то

$$\sum_{j=1}^k u_{ij} = 1.$$

Очевидно, что вследствие того, что граф $L = (N, U, P)$ не имеет петель, $u_{ii} = 0$ для всех $i = \overline{1, n}$.

Каждой дуге $u_{ij} \in U$ поставлен в соответствие весовой массив $c(u_{ij})$, который определяет количественные и качественные характеристики продуктов:

$$c(u_{ij}) = (m, m_c, m_{nc}, m_{cv}, m_w, CX, HC, CB, \zeta), (3)$$

где количественные характеристики:

m – общая масса продукта, кг;

m_c – содержимое сахара в продукте, кг;

m_{nc} – содержимое нес сахаров в продукте, кг;

m_{cv} – содержимое сухих веществ в продукте, кг;

m_w – содержимое воды в продукте, кг;

качественные характеристики:

CX – содержимое сахара в продукте, %;

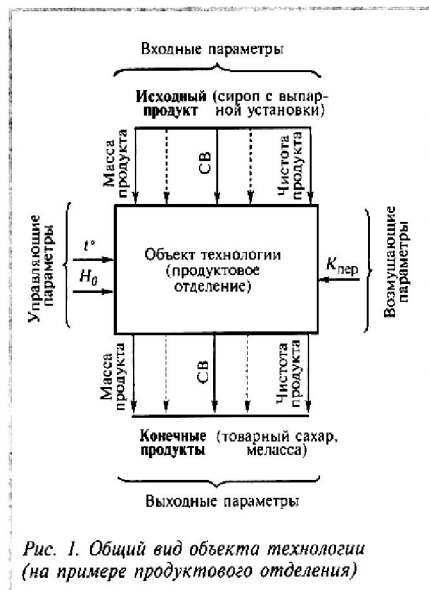


Рис. 1. Общий вид объекта технологии (на примере продуктового отделения)

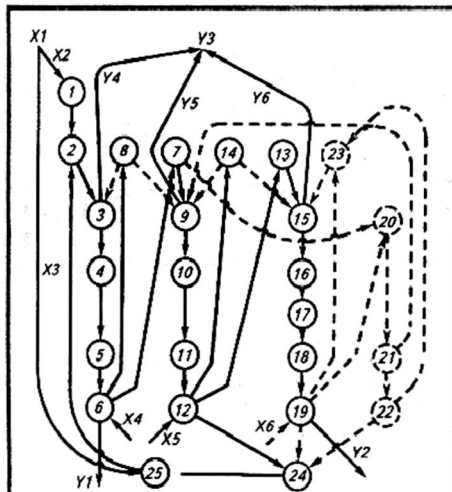


Рис. 2. Поточно-ориентированный взвешенный граф обобщенной аппаратурно-технологической схемы: 1 – выпарная установка; 2, 8, 7, 13, 14, 23 – сборники; 3, 5, 15 – вакуум-аппараты; 4, 10, 16 – утфелемешалки; 17 – кристаллизаторы; 5, 11, 18, 21 – утфелераспределители; 6, 12, 19, 22 – центрифуги; 20 – аффинатор; 24 – конвейер; 25 – клеровочный аппарат (пунктирной линией обозначены вершины и дуги графа, которые могут исключаться)

НС – содержимое несахаров в продукте, %;

СВ – содержимое сухих веществ в продукте, %;

Ч – чистота продукта, %.

Если $m = 0$, то и все другие характеристики продукта приравнивают нулю, т. е. $C(u_{ij}) = 0$.

Если $u_{ij} = u_{ji} = 0$ для всех $j = 1, l$, то вершина x становится недосягаемой и соответствующее ей оборудование исключается из аппаратурно-технологической схемы.

Таким образом, при выбранной нами последовательной нумерации вершин ненулевые элементы, обозначающие последовательные связи, размещаются над главной диагональю, а обратные – под ней. Учитывая вышесказанное относительно матрицы смежности графа $L = (N, U; P)$, можно сделать вывод, что она однозначно определяет каждую конкретную схему продуктового отделения.

Для определения весовых массивов (характеристик продуктов) введены необходимые операции и функции, т. е. алгебра продуктов.

Используя определенные зависимости, нами составлены математические модели для каждого объекта технологии аппаратурно-технологической схемы продуктового отделения.

Материальный баланс i -го объекта схемы представлен в виде

$$\sum_{j=1}^q c(u_{ji}) = \sum_{k=1}^p c(u_{ik}), \quad (4)$$

где $c(u_{ij})$, $c(u_{ik})$ – весовые массивы соответственно входных и выходных потоков i -го объекта;

q – количество потоков, которое поступает на i -й объект (входы); p – количество потоков, которые выходят с i -го объекта (выходы); суммы продуктов находятся по соответствующим формулам.

Для отображения динамики процесса понятия «оборот расчета» и «цикл расчета» выделены отдельно.

Предлагаемый подход позволил создать такую последовательность расчета, которая имитирует обратные связи в технологической схеме многоступенчатой кристаллизации сахара с учетом возврата продуктов в рецикл на каждом обороте, что четко соответствует ходу реального промышленного процесса. Следовательно, обратные связи определяются рециркуляцией продуктов в промышленных схемах кристаллизации сахарозы [6, 7].

Описанная модель позволила разработать компьютерную программу для проведения имитационных вычислительных экспериментов [9].

С помощью программы [9] проанализировано влияние обратных связей на характеристики полученного сахара и промежуточных продуктов.

Рассматривая клеровку как одну из обратных связей, можно видеть, что она по-разному влияет на качество товарного сахара при различной чистоте сиропа-нетто. При условии, когда удельная чистота сиропа $Ч_y = Ч_{cr}/Ч_c$ (отношение стандарт-сиропа к сиропу) больше, чем 1 ($Ч_y > 1$), обратная связь имеет положительное влияние, при условиях $Ч_y < 1$ – отрицательное.

На результаты работы продуктового отделения влияют способы обработки продуктов последней кристаллизации. Обратные связи, связанные с аффинацией сахара последнего продукта, промежуточным центрифугированием, использованием в качестве кристаллической основы аффинационного утфеля, значительно влияют на количество товарного сахара (рис. 3), уменьшают удельное

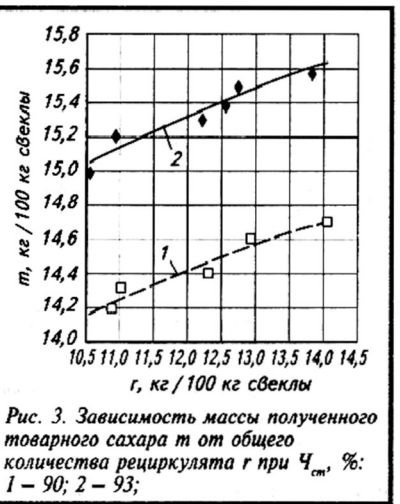


Рис. 3. Зависимость массы полученного товарного сахара m от общего количества рецикулата r при $Ч_{cm}$, %: 1 – 90; 2 – 93;

количество выпаренной воды (рис. 4), а также количество и чистоту мелассы (рис. 5) [5, 7–9].

Разработанный поточно-ориентированный граф имитационной модели схемы последней степени кристаллизации с промежуточным центрифугированием (рис. 6) позволил рекомендовать три варианта уваривания и кристаллизации по ней, в частности оттек промежуточного центрифугирования направляется в кристаллизаторы, вакуум-аппарат на следующем обороте и на этом же обороте для доваривания. Данные исследований свидетельствуют о том, что наибольший эффект достигается при работе схемы по последнему варианту.

В процессе исследований получена математическая модель для определе-

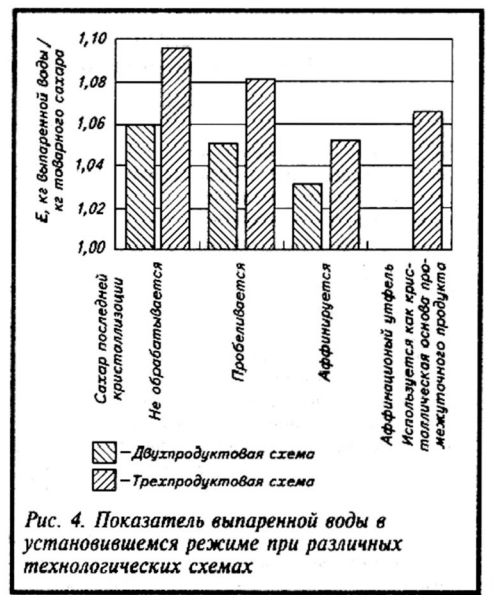


Рис. 4. Показатель выпаренной воды в установившемся режиме при различных технологических схемах

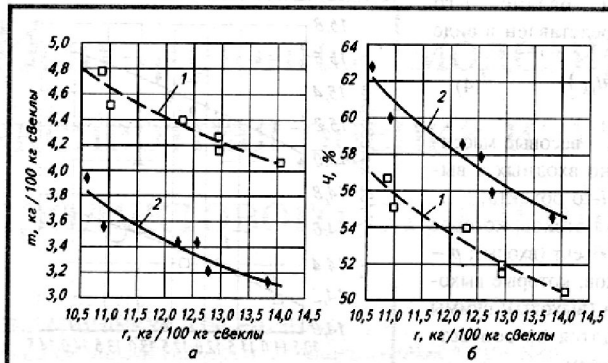


Рис. 5. Зависимость массы (а) и чистоты (б) мелассы от общего количества рециркулята g при чистоте сиропа-нетто $Ч_{\text{н}}$, %: 1 – 90; 2 – 93

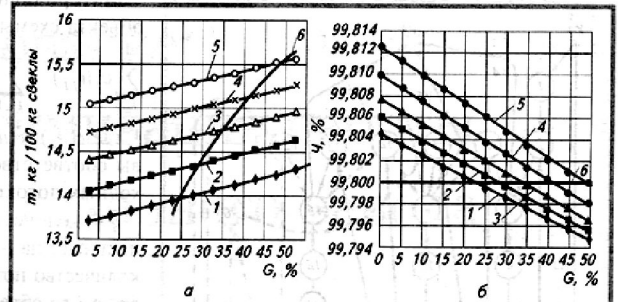


Рис. 7. Зависимость массы (а) и чистоты (б) товарного сахара от количества готового утфеля, который направляется на промежуточное центрифугирование при чистоте сиропа-нетто $Ч_{\text{н}}$, %: 1 – 89; 2 – 90; 3 – 91; 4 – 92; 5 – 93; 6 – граница стандартного качества сахара

ния оптимального количества рециркулирующего промежуточного оттека при частичном центрифугировании утфеля последнего продукта:

$$f(x) = ae^{-(x-b)^2/c} \quad (5)$$

где $f(x)$ – часть уваренного утфеля последнего продукта, направляемого на центрифугирование;

a, b, c – коэффициенты.

Результаты расчетов (5) и эксперимента подтвердили адекватность математической модели реальному промышленному процессу (рис. 7).

Таким образом, базируясь на анализе существующих аппаратно-технологических схем продуктового отделения сахарных заводов, теории графов и теории смешивания компонентов, разработана имитационная модель промышленной многоступенчатой кристаллизации сахарозы с применением математического уровня абстрагирования. Используя теорию управления, установлены положительные обратные связи (рециркуляционные по-

токи) в системе промышленной кристаллизации сахарозы.

Показано, что для того чтобы рециркуляционный поток имел положительное влияние, необходимо, чтобы удельная чистота сиропа $Ч_y = Ч_{\text{ст}}/Ч_e$ (отношение чистоты стандарт-сиропа к чистоте сиропа) была больше 1, т. е. $Ч_y > 1$, так как $Ч_y < 1$ не имеет положительного влияния.

На основе разработанного нами поточно-ориентированного графа имитационной модели многоступенчатой кристаллизации сахарозы разработан способ кристаллизации утфеля последнего продукта с направлением оптимального количества рециркулята (обратная связь), полученного от частичного центрифугирования оптимального количества сваренного в вакуум-аппарате утфеля, в этот же вакуум-аппарат на доваривание на этом же обороте.

Описанная модель многоступенчатой промышленной кристаллизации сахарозы позволяет определить наиболее эффективную аппаратно-технологическую схему продуктового

отделения. – Киев: Высшая школа, 1973. – 280 с.

2. Єщенко О.А., Мирончук В.Г. Підвищення ефективності роботи продуктивних відділень цукрових заводів//Харчова промисловість. 2001. № 1 – Вип. 46. С. 72–74.

3. Зыков А. А. Теория конечных графов. – Т.1. – Новосибирск, 1969. – 542 с.

4. Forecasting of performance parameters of sugar house in the sugar factory/Mironchuk V.G., Guliy I.S., Shtangeeva N.I., Eschenko O.A.//Procadings of the 21th General Assembly CITS. –Berlin: Bartens//Zuckerindustrie. 1999. P. 427–432.

5. Мирончук В.Г., Гулий И.С., Плотниц О.В. Системы кристаллизации сахара с рециркуляцией//Сборник докладов международного семинара «Повышение эффективности свеклосахарного производства и проблемы экологии отходов». – Київ: ВІПОЛ, 1994. С. 55–58.

6. Мирончук В.Г., Єщенко О.А., Гулий И.С. Універсальна модель багатоступеневої кристалізації цукру//Наукові праці УДУХТ. – Київ, 1998. № 4. – Ч. 1. С. 64–65.

7. Мирончук В.Г. Рециркуляція як спосіб зменшення енерговитрат в схемах багатоступеневої промислової кристалізації цукру//Наукові праці УДУХТ. – Київ, 1999. № 5. С. 105–107.

8. Мирончук В.Г., Єщенко О.А. Прогнозування показників роботи продуктового відділення цукрового заводу//Харчова промисловість. 2000. – Вип. 45. С. 26–30.

9. Свидетельство о регистрации прав автора на ПА №4790, 2.10.2001. Компьютерная программа «Расчет, анализ и прогнозирование технологических показателей продуктового отделения сахарного завода» (Crystall) / О.А. Єщенко, В.Г. Мирончук, И.С. Гулий.

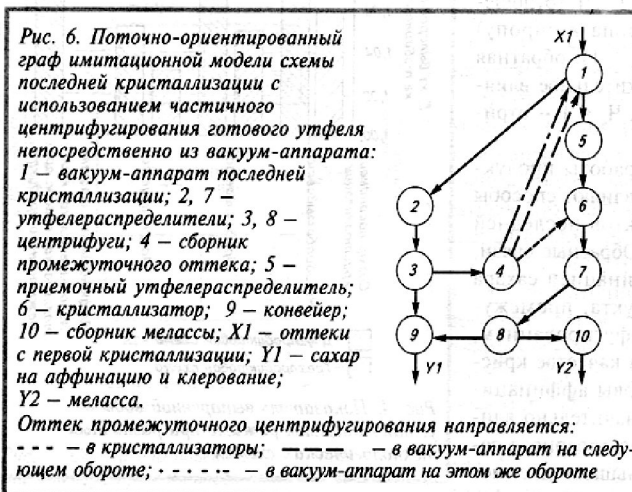


Рис. 6. Поточно-ориентированный граф имитационной модели последней кристаллизации с использованием частичного центрифугирования готового утфеля непосредственно из вакуум-аппарата: 1 – вакуум-аппарат последней кристаллизации; 2, 7 – утфелераспределители; 3, 8 – центрифуги; 4 – сборник промежуточного оттека; 5 – приемный утфелераспределитель; 6 – кристаллизатор; 9 – конвейер; 10 – сборник мелассы; X1 – оттеки с первой кристаллизации; Y1 – сахар на аффинацию и клерование; Y2 – меласса.

Оттек промежуточного центрифугирования направляется: - - - - в кристаллизаторы; - - - - в вакуум-аппарат на следующем обороте; · · · · · в вакуум-аппарат на этом же обороте

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарь А.Г. Математическое моделирование в химической техно-