

Теплотехнологические аспекты работы кристаллизационного отделения сахарного завода

С.М. ВАСИЛЕНКО, Национальный университет пищевых технологий, ООО «Фирма ТМА»
В.Н. КУХАР, А.П. ЧЕРНЯВСКИЙ (e-mail: ap_ch@ukr.net)
 ООО «Фирма ТМА»

Введение

В контексте нестабильности мирового и внутренних рынков сахара и энергетических ресурсов повышение энергоэффективности производства становится важным (если не первоочередным) условием эффективной работы предприятий свеклосахарной отрасли.

Кристаллизационное отделение является крупнейшим потребителем пара на сахарном заводе. Соответственно именно оно, в том числе вследствие ряда эксплуатационных, прежде всего технологических, особенностей, определяет значение текущего расхода пара (топливно-энергетических ресурсов) на нужды теплотехнологического комплекса сахарного завода и его изменение в процессе эксплуатации [1, 2]. Поэтому к качеству управления этим отделением предъявляются повышенные требования. Система оперативного прогнозирования паропотребления как важнейший элемент оптимальной стратегии управления – неотъемлемая составляющая повышения эффективности работы отделения и завода в целом. Понятие «оптимальная стратегия» предполагает решение комплексной оптимизационной задачи, которая коротко может быть сформулирована следующим образом: получение максимально высокого качества при минимально возможном расходе топливно-энергетических ресурсов.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод о необходимости наличия у сотрудников заводов инструментария для оперативной оценки вероятных последствий, вызванных изменениями теплотехнологического режима кристаллизационного отделения. Поскольку это отделение непрерывно интегрировано в теплотехнологический комплекс завода, следует учитывать сложный, неоднозначный характер влияния отдельных факторов на конечные показатели расхода пара.

Рассмотрим некоторые из этих факторов, а также механизмы приближённой оценки их воздействия на эффективность энергопотребления сахарного завода.

Метод исследования

Для определения влияния отдельных факторов в кристаллизационном отделении на расход пара

в выпарную установку используется метод анализа тепловых балансов выпарной установки и кристаллизационного отделения.

Результаты исследования

1. Теплотехнические факторы

К теплотехническим факторам относится, в первую очередь, изменение количества воды, которое необходимо выпарить в ВУ и в кристаллизационном отделении [3].

В основу анализа положены уравнения теплового баланса выпарной установки и теплотехнологического комплекса в целом (согласно гипотезе А. Классена, килограмм греющего пара выпаривает килограмм воды, поэтому тепловые балансы сахарного завода традиционно записываются в виде паровых балансов): количество воды, выпаренное в n -ступенчатой (n -корпусной) выпарной установке (ВУ) (здесь и далее под понятием «корпус» традиционно подразумевается ступень испарения выпарной установки)

$$W_{\text{ВУ}} = E_1 + 2E_2 + \dots + nE_n + \sum_1^3 k_i W_{\text{BA}i} + nD_k. \quad (1)$$

В то же время согласно водному балансу

$$W_{\text{ВУ}} = S_{\text{ВУ}}(1 - \text{CB}_{\text{ВУ}}/\text{CB}_{\text{сир}}), \quad (2)$$

где E_1, \dots, E_n – расход вторичного пара 1-го, ..., n -го корпусов n -корпусной выпарной установки потребителям пара (так называемые пароотборы); W_{BA} – расход пара на вакуум-аппараты; D_k – расход пара на конденсатор; k_i – номер корпуса, вторичный пар которого подаётся на обогрев вакуум-аппаратов i -го продукта; $S_{\text{ВУ}}$, $\text{CB}_{\text{ВУ}}$ – расход сока в выпарную установку и содержание сухих веществ в нём, $\text{CB}_{\text{сир}}$ – содержание сухих веществ в сиропе после выпарной установки.

Количество воды, выпаренное совместно в ВУ и вакуум-аппаратах 1-го продукта:

$$W_{\text{ВУ,BA1}} = E_1 + 2E_2 + \dots + nE_n + (k_1 + 1)W_{\text{BA1}} + \sum_2^3 k_i W_{\text{BA}i} + nd_k. \quad (3)$$

В то же время согласно водному балансу

$$W_{\text{ВУ,ВА1}} = S_{\text{cc}}(1 - \text{CB}_{\text{cc}}/\text{CB}_{\text{уф1}}) + \Delta W_1, \quad (4)$$

где S_{cc} , CB_{cc} – расход сульфитированного сока на выпарную установку, клерование, соковые подкачки в вакуум-аппараты 1-го продукта и содержание сухих веществ в нём; $\text{CB}_{\text{уф1}}$ – содержание сухих веществ в утфеле 1-го продукта; ΔW_1 – дополнительный расход воды в вакуум-аппараты 1-го продукта (с клеровкой или водными подкачками).

Расход пара в выпарную установку составит

$$D_{\text{ВУ}} = E_1 + 2E_2 + \dots + nE_n + nd_k. \quad (5)$$

Очевидно, данные уравнения являются стационарными (статическими), поэтому с достаточной точностью описывают влияние лишь тех факторов, изменения которых носят долговременный постоянный (так называемый квазистационарный) характер. Это значит, что для достоверности анализа изменение определённого параметра (вносимого возмущения), например расхода диффузионного сока (откачки), дигестии свёклы и т. п., должно иметь постоянное значение и длиться на протяжении времени, значительно большего времени пребывания сахара на верстае завода.

Если же изменение параметров (вносимое в систему возмущение) имеет кратковременный характер, необходимо учитывать особенности переходных процессов.

1.1. Повышение содержания сухих веществ в продуктах, поступающих на уваривание в вакуум-аппараты 1-й кристаллизации

Значение СВ увариваемых продуктов значительно влияет на расход пара в ВУ.

Пример. Для $S_{\text{ВУ}} = 115\%$ к м. св. с $\text{CB}_{\text{ВУ}} = 15\%$ увеличение СВ_{сир} с 67 до 70 % приводит к уменьшению расхода пара на $\approx 1,1\%$ к м. св. ($\approx 1 \text{ м}^3/\text{т св.}$).

Оптимальный метод получения высоких СВ_{сир} – перераспределение пароотборов ВУ (балансирование ВУ). Выпарная установка, которая обеспечивает требуемое СВ_{сир} без выхода пара на конденсатор, называется сбалансированной.

Однако в процессе эксплуатации достаточно сложно провести перераспределение пароотборов, поэтому применяются два проверенных метода.

1.1.1. Уменьшение количества воды, поступающей в ВУ (за счёт уменьшения расхода сока из диффузионной установки (откачки)). Из предыдущей системы уравнений очевидно следует достаточно сложное влияние различных факторов на содержание сухих веществ в продуктах, поступающих на уваривание в аппараты 1-й кристаллизации, в первую очередь в сиропе после выпарной установки.

Из уравнений (3), (4) следует, что уменьшение количества воды, выпариваемой в ВУ и кристаллизационном отделении, на величину $\Delta W_{\text{ВУ,ВА1}}$ приводит к уменьшению расхода пара на вакуум-аппараты 1-й кристаллизации и, соответственно, в ВУ на величину

$$\Delta D_{\text{ВУ}} = \Delta W_{\text{ВА1}} = \Delta W_{\text{ВУ,ВА1}}/(k_1 + 1). \quad (6)$$

Пример. Уменьшение расхода сока в ВУ с $S_{\text{ВУ}} = 115\%$ к м. св. ($\text{CB}_{\text{ВУ}} = 15\%$) до $S_{\text{ВУ}} = 107\%$ к м. св. ($\text{CB}_{\text{ВУ}} = 16,1\%$) приводит к уменьшению количества выпариваемой воды на $\Delta W_{\text{ВУ,ВА1}} = 8\%$ к м. св. При обогреве вакуум-аппаратов 1-й кристаллизации вторичным паром 3-го корпуса ВУ уменьшение расхода пара в ВУ составит $\approx 2\%$ к м. св. ($\approx 1,85 \text{ м}^3 \text{ газа}/\text{т св.}$). Если исходное СВ_{сир} = 65 %, то после снижения расхода сока получим СВ_{сир} = 70 %. (Предполагается, что снижение расхода сока в ВУ получено вследствие пропорционального снижения откачки.)

Следует отметить, что снижение откачки не должно приводить к увеличению СВ_{сир} выше предельной величины, задаваемой технологическими ограничениями. В этом случае необходимо проводить сопутствующее балансирование ВУ.

1.1.2. Увеличение расхода вторичного пара последнего корпуса в конденсатор.

Этот приём регулирования СВ_{сир} использовался задолго до появления систем автоматизации ВУ. В своё время именно для этого способа предназначался специальный корпус ВУ, называемый концентратором.

Согласно уравнениям (1), (2) при расходе вторичного пара последнего корпуса в конденсатор в количестве d_k расход пара на аппараты 1-й кристаллизации уменьшится на

$$\Delta W_{\text{ВА1}} = nd_k/(k_1 + 1). \quad (7)$$

При этом уменьшение расхода пара в ВУ составит

$$\Delta D_{\text{ВУ}} = \Delta W_{\text{ВА1}} - d_k = d_k(n - (k_1 + 1))/(k_1 + 1). \quad (8)$$

Пример. В 5-корпусной ВУ происходит ступенчатое сокращение с $S_{\text{ВУ}} = 115\%$ к м. св. ($\text{CB}_{\text{ВУ}} = 15\%$) до СВ_{сир} = 65 %. Для того чтобы повысить СВ_{сир} до 70 %, согласно уравнению (2) необходимо дополнительно выпарить воду в количестве 1,85 % к м. св. Для этого согласно уравнению (1) необходимо увеличить расход вторичного пара 5-го корпуса в конденсатор на $1,85 = 0,37\%$ к м. св. Уменьшение расхода пара в ВУ составит $\approx 0,1\%$ к м. св. ($\approx 0,1 \text{ м}^3 \text{ газа}/\text{т св.}$).

1.2. Влияние использования избыточной воды в кристаллизационном отделении.

Вода поступает в кристаллизационное отделение в составе сиропа, клеровки и с водой от пробеливания сахара в центрифугах (количество воды на про-

беливание сахара в центрифугах достигает 3 % к массе утфеля, и её практически не удастся устранить, лишь минимизировать количество. Например, на заводе Никебинг (Дания) для клерования возвращаемых сахаров и промывки в центрифугах используется только вода во избежание риска микробиологического инфицирования очищенным соком).

Избыточная вода появляется в кристаллизационном отделении при нарушении технологического режима фуговочного, клеровального отделений и при использовании так называемых подкачек (как водных, так и соковых) в вакуум-аппараты. Вода в вакуум-аппаратах, в отличие от ВУ, испаряется в одну ступень, следовательно, на испарение 1 т воды расходуется 1 т пара из ВУ. При увеличении расхода воды в кристаллизационное отделение соответственно увеличивается расход пара из ВУ. Рассмотрим возможные случаи реагирования ВУ на увеличение расхода воды в кристаллизационное отделение.

1.2.1. Осуществляется автоматическое управление ВУ с системой поддержания постоянного СВ_{сир}.

Увеличение потребления пара вакуум-аппаратами увеличивает нагрузку ВУ и, соответственно уравнениям (1), (2), повышение СВ_{сир}. Система автоматического управления должна соответственно смещать паротборы, чтобы компенсировать повышение СВ_{сир}. Если бы все эти действия происходили одновременно и система мгновенно перешла из одного устойчивого состояния в другое, то увеличение расхода пара в ВУ составляло бы, согласно уравнениям баланса,

$$\Delta D_{\text{ВУ}} \approx \Delta W_1. \quad (9)$$

1.2.2. Отсутствует система автоматизированного поддержания СВ_{сир}.

В этом случае согласно уравнениям (1)–(4) одновременно с увеличением расхода пара из ВУ в кристаллизационное отделение должно возрасти СВ_{сир}, что частично компенсирует увеличение расхода пара в ВУ. В соответствии с уравнениями (3), (4), если дополнительная вода с клеровкой или с подкачками поступает в вакуум-аппараты 1-й кристаллизации, то увеличение расхода пара в ВУ должно составить

$$\Delta D_{\text{ВУ1}} \approx \Delta W_1 / (k_1 + 1). \quad (10)$$

Если же дополнительная вода поступает в вакуум-аппараты 2-й, 3-й кристаллизаций, то в соответствии с уравнениями (3), (4) увеличение расхода пара в ВУ составит

$$\Delta D_{\text{ВУ2,3}} \approx \Delta W_{2,3} / (1 - k_{2,3} / (k_1 + 1)). \quad (11)$$

Однако уравнения (10), (11) получены в предположении, что увеличение расхода воды имеет постоянное значение и долговременное действие (значитель-

но большее времени пребывания сахара на верстате завода), а также мгновенного перехода ВУ из одного устойчивого состояния в другое устойчивое состояние.

В действительности выпарная установка, вследствие большого объёма сока и длительного времени пребывания сока, является высокоинерционным объектом. Возмущение, вносимое в ВУ увеличением отбора пара в кристаллизационное отделение, имеет периодический характер. Поэтому реакция ВУ на кратковременные периодические возмущения в виде увеличения расхода пара в кристаллизационное отделение подчиняется принципу Ле Шателье-Брауна (закону затухания): если на систему, находящуюся в состоянии равновесия, осуществляется внешнее воздействие, выводящее её из равновесия, то равновесие смещается в том направлении, при котором эффект внешнего воздействия ослабляется. То есть реакция инерционной системы на внешнее кратковременное возмущение всегда будет меньше ожидаемой, соответственно, увеличение расхода пара будет большим рассчитанного по (10), (11) и находится в пределах

$$\Delta W_1 / (k_1 + 1) < \Delta D_{\text{ВУ1}} \leq \Delta W_1, \quad (12)$$

$$\Delta W_{2,3} / (1 - k_{2,3} / (k_1 + 1)) < \Delta D_{\text{ВУ2,3}} \leq \Delta W_{2,3}. \quad (13)$$

Авторы [4] моделировали режимы работы теплотехнологического комплекса сахарного завода с помощью программного комплекса SUGARS™ и утверждают, что увеличение количества выпаренной воды в кристаллизационном отделении на 1,0 т вызывает повышение расхода пара на технологические нужды ≈ 1,0 т (вакуум-аппараты греются вторичным паром 5-го корпуса ВУ).

Для отечественных заводов без систем автоматизированного регулирования СВ_{сир} можно ожидать увеличение расхода пара в количестве $\Delta D_{\text{ВУ}} \approx (0,7...1,0) \Delta W$ (65...95 м³ газа/т избыточной воды).

2. Теплотехнологические факторы

К ним относятся практически все действия, направленные на реализацию технологического режима, поскольку отклонения от расчётного (оптимального) режима ведения технологического процесса приводят к нарушениям водно-парового баланса кристаллизационного отделения и всего теплотехнологического комплекса в целом. Как следствие, используется избыточная вода в кристаллизационном отделении и соответственно увеличивается расхода пара (топлива).

Одним из основных нарушений, приводящих к увеличению расхода воды и соответствующего увеличению расхода пара, является уменьшение выхода сахара из сваренного утфеля. Как правило, на отечественных

заводах основным критерием работы персонала является количество так называемых сваренных аппаратов (хотя, как известно, вакуум-аппараты варят сварщицы на машиностроительных заводах).

Проанализируем этот показатель. На сахарном заводе производительностью 6 тыс. т переработки свёклы в сутки при выходе белого сахара 16 % к м. св. количество полученного сахара составляет 960 т/сутки. Если на заводе на 1-й кристаллизации установлены 60-тонные вакуум-аппараты, то при выходе сахара из сваренного утфеля 50 % количество циклов уваривания составит $960/30 = 32$ (т. е. количество «сваренных аппаратов» должно составлять 32). Если в кристаллизационном отделении установлены 5 аппаратов, то цикл уваривания составит $(24 \text{ ч.} \cdot 5 \text{ ап} / 32 \text{ ц.}) = 3,75 \text{ ч.} = 3 \text{ ч.} 45 \text{ мин.}$ (т. е. каждый аппарат должен вводиться в работу каждые 3 ч. 45 мин.).

Если же коллектив идёт на рекорд и «варит», например, не 32, а 35 аппаратов в сутки, то при этом выход сахара из сваренного утфеля составляет 27,4 т, или 45,6 % к массе утфеля. Что это значит?

1) Около 5 % сахара к массе утфеля пошло в оттоки, после чего в виде сахаров 2-й и 3-й кристаллизаций растворяется (расклеровывается) с использованием избыточной воды и рекристаллизуется. В процессе рекристаллизации на выпаривание избыточной воды будет потрачено дополнительное количество пара (топлива).

При содержании $СВ_{\text{клеровки}} = 70\%$ в вакуум-аппаратах 1-й кристаллизации будет дополнительно выпарено ≈ 43 т воды, для чего потребуется до 4 000 м³ газа (до 0,7 м³ газа/т св.)

2) Поскольку цикл уваривания сократился до 3 ч. 25 мин., вакуум-аппараты стали набирать чаще. Но ВУ, в отличие от вакуум-аппаратов, работает непрерывно и, естественно, не может быстрее подавать сироп в кристаллизационное отделение. Поэтому, как правило, оператор ВУ по требованиям из кристаллизационного отделения увеличивает отбор сиропа из ВУ. Как следствие, работа ВУ разбалансируется, $СВ_{\text{сир}}$ снижается, что, в свою очередь, также приводит к увеличению расхода пара в кристаллизационное отделение.

Практическое использование

Результаты предназначены для предварительной оценки и текущего оперативного управления водным режимом теплотехнологического комплекса сахарного завода.

Выводы

Основными критериями энергоэффективной работы кристаллизационного отделения являются следующие.

1. Поддержание стабильно высокой концентрации сухих веществ в продуктах, поступающих на

уваривание в кристаллизационном отделении: сиропе и клеровке.

2. Исключение избыточной воды из кристаллизационного отделения: вакуум-аппаратов, фуговочного и клеровочного участков. Выпаривание 1 т избыточной воды в кристаллизационном отделении требует увеличения расхода пара на технологические нужды до 1 т.

Для этого, кроме прочего, необходимо проводить регулярную наладку центрифуг с целью обеспечения их постоянной номинальной загрузки, наладку клеровочного оборудования для исключения попадания в вакуум-аппараты нерастворенных кристаллов сахара.

К тому же, поскольку выпаривание избыточной воды приводит к повышению $СВ_{\text{сир}}$, создаётся кажущееся противоречие: при высоком $СВ_{\text{сир}}$ имеет место высокий расход пара в кристаллизационное отделение и на технологические нужды в целом. Это не позволяет внедрять реальные энергоэффективные мероприятия, направленные на повышение $СВ_{\text{сир}}$.

3. Важнейшим технологическим мероприятием, направленным на снижение расхода пара в продуктовое отделение, является обеспечение максимально высокого выхода сахара из сваренного утфеля. Снижение выхода сахара из сваренного утфеля на 5 % приводит к увеличению расхода природного газа на величину до 0,7 м³/т св.

Список литературы

1. Мэйхью, К. Семикорпусная выпарная установка на сахарном заводе Виссингтон / К. Мэйхью // Сахар и свёкла. — 2010. — № 1. — С. 27–30.
2. Майхжак, Ф. Кристаллизация на сиропях с высоким содержанием сухих веществ / Ф. Майхжак // Сахар и свёкла. — 2016. — № 2. — С. 10–14.
3. Василенко, С.М. Вакуум-аппараты с циркуляторами: уменьшение расхода топлива-энергетических ресурсов / С.М. Василенко [и др.] // Сахар. — 2006. — № 10. — С. 41–42.
4. Лоренц, Ф. Оптимизированная модель производства сахара из свёклы — первые расчёты / Ф. Лоренц // Сахар и свёкла. — 2009. — № 2. — С. 32–37.

Аннотация. С использованием метода тепловых балансов проведён анализ влияния отдельных теплотехнических и теплотехнологических факторов на энергоэффективность работы кристаллизационного отделения.

Ключевые слова: кристаллизационное отделение, выпарная установка, теплотехнологический комплекс, тепловой баланс. **Summary.** Using the method of heat balances, an analysis was made of the influence of individual heat engineering and heat technology factors on the energy efficiency of the crystallization department.

Keywords: crystallization department, evaporator unit, heat technology complex, heat balance.