

Для оценки эффективности «внутренней» интеграции, а также для «внешней» интеграции ректификационной колонны воспользуемся методами пинч-анализа [2]. Построенные большие составные кривые показывают, что тепловой насос переносит тепло через пинч (источник – сток), следовательно, его применение целесообразно.

Построение сеточной диаграммы, размещение рекуперативных теплообменников и применение метода табличного алгоритма позволяют определить величину рекуперативного тепла, которая составляет $Q_{рек} = 1871,38$ кВт. Конфигурация оптимального размещения теплообменников, рекуперировующих тепло дистиллята и кубового остатка для нагрева исходной смеси, представлена на рис. 2б.

«Внешняя» интеграция ректификационной колонны дает возможность сэкономить 773,7 кВт тепла, подводимого к процессу (39 %) и примерно такую же величину по холодным утилитам.

Таким образом, комплексная «внутренняя» и «внешняя» интеграция ректификационной колонны позволяет снизить расход подводимой тепловой энергии (греющего пара) на 95 % по сравнению с базовым вариантом (рис. 1), а расход охлаждающей воды – почти на 96 %.

Выводы

Проведем общую оценку ориентировочной экономической эффективности по рекомендациям, приведенным в [6,7]. В денежном выражении экономическая эффективность составит около 1,6 млн. грн. в год, а срок окупаемости – 2,5 года, что объясняется высокой стоимостью компрессорного оборудования. Следовательно, основной задачей дальнейших исследований является поиск оптимальной разности температур, реализуемой при сжатии паров верха колонны.

Комплексная интеграция ректификационной колонны может сделать применение термокомпрессии с суммарной степенью сжатия $P/p > 2$ экономически целесообразной.

Литература

1. Dhole V.R., Linnhoff B. Distillation Column Targets.– Proceedings of ESCAPE–7 Symposium, Elsinore, Denmark, May, 24–28, 1992.
2. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов.– Харьков, НТУ «ХПИ», 2000.– 456 с.
3. Nakaiwa M., Ohmori T. Innovation in distillation processes.– “Synthesiology.” English edition, 2009, v.2, No. 1, p. 55–63.
4. Gadalla M. et al. A design method for internal heat integrated distillation columns (iHJDiCs).– Proceedings of ESCAPE–17 Symposium, Elsevier, 2007, 6 pp.
5. Стабников В.Н. Перегонка и ректификация этилового спирта.– М. Пищевая промышленность, 1969б 465 с.
6. Vapor Recompression. Electric Ideas Clearinghouse.– July, 1992, 4 pp.
7. Use Vapor Recompression to Recover Low–Pressure Waste Steam.– US DoE, Advanced Manufacturing Office, Steam Tip Sheet #11, January, 2012, 2 pp.

УДК 66.045.01

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПЛАСТИНЧАТОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ САХАРНОГО СОКА С УЧЕТОМ ОТЛОЖЕНИЙ

¹ Арсеньева О.П., канд. техн. наук, доцент ¹ Бабак Т.Г.,
² Капустенко П.А., канд. техн. наук, профессор ² Хавин Г.Л., канд. техн. наук, доцент
¹ Национальный технический университет «ХПИ»
² АО «Содружество-Т», г. Харьков

Рассмотрена задача практической модернизации системы подогревателей сахарного сока перед выпариванием. Исследуется влияние загрязнений теплообменной поверхности на работоспособность аппарата. Показано, что объяснение увеличения потерь давления за счет уменьшения эквивалентного диаметра является не корректным, так как имеет место и должно учитываться изменение характеристик гидравлического трения. Проектирование теплообменника с запасом поверхности может привести к интенсификации отложений за счет уменьшения скорости в каналах.

The problem of practical modernization of sugar thin juice heater network before evaporate is considered. The influence of the heat exchanger surface fouling to efficiency of heat exchanger is researched. The pressure drop increase at the expense of decrease equivalent diameter is incorrect because took place and must be allowed change of hydraulic friction characteristics is achieved. The plate heat exchanger design with margin of heat exchanger surface can result of fouling intensification because of velocity in channels is decrease.

Ключевые слова: пластинчатые теплообменники, загрязнение теплообменной поверхности, нагрев сахарного сока.

Применение теплообменников в тех или иных промышленных процессах всегда сопровождается загрязнением теплопередающей поверхности слоем отложений. В настоящее время загрязнение считается наиболее важной и наименее изученной проблемой при проектировании и эксплуатации теплообменного оборудования. По сути загрязнение представляет собой процесс взаимодействия таких физических явлений как перенос массы, тепла и импульса с химическими процессами растворимости, коррозии и адсорбции, а также с биологическими и биохимическими процессами. Считается, что загрязнение происходит на любой теплопередающей поверхности практически любым теплоносителем во всех существующих отраслях промышленности.

Появление загрязнения на теплообменной поверхности проявляется в виде двух основных факторов: ухудшение теплопередачи (уменьшение коэффициента теплопередачи) из-за низкого коэффициента теплопроводности слоя отложения и рост потерь давления при прокачивании теплоносителей через каналы теплообменного аппарата. Сложность ситуации при изучении процесса загрязнения теплопередающей поверхности состоит в том, что разнообразие видов теплоносителей и технологических процессов, в которых они участвуют, приводит к тому, что на практике загрязнение является уникальным в каждом конкретном случае.

Фактор загрязнения приобрел особую значимость с ростом мирового внимания к проблеме энергосбережения в каждом конкретном процессе. С экономической точки зрения в большинстве приложений стоимость теплообменного оборудования не является доминирующей, поэтому учет вероятных потерь от загрязнения теплообменников должного внимания не уделялось. Считалось, что это проблема проектантов и технологов. Однако в настоящее время учет влияния загрязнений принимает более широкий аспект с экономической и экологической точки зрения.

Большинство сахарных заводов России и Украины стандартной комплектации были изначально оборудованы 4-мя кожухотрубчатыми многосекционными скоростными подогревателями очищенного сахарного сока перед выпариванием. Такая схема хорошо описана в литературе [1] и тщательно отработана в производстве для 4-х корпусной выпарной станции с концентратом. На практике на многих заводах уже проведена реконструкция с заменой системы последовательно установленных кожухотрубчатых подогревателей на пластинчатые теплообменники, а на некоторых заводах этот процесс происходит или планируется. Фактически при реконструкции системы последовательно установленных подогревателей проектирование производится на те же температурные условия, на которые рассчитывались кожухотрубчатые аппараты. С другой стороны известно, что пластинчатые теплообменники можно рассчитывать и они будут работать с температурной разницей 1-2°C, в то время как секционные кожухотрубчатые требуют до 10°C. Естественно, что при проектировании необходимо максимально использовать это преимущество пластинчатых подогревателей. Таким образом, необходим технически и экономически обоснованный подход к замене трубчатых аппаратов на пластинчатые теплообменники в системе последовательно установленных подогревателей, и это делает рассматриваемую задачу актуальной, имеющей практическую ценность.

Необходимость модернизации и замены кожухотрубчатых подогревателей соков на сахарных заводах пластинчатыми теплообменниками была достаточно полно обоснована как технически, так и экономически в работах [2-5]. В работах [6-7] была сформулирована задача модернизации подогревателей сахарного сока, учитывающая экономические аспекты выбора теплообменных аппаратов. Главной идеей в такой постановке был расчет теплообменника или системы теплообменников по приведенным затратам. Кроме того, было показано, что при проектировании пластинчатых теплообменников на эту позицию, фактически величина допустимых потерь давления в аппаратах играет решающую роль при определении поверхности теплообмена. С другой стороны, одной из основных задач энергосбережения на сахарных заводах является максимальное использование теплового потенциала конденсатов, ретурного и вторичных паров, т.е. греющего теплоносителя. Последнее обстоятельство неразрывно связано с проблемой загрязнения теплообменной поверхности подогревателей сахарного сока.

Поэтому при проведении проектных работ по модернизации системы последовательно установленных подогревателей сахарного сока перед выпариванием на стадии проектирования необходимо учитывать загрязнение поверхности теплообмена аппаратов и предусмотреть возможную остановку и чистку

теплообменников в процессе эксплуатации. Пластинчатые теплообменники в большинстве случаев меньше подвержены загрязнению, чем другие виды, например, кожухотрубчатые. Это принято объяснять следующими факторами:

- высокий уровень турбулентности движения теплоносителей в каналах;
- минимальный уровень коррозии материала пластин;
- практически полное отсутствие застойных зон в каналах;
- благодаря высокому коэффициенту теплоотдачи, температура поверхности стенки теплопередающей пластины достаточно низка, что уменьшает вероятность выпадения на ее поверхности (кристаллизации) растворимых солей.

В настоящее время существует достаточно большой разрыв между расчетными методами, учитывающими возможность загрязнения поверхности теплообмена, и реальным загрязнением поверхности в процессе эксплуатации. Главная цель настоящей работы – корректная формулировка задачи достоверного учета влияния загрязнений теплообменной поверхности на стадии проектирования пластинчатых теплообменников, разработка математической модели и вычислительных методов проектирования.

Прежде всего, следует определиться с природой отложений в теплообменных аппаратах нагрева осветленного сока перед выпариванием. Согласно данным [8], приведенным для трубчатых подогревателей, отложения на теплопередающей поверхности подогревателей перед выпариванием сока, в основном представляют собой кристаллических образований карбонатов кальция, гипса, кремнезема со значительными включениями адсорбированных органических веществ. Кроме того, в состав отложений входит большое количество сернистых соединений. Авторы относят вещества загрязнений к классу нерудных искусственных минералов и рассматривают их как твердое тело.

Необходимо заметить, что большинство известных исследований по загрязнениям в сахарной промышленности, а также исследований, связанных с изучением влияния тепловых и гидродинамических условий на образование отложений, относятся к процессу выпаривания сока. Изучение образования загрязнений в подогревателях сока уделялось намного меньше внимания. Процессы выпаривания и нагрева принципиально отличаются друг от друга, и, как следствие, условия образования отложений также принципиально отличаются. Поэтому переносить накопленные данные и теоретические модели из исследований по накипеобразованию при выпаривании на учет загрязнений при подогреве является некорректным.

В качестве примера, демонстрирующего появление и динамику отложений, рассмотрим установку пластинчатого подогревателя сахарного сока перед выпариванием, с использованием в качестве греющего теплоносителя конденсата. Исходные данные для расчета принимались такими: $G_c = 350000$ кг/ч сока, $t_{11} = 112$ °C, $t_{12} = 92$ °C, $t_{21} = 88$ °C, $t_{22} = 93,3$ °C, где G_h , t_{11} , t_{12} – расход, входная и выходная температура греющего теплоносителя; G_c , t_{21} , t_{22} – расход, входная и выходная температура нагреваемого теплоносителя (сока). Допустимые потери давления по стороне сока не должны превышать $[\Delta p_c] = 30$ КПа. В результате проектирования к установке был принят теплообменник марки M15M производства фирмы «Альфа Лаваль» 150 пластин (74 канала) с геометрическими параметрами: высота гофры – 4,0 мм; ширина пластины – 0,446 м; эквивалентный диаметр – 8 мм; площадь пластины – 0,62 м²; площадь канала – $1,8 \cdot 10^{-3}$ м²; приведенная длина – 1,244 м. Допустимые потери давления по стороне сока: общие – 29,9 КПа, в коллекторах и присоединениях – 6,3 КПа. Конструктивно аппарат выполнен с четырьмя (два входа и два выхода) присоединениями по сахарному соку рис.1. Такая конструкция аппарата обусловлена тем, что расход нагреваемого теплоносителя вызывает большие потери давления в коллекторах и присоединениях и высокую неравномерность распределения теплоносителя по длине пакета пластин. Для исключения этих явлений было принято решение о подаче сока со стороны неподвижной и прижимной плит, рис.1.

Кроме того, такая конструкция аппаратов позволяет использовать теплообменники с пластинами меньшего типоразмера, что в свою очередь, существенно снижает стоимость устанавливаемого теплообменника. К неудобствам использования одноходовых пластинчатых аппаратов такого исполнения является некоторая сложность в доступе к пакету пластин, связанная с необходимостью отсоединения трубопроводов на неподвижной плите во время разборки.

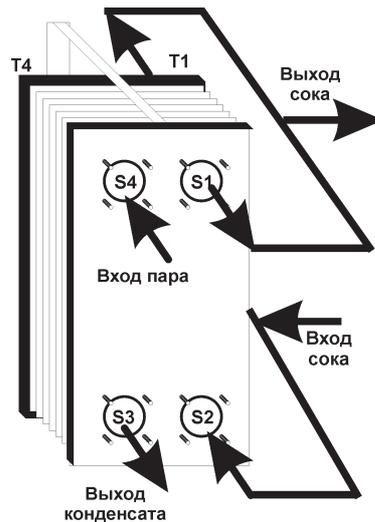


Рис. 1 – Схема подачи теплоносителей в теплообменник

Потери давления по теплоносителю Δp , Па, в пакете пластин рассчитываются из соотношения

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{l_{pr}}{d_{ekv}} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \leq [\Delta p],$$

где ρ – средняя плотность теплоносителя, кг/м³; l_{pr} – приведенная длина пластины, м, равная отношению площади теплопередающей поверхности пластины f_{pl} к ее ширине b ; d_{ekv} – эквивалентный диаметр, м, который принимается равным двум высотам гофры. Величина ζ – коэффициент гидравлического трения, являющийся функцией геометрических параметров пластины (гофрировки), который рассчитывается по формуле $\zeta = B \cdot Re^{-m}$, где $Re = w \cdot d_{ekv} / \nu$ – число Рейнольдса, B, m – постоянные; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Мониторинг работы установленных аппаратов после пуска на подогрев сахарного сока показал следующее. Во-первых, практически сразу после пуска выяснилось, что действительные потери давления по стороне сахарного сока превышают расчетные примерно в 1,8 раза, достигая значения для теплообменника с конденсатным обогревом в 55 КПа. Во-вторых, по истечении 1,5-2 месяцев эксплуатации аппаратов потери давления увеличились практически в 2 раза и достигли значения 100 КПа. Как следствие увеличения сопротивления на прокачивание сока было принято решение на остановку и чистку аппаратов.

Будем считать, что за счет увеличения напора насоса по стороне сахарного сока расход в пакете пластин поддерживается постоянным, равным расчетному значению. Также предположим, что в пакете пластин все каналы находятся в одинаковых условиях и по площади пластины загрязнение происходит равномерно. Примем, что появление отложений приводит к уменьшению эквивалентного диаметра каналов, т.е. к уменьшению высоты гофры. Тогда, соответствующее увеличенным потерям давления значение высоты гофры можно определить из соотношения

$$\delta_w = \left[B \cdot \left(\frac{2 \cdot V_c}{n_{ch} \cdot b \cdot \nu_c} \right)^{-m} \cdot \frac{f_{pl} \cdot \rho_c}{4 \cdot b} \cdot \left(\frac{V_c}{n_{ch} \cdot b} \right)^2 \cdot \frac{1}{\Delta p_k} \right]^{\frac{1}{3}},$$

где Δp_k – потери давления в пакете пластин (разность между общими потерями давления и потерями в коллекторах и присоединениях), КПа; V_c – объемный расход сахарного сока в канале, м³/с; ρ_c – плотность сока, кг/м³; ν_c – кинематическая вязкость, м²/с. Положим $B = 1,632$; $m = 0,11$. Для $\Delta p_k = 55$ КПа получим $\delta_w = 3,3$ мм или уменьшение высоты гофры на 0,7 мм; для $\Delta p_k = 100$ КПа получим $\delta_w = 2,66$ мм или уменьшение высоты гофры на 1,34 мм. По достижении значения потерь давления 100 КПа аппарат был остановлен и открыт. В результате внешнего осмотра выяснилось, что отложения на пластинах имеют толщину не более 0,5-0,8 мм. По своим свойствам загрязнение не имеет твердого основания и достаточно легко счищается щетками и водой. Разборка и чистка пластин аппарата заняла не более одной смены работы двух рабочих без применения каких-либо химических реагентов.

Выводы

— физические свойства очищенного сахарного сока перед выпариванием требуют уточнения, особенно значение вязкости, которое, по всей видимости, является заниженным по сравнению с расчетными значениями, приведенными в литературе;

— предположение о том, что увеличение потерь давления при загрязнении происходит за счет уменьшения эквивалентного диаметра (высоты гофры) оправданно лишь частично, что отражает непосредственный осмотр загрязненной поверхности;

— в процессе эксплуатации имеет место изменение величины гидравлического трения, которое несет большую ответственность за увеличение потерь давления по мере загрязнения;

— на практике имеет место асимптотический характер роста сопротивления загрязнений в процессе эксплуатации теплообменного аппарата, обусловленный частичным уносом отложений при прокачивании сахарного сока через аппарат;

— увеличение числа каналов при проектировании (запас поверхности) ослабляет действие отложений, так для числа каналов 84 уменьшение высоты гофры до 2,66 мм приводит к потерям давления 80 КПа;

— увеличение числа каналов с другой стороны может привести к снижению скорости в каналах и фактическому уменьшению времени до остановки теплообменника на чистку.

Литература

1. Гребенюк С.М. Технологическое оборудование сахарных заводов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983.- 517 с.
2. Эффективный нагрев продуктов – основа совершенствования теплоиспользования на сахарных заводах / В.А. Колесников, А.Ю. Аникеев, С.А. Захаров, И.В. Овсянников // Сахар, 2007.- №7.- С. 36 - 38.
3. Пластинчатые теплообменники в промышленности //Л. Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, О.П. Арсеньева. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004.- 232 с.
4. Реконструкция тепловой схемы сахарного завода с использованием пластинчатых теплообменных аппаратов // Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Демирский А.В., Хавин Г.Л. Інтегровані технології та енергозбереження //Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: ХДПУ. – 2003, №2.– С.3-9.
5. Демирский А.В., Хавин Г.Л. Реконструкция отделения очистки сахарного сока с применением пластинчатых теплообменников // Інтегровані технології та енергозбереження //Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008, №2.– С. 98 - 102.
6. Модернизация системы последовательно установленных подогревателей сахарного сока / О.П. Арсеньева, Бабак Т.Г., Демирский А.В., Хавин Г.Л. // Наукові праці ОНАХТ.– Одеса: 2011, Вип..39.– Том.2.– С.151 - 155.
7. Арсеньева О.П., Демирский А.В., Хавин Г.Л. Оптимизация пластинчатого теплообменника // Пробл. машиностроения.– 2011.– т.14, №1.– С.23 - 31.
8. Сагань И.И., Разладин Ю.С. Борьба с накипеобразованием в теплообменниках. - Киев: Техника, 1986.- 133 с.

УДК 66.046.8 (088.8)

АНАЛІЗ І КЛАСИФІКАЦІЯ ІСНУЮЧИХ ТА ОБГРУНТУВАННЯ НОВОГО СПОСОБУ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

Цуркан О.В., к.т.н., доцент, Міщук Т.О., аспірант
Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

Проведено детальний аналіз і класифікація існуючих способів та обладнання для теплової обробки харчової сировини з метою встановлення подальших напрямків їх вдосконалення.

The detailed analysis and classification of existing methods and equipment for thermal processing of food raw materials was performed to determine future directions for their improvement.

Ключові слова: харчова сировина, консерви, тепла обробка, автоклав.