

*Т.Г. БАБАК*, доц., НТУ «ХПИ»;

*А.В. ДЕМИРСКИЙ*, аспирант, НТУ «ХПИ»;

*И.Б. РЯБОВА*, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;

*А.Н. ОРОБЕЙ*, специалист, НТУ «ХПИ»

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ САХАРНОГО СОКА**

Рассмотрена задача модернизации установки выпаривания осветлённого сахарного сока, главной целью которой являлось снижение потребления внешних энергоносителей. Задача повышения энергоэффективности была решена в соответствии с принципами пинч-анализа. Значение минимальной температурной разности было найдено из условия достижения минимума общей приведенной стоимости. Для полученного значения минимальной температурной разности построены составные кривые, определены целевые значения утилит и построена сеточная диаграмма. В соответствии с правилами пинч-анализа размещено теплообменное оборудование. В статье приведена аргументация подбора разборных пластинчатых теплообменников фирмы Alfa Laval с учетом возможного загрязнения в процессе эксплуатации. Представлены результаты экономических расчетов, доказывающих эффективность предложенной схемы модернизации.

**Ключевые слова:** выпарная установка, пинч-технология, составные кривые, минимальная разность температур, загрязнение теплообменников.

**Введение.** Повышение энергоэффективности предприятий пищевой промышленности является одним из приоритетных направлений энергосбережения в Украине. Выпарная установка сахарного завода представляет собой самый мощный потребитель энергии в виде ретурного пара высокого давления. Кроме того, выпарная установка сама является поставщиком вторичных паров и конденсата для обеспечения вспомогательных технологических процессов. Поэтому снижение затрат ретурного пара, повышение степени рекуперации тепла установки и повышение экономичности ее работы в целом является актуальной задачей, имеющей практическую ценность.

**Анализ последних исследований и литературы.** Модернизация выпарной установки является наиболее важной задачей снижения потребления тепла в производстве сахара. Несмотря на многолетние исследования работы выпарных станций [1, 2], в настоящее время интерес к повышению эффективности их работы не ослабевает. Прежде всего, изучается вопрос модернизации оборудования обеспечивающего работу станции, так как полная реконструкция с заменой выпарных аппаратов требует огромных капитальных затрат.

Следует отметить работы [3, 4] посвященные основополагающим принципам замены трубчатых высокоскоростных секционных подогревателей на пластинчатые. Также в этом направлении, включая совместную работу с выпарными аппаратами, представлены исследования в [5, 6]. В большинстве зарубежных работ по модернизации выпарных установок применяется разработанное математическое обеспечение, например SUGAR или ECOSIMPRO. В большинстве случаев эти исследования носят теоретический характер, без привязки к модернизации конкретного производства.

**Постановка задачи и цель работы.** Рассматривается выпарная установка сахарного завода с расходом осветленного сока 21,7 кг/с. Входной осветленный сок концентрации 15% подогревается с температуры 30°C до 124 °C, проходя через систему последовательно установленных теплообменных аппаратов. Мощность рекуперации тепловой энергии в системе равна 5175,4 кВт. Для подогрева сока на входе в первый корпус выпарной установки используется ретурный пар с температурой 140 °C. Мощность потребляемой горячей утилиты (пара) – 2876,2 кВт, холодной (воды) – 1595,3 кВт. Данные о потоках, участвующих в рекуперации, представлены в табл. 1

Таблица 1. Характеристика потоков, участвующих в рекуперации тепла

№	Название потока	Тип	$T_S$	$T_T$	$G$	$c$	$r$	$CP$	$\Delta H$
1	Конденсат ретурного пара	гор.	140	90	3,54	4,24	–	15	750,4
2	Экстрапар 3-го корпуса	гор.	96,1	96,1	0,71	–	2267	–	1598,4
3	Экстрапар 4-го корпуса	гор.	81,2	81,2	0,81	–	2306	–	1870
4	Смесь конденсатов	гор.	106,6	50	10,7	4,2	–	45,1	2551,9
5	Входной сок	хол.	30	124	21,7	3,947	–	85,66	8051,6

В табл. 1  $T_S$  – начальные температуры потоков, °С;  $T_T$  – конечные или целевые температуры, °С;  $G$  – массовый расход, кг/с;  $c$  – удельная теплоемкость, кДж/кг·°С;  $r$  – удельная теплота конденсации, кДж/кг;  $CP$  – потоково-вая теплоемкость, кВт/°С;  $\Delta H$  – изменение теплосодержания потока, кВт.

Целью работы является выбор минимальной разности температур  $\Delta T_{\min}$ , проектирование сети противоточных теплообменников, в которых значение минимального температурного напора не будет превышать  $\Delta T_{\min}$ , расчет пластинчатых теплообменников в соответствии с позициями их установки и экономическое обоснование предложенного проекта.

**Определение основного алгоритма работы.** Решение поставленной задачи было осуществлено на основе принципов пинч-анализа [7].

Для упрощения разработки экономически эффективной системы теплообмена желательно исходить из такого значения  $\Delta T_{\min}$ , которому соответствовало бы минимальное значения общей приведенной стоимости, то есть позволяло бы осуществить экономический компромисс между капитальными затратами и стоимостью внешних утилит.

Составные кривые, построенные по данным тепловых потоков, располагаются на температурно-энтальпийной плоскости таким образом, чтобы наименьшее расстояние между ними по оси ординат (температуры) было равно выбранному значению  $\Delta T_{\min}$ . По составным кривым могут быть получены целевые значения мощности рекуперации и утилит.

На основании составных кривых строится сеточная диаграмма, на которой и располагаются теплообменники в соответствии с правилами пинч-анализа – в этом случае будет достигнуто целевое значение мощности рекуперации.

**Проектирование сети теплообменников.** Используя программу PINCH, было рассчитано значение  $\Delta T_{\min} = 5^\circ\text{C}$ , которое соответствует минимальному значению общей приведенной стоимости проекта.

Составные кривые технологических потоков (табл. 1) приведены на рис. 1.

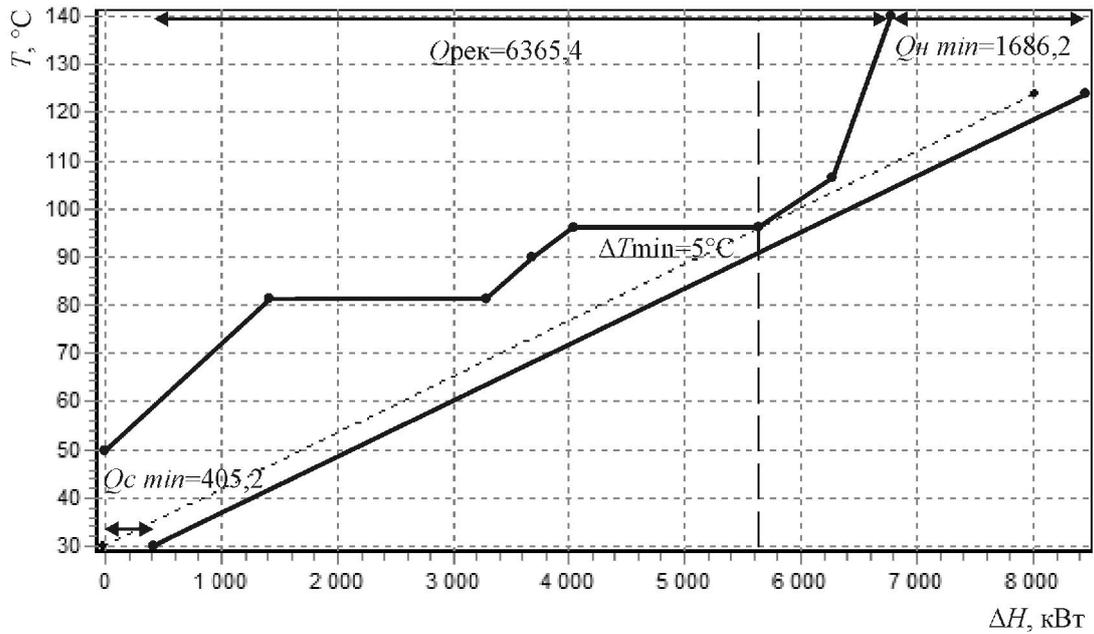


Рис. 1. Составные кривые тепловых потоков

Из составных кривых видно, что при  $\Delta T_{\min} = 5^{\circ}\text{C}$  можно рекуперировать 6365,4 кВт. При этом требуемая мощность пара 1686,2 кВт, а холодной воды – 405,2 кВт. В точке максимального сближения составных кривых – в точке пинча – температура горячих потоков равна  $96,1^{\circ}\text{C}$ , а холодных –  $91,1^{\circ}\text{C}$ . В соответствии с этим была построена сеточная диаграмма и размещены теплообменники, что изображено на рис. 2.

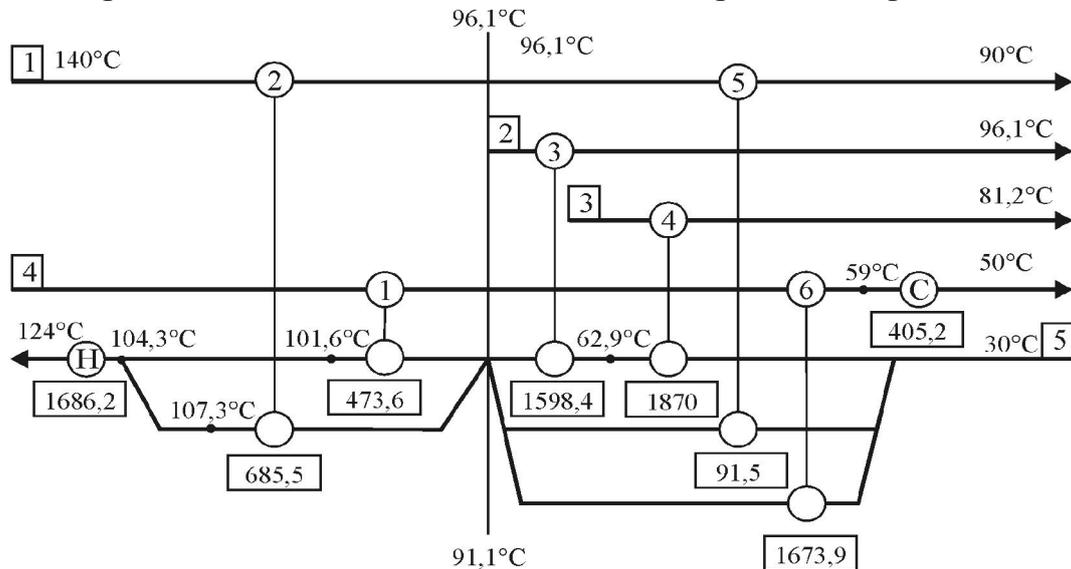


Рис. 2. Сеточная диаграмма установленных теплообменников

Следует отметить, что расщепление потока №5 в области ниже пинча на три сделано таким образом, чтобы первый из них принял всю энергию

конденсации потоков №2 и №3, второй охладил до целевой температуры поток №1 до целевой температуры, а третий принял часть тепла от потока №4. При таком расщеплении в системе достаточно одного холодильника.

**Подбор теплообменных аппаратов.** Для модернизации тепловой схемы были выбраны разборные пластинчатые теплообменники фирмы Alfa Laval. Результаты расчета аппаратов, размещенных на сеточной диаграмме (рис. 2), представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики теплообменного оборудования

№	Тип пластины	Компоновка	Число пластин	Площадь, м <sup>2</sup>	Запас ( <i>Margin</i> ),%
1	<i>M6M</i>	1×65H/1×65H	131	18,3	15
2	<i>M6M</i>	1×40H/1×40H	81	11,3	34
3	<i>M10M</i>	1×76H/1×77H	154	33,9	51
4	<i>M15M</i>	1×34ML/1×35MH	70	43,4	203
5	<i>M6M</i>	1×12H/3×4H	25	3,5	143
6	<i>M15M</i>	2×(9H+6ML)/2×(9H+6MH)	61	37,8	32
<i>H</i>	<i>M6M</i>	1×8MH/1×9ML	18	2,5	114
<i>C</i>	<i>M6</i>	1×(12MH+17L)/1×(12ML+17L)	59	8,9	1

Главной спецификой выбора этих аппаратов является их интенсивное загрязнение в процессе эксплуатации [8, 9]. Особенностью расчета теплообменного аппарата на позиции 4 является низкое давление (температура) греющего пара, что приводит к высоким потерям давления в аппарате. Последнее обстоятельство влечет за собой увеличения числа пластин и, как следствие, к снижению скорости сока по нагреваемой стороне. Снижение скорости сока приводит к уменьшению величины касательного напряжения на стенке пластины и тем самым увеличивает возможность загрязнения поверхности теплообмена.

Для снижения интенсивности загрязнения поверхности были выбраны к установке в аппарате пластины *ML/MH*, обладающие более высоким гидравлическим сопротивлением по стороне сока и повышена величина *Margin* до 203%. Такое значение этой величины означает, что конденсация пара происходит примерно на одной трети в верхней части пластины, а на оставшейся части имеет место охлаждение конденсата. По мере загрязнения стенок пластин со стороны холодного теплоносителя (сахарного сока) будет происходить увеличение поверхности конден-

сации. Таким образом, данный теплообменник рассчитан с запасом на предполагаемое загрязнение теплопередающей поверхности.

Для теплообменника на позиции 4 (табл. 2) в качестве греющего теплоносителя выступает конденсат. Учитывая склонность к загрязнению по стороне нагреваемого сока, к установке выбран теплообменник с более широким каналом типа «М». Для повышения скорости сока по холодной стороне и снижения интенсивности загрязнения поверхности теплообмена в процессе работы, аппарат рассчитан двухходовым с запасом в 32%. Повышение потерь давления по греющей стороне до 70 кПа не является критичным потому, что конденсат – это чистый теплоноситель и загрязнения пластин по горячей стороне не происходит [8]. Потери давления по стороне сока 26 кПа, что свидетельствует о наличии резерва в увеличении потерь давления по мере загрязнения аппарата.

На позиции 1 (табл. 2) происходит нагревание сока конденсатом. Для этого принят к установке аппарат марки М6М с более широким каналом и запасом по теплопередающей поверхности 15%. Такой выбор обеспечивает достаточно высокое значение касательного напряжения на стенке порядка 50 кПа, что косвенно гарантирует невысокую вероятность появления отложений на стенках пластин. Там же на позиции 2 принят к установке теплообменник марки М6М и запасом на загрязнение 34%, для которого по стороне сахарного сока касательное напряжение на стенке равно 96,4 кПа.

Для подогрева сока на позиции 3 (табл. 2) устанавливается паровой подогреватель марки М10М с двумя входами по пару и значением margin 51%. Такой выбор аппарата по схеме должен обеспечить нагревание сока после аппаратов первой ступени, где происходит основной процесс выпадения отложений на теплопередающей поверхности.

Позиция 5 для установки пластинчатого теплообменника является крайне невыгодной, так как расход теплоносителей по стороне греющего теплоносителя практически в 10 раз превышает расход сока по нагреваемой стороне. В такой ситуации для обеспечения приемлемой скорости сока в каналах необходимо проектировать несимметричную многоходовую компоновку. В данном случае по стороне сока предусмотрено 3 хода, а по стороне конденсата – один. В результате расчетов к установке принят теплообменник марки М6М 25 пластин с запасом поверхности

143%. На рис. 3 представлена принципиальная схема выпарной установки после модернизации.

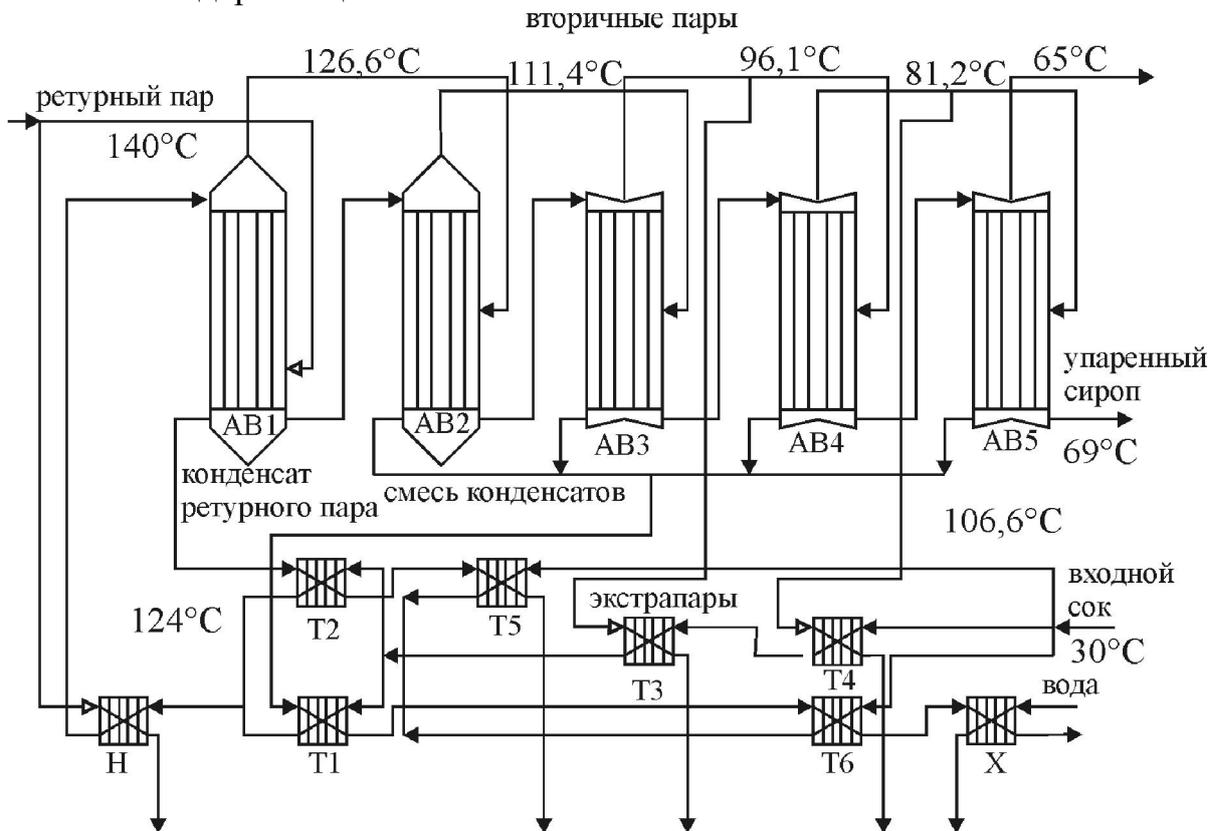


Рис. 3. Принципиальная схема модернизированной выпарной установки

**Экономическая оценка проекта.** Предложенный проект размещения теплообменных аппаратов позволяет увеличить мощность рекуперации с 5175,4 кВт до 6365,4 кВт, то есть достигается экономия 1190 кВт. Были проведены экономические расчеты, основные результаты которых показаны в табл. 3.

Таблица 3. Экономические показатели проекта

Название показателя	Значение показателя
Стоимость оборудования, грн.	1412329
Общая сумма затрат на эксплуатацию, грн.	496254
Общая сумма капитальных затрат, грн.	1896028
Годовая экономия, грн.	7789670
Годовой прирост чистой прибыли, грн.	6134030
Срок окупаемости, лет	0,31
Коэффициент эффективности капитальных вложений	3,2

**Выводы.** Проведена модернизация существующей схемы выпарной установки сахарного завода на основе принципов пинч-анализа. Рассчитано теплообменное оборудование с учетом специфики тепловых потоков выпарной установки. Экономическая оценка показала, что предложенный проект модернизации весьма эффективен – рассчитанный срок окупаемости составляет примерно 4 месяца.

**Список литературы:** 1. Колесников В.А. Теплосиловое хозяйство сахарных заводов / В.А. Колесников, Ю.Г. Нечаев. – М.: Пищевая пром-ть. 1980. – 391 с. 2. Прудюс Б.В. Расчет оборудования сахарных заводов. / Прудюс Б.В., Хоменко А.И. – М.: Агропромиздат. 1985. – 223 с. 3. Колесников В.А. Перспектива использования пластинчатых выпарных аппаратов в отечественной сахарной промышленности / В.А. Колесников, А.Ю. Аникеев, Ю.В. Козлова и др. // Сахар. 2007. – № 10. – С. 43–48. 4. Товажнянский Л.Л. Реконструкция тепловой схемы сахарного завода с использованием пластинчатых теплообменных аппаратов / Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, А.В. Демирский, Г.Л. Хавин // Интегровані технології та енергозбереження. – Х.: ХДПУ. 2003. – № 2. – С. 3–9. 5. Pérez E.S. Dynamic modelling and simulation with ECOSIMPRO of an evaporator station in the sugar industry / 1st Meeting of EcosimPro Users, UNED, Madrid, 3–4 May 2001. – P. 8–11. 6. Sugar Factory Process Optimization Using the Sugar Computer Program / Present to the 22 General Meeting of the American Society of sugar beet technologists. – 21 p. 7. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев – Х.: НТУ «ХПИ», 2000. – 456 с. 8. Демирский А.В. Анализ работы систем подогревателей сахарного сока с учетом загрязнений теплообменной поверхности / А.В. Демирский, Л.Л. Товажнянский, О.П. Арсеньева, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин // Интегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХП». 2013. – № 2. – С. 14–17. 9. Демирский А.В. Анализ процесса образования отложений в пластинчатых подогревателях сахарной промышленности / Интегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХП». 2014. – № 4. – С. 74–78.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kolesnikov V.A. Teplosilovoe hozyaystvo saharnyh zavodov / V.A. Kolesnikov, Yu. G. Nechaev. – Moscow: Pishchevaya promyshlennost. 1980. – 391 p. 2. Prudius B.V. Raschet oborudovaniya saharnyh zavodov. / Prudius B.V., Homenko A.I. – Moscow: Agropromizdat. 1985. – 223 p. 3. Kolesnikov V.A. Perspektiva ispolzovaniya plastinchatykh vyparnykh apparatov v otechestvennoy saharnoy promyshlennosti / V.A. Kolesnikov, A.Yu. Anikeev, Yu.V. Kozlova i dr. // Sahar. 2007. – No. 10. – P. 43–48. 4. Tovazhnyanskiy L.L. Rekonstruktsiya teplovoy shemy saharного zavoda s ispolzovaniem plastinchatykh teploobmennykh apparatov / L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, A.V. Demirskiy, G.L. Khavin // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Kharkiv: KhDPU. 2003. – No. 2. – P. 3–9. 5. Pérez E.S. Dynamic modelling and simulation with ECOSIMPRO of an evaporator station in the sugar industry / 1st Meeting of EcosimPro Users, UNED, Madrid, 3–4 May 2001. – P. 8.1–8.11. 6. Sugar Factory Process Optimization Using the Sugar Computer Program / Present to the 22 General Meeting of the American Society of sugar beet technologists. – 21 p. 7. Smith R. Osnovy integratsii teplovykh protsessov / R. Smith, J. Klemes, L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, L.M. Ul'yev – Khar'kov. NTU «KhPI». 2000. – 456 p. 8. Demirskiy A.V. Analiz raboty sistem podogrevateley saharного soka s uchetom zagryazneniy teploobmennoy poverhnosti / A.V. Demirskiy, L.L. Tovazhnyanskiy, O.P. Arsen'eva, P.A. Kapustenko, G.L. Khavin // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Kharkiv: NTU «KhPI». 2013. – No. 2. – P. 14–17. 9. Demirskiy A.V. Analiz protsessa obrazovaniya otlozheniy v plastinchatykh podogrevatelyah saharной promyshlennosti / Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Kharkiv: NTU «KhPI». 2014. – No. 4. – P. 74–78.

*Поступила (received) 04.02.2015*