

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 | ΔH |
|---|--------------------------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------------|
| 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; ΔH – изменение теплосодержания потока, кВт.

Целью работы является выбор минимальной разности температур ΔT_{\min} , проектирование сети противоточных теплообменников, в которых значение минимального температурного напора не будет превышать ΔT_{\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 ΔT_{\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 ΔT_{\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.

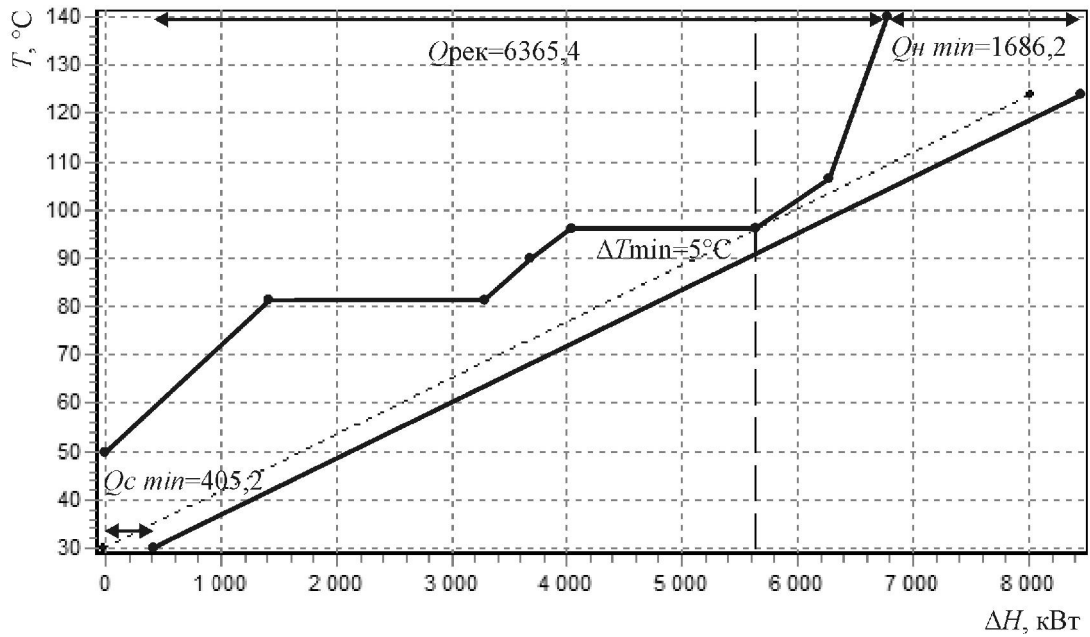


Рис. 1. Составные кривые тепловых потоков

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.

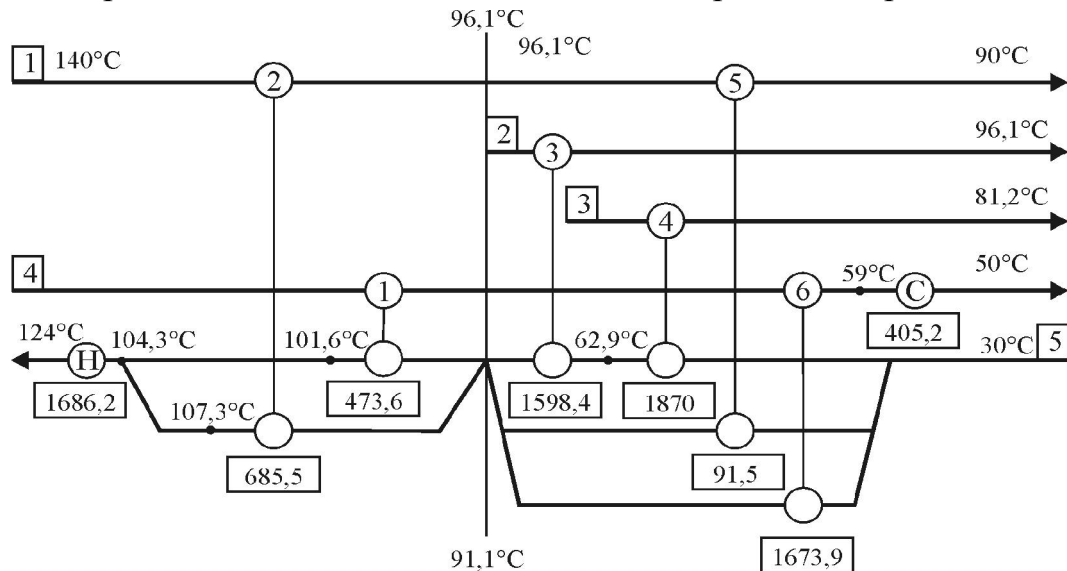


Рис. 2. Сеточная диаграмма установленных теплообменников

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 ² | Запас (<i>Margin</i>),% |
|----------|--------------|---|---------------|-------------------------|---------------------------|
| 1 | <i>M6M</i> | 1×65 <i>H</i> /1×65 <i>H</i> | 131 | 18,3 | 15 |
| 2 | <i>M6M</i> | 1×40 <i>H</i> /1×40 <i>H</i> | 81 | 11,3 | 34 |
| 3 | <i>M10M</i> | 1×76 <i>H</i> /1×77 <i>H</i> | 154 | 33,9 | 51 |
| 4 | <i>M15M</i> | 1×34 <i>ML</i> /1×35 <i>MH</i> | 70 | 43,4 | 203 |
| 5 | <i>M6M</i> | 1×12 <i>H</i> /3×4 <i>H</i> | 25 | 3,5 | 143 |
| 6 | <i>M15M</i> | 2×(9 <i>H</i> +6 <i>ML</i>)/2×(9 <i>H</i> +6 <i>MH</i>) | 61 | 37,8 | 32 |
| <i>H</i> | <i>M6M</i> | 1×8 <i>MH</i> /1×9 <i>ML</i> | 18 | 2,5 | 114 |
| <i>C</i> | <i>M6</i> | 1×(12 <i>MH</i> +17 <i>L</i>)/1×(12 <i>ML</i> +17 <i>L</i>) | 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.

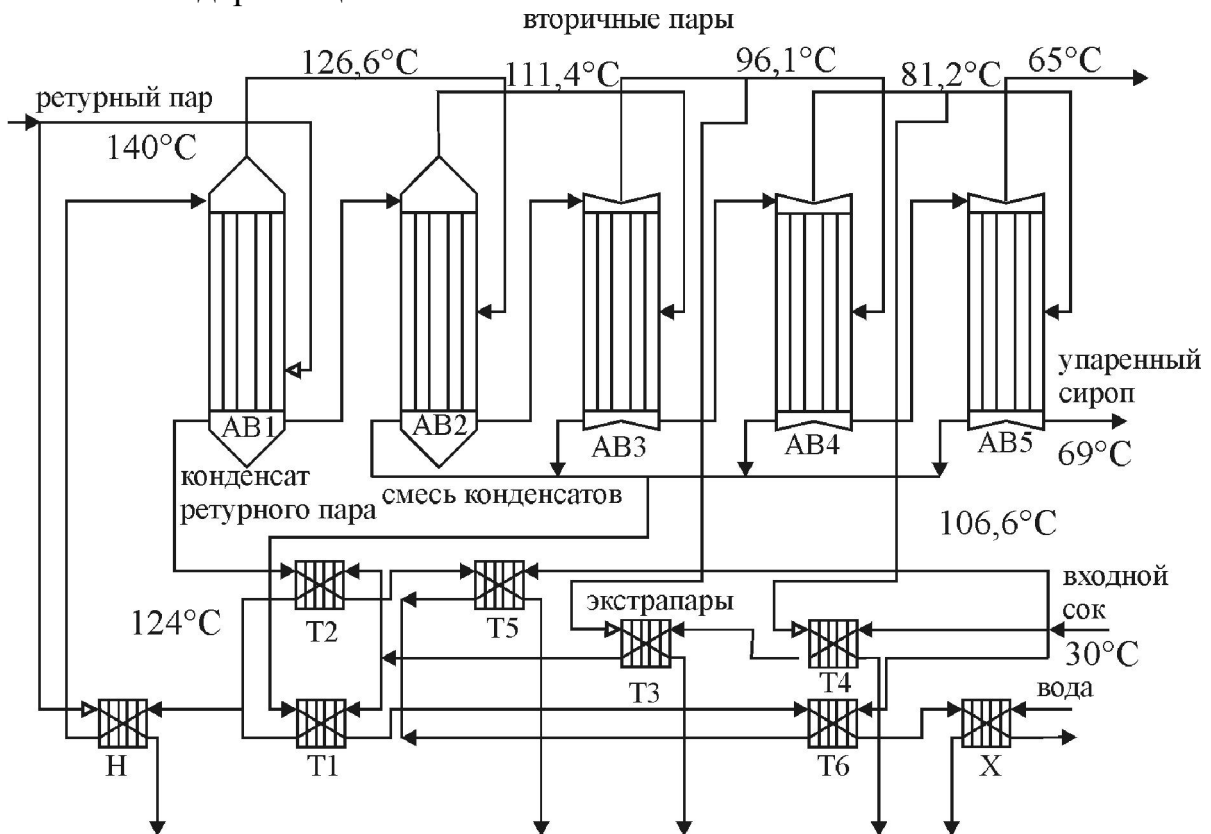


Рис. 3. Принципиальная схема модернизированной выпарной установки

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 saharnykh zavodov / V.A. Kolesnikov, Yu. G. Nechaev. – Moscow: Pishchevaya promyshlennost. 1980. – 391 p. 2. Prudius B.V. Raschet oborudovaniya saharnykh 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 saharnogo 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 saharnogo 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 saharnoy promyshlennosti / Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Kharkiv: NTU «KhPI». 2014. – No. 4. – P. 74–78.

Поступила (received) 04.02.2015