

УДК 66.012.45:664.1.048

**Т. Г. БАБАК, О. А. ГОЛУБКИНА, Д. С. КОРОЛЬ, Е. Д. ПОНОМАРЕНКО****ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СТАНЦИИ УПАРИВАНИЯ САХАРНОГО СИРОПА**

Проведено аналіз сучасних засобів енергозбереження в процесах багатокорпусного випарювання. Зроблено екстракцію даних випарної станції концентрування цукрового сиропу та виявлено недоліки в організації рекуперації енергії потоків системи. За допомогою технологій пінч-аналізу було проведено реконструкцію існуючої технологічної схеми: для економічно обґрунтованого значення  $\Delta T_{\min}$  сплановано мережу теплообмінників, що забезпечують максимально можливу рекуперацію енергії в системі. Розраховано параметри теплообмінного обладнання.

**Ключові слова:** випарна станція, пінч-аналіз, складові криві, сіткова діаграма, пластинчаті теплообмінники.

Проведен анализ современных подходов к энергосбережению в процессах многокорпусного выпаривания. Произведена экстракция данных выпарной станции концентрирования сахарного сиропа и выявлены недостатки в организации рекуперации энергии потоков системы. С помощью технологий пинч-анализа была проведена реконструкция существующей технологической схемы: для экономически обоснованного значения  $\Delta T_{\min}$  спланирована сеть теплообменников, обеспечивающая максимально возможную рекуперацию энергии в системе. Рассчитаны параметры теплообменного оборудования.

**Ключевые слова:** выпарная станция, пинч-анализ, составные кривые, сеточная диаграмма, пластинчатые теплообменники.

The analysis of modern approaches to energy saving in multicase evaporation was carried out. Extraction of data of sugar syrup evaporation plant was made and shortcomings of the organization of system streams energy recovery were revealed. By means of the pinch-analysis technologies the reconstruction of the existing technological scheme was carried out: for economically reasonable  $\Delta T_{\min}$  value the network of heat exchangers providing the greatest possible energy recovery in system was designed. Parameters of the heat exchange equipment were calculated.

**Keywords:** evaporation plant, pinch-analysis, composite curves, grid diagram, plate heat exchangers.

**Вступлення.**

Важнейшей составляющей тепловой схемы получения сахара является выпарная установка, предназначенная для концентрирования сахарного раствора. От качественного функционирования многокорпусной выпарной установки во многом зависит энергоэффективность работы всего производства в целом.

Главной задачей при проектировании и эксплуатации выпарной станции, включающей в себя также систему подогревателей предварительного подогрева сиропа перед выпариванием, является максимально возможное использование рекуперации и теплоты конденсирующихся паров.

Рациональное проектирование тепловой схемы выпаривания во многом определяет себестоимость производства сахара, является актуальным и имеет большую практическую ценность.

**Современные подходы к энергосбережению в процессах многокорпусного выпаривания.**

Оценить процесс выпаривания, с точки зрения энергосбережения, можно, например, исходя из обобщенной функции Харингтона [1]. Однако такой подход является скорее технико-экономической оценкой существующего проектного решения. Одним из наиболее эффективных методов снижения потребления энергии при выпаривании в сахарной промышленности является тепловая интеграция выпарной установки [2, 3].

Процесс выпаривания при производстве сахара является наиболее энергоемким, и, несмотря на свою изученность, продолжает оставаться главным объектом исследований с точки зрения энергосбережения. В настоящее время имеется ряд успешных исследований в этом направлении [4,5], в

которых рассмотрено влияние распределения потребителей тепла и эффекта самоиспарения сиропа на расход ретурного пара. Предложено математическое описание распределения с учетом самоиспарения на основе технико-экономического анализа работы выпарной установки. Вопросы, связанные с энергосбережением при выпаривании растворов рассмотрены в работе [6] с точки зрения выбора рациональной поверхности теплопередачи для выпарных аппаратов различных типов.

отоков равна 91,1 усилился поток публикаций публикаций различных авторов по использованию мембранных технологий взамен испарительной концентрации [7,8]. Однако практика показывает, что применение обратного осмоса дает возможность реализовать предварительную концентрацию сахарного сиропа, а для окончательного сгущения необходимо использовать выпарную установку. Представленные расчеты показали, что предварительная двухступенчатая концентрация в мембранных аппаратах позволяет существенно сэкономить энергию, идущую на выпаривание. Однако открытым остается вопрос о капитальных затратах на реализацию этой технологии и затраты на эксплуатацию мембран в течение сезона сахароварения.

Большое значение также придается энергосбережению при выпаривании сахарного сиропа с точки зрения не только снижения затрат ретурного пара, но уменьшению выбросов углекислого газа [9].

С точки зрения увеличения эффективности энергосбережения большое внимание уделяется решению проблем качественного управления процессом выпаривания на основе управляющих

© Т. Г. Бабак, О. А. Голубкина, Д. С. Король, Е. Д. Пономаренко, 2017

алгоритмов [10]. Однако главными направлениями, с которым связаны возможности энергосбережения при многокорпусном концентрировании сахарного сиропа, являются организация максимальной рекуперации тепловой энергии, внедрение нового более эффективного оборудования или модернизация уже имеющегося.

**Целью работы** является модернизация схемы выпарной станции концентрирования сахарного сиропа за счет интеграции тепловых потоков на основе принципов пинч-анализа и использования современного теплообменного оборудования для повышения энергоэффективности работы станции.

#### Обследование выпарной станции и выявление недостатков в организации рекуперации тепловой энергии.

Обследуемая выпарная станция представлена на рис. 1. Упаривание сахарного сиропа с исходной массовой концентрацией 15% происходит в пяти выпарных корпусах, первые два из которых работают под давлением, а следующие три – под разрежением. На выходе получается сироп с массовой концентрацией 51%. В качестве греющего агента в первом выпарном аппарате используется ретурный пар с температурой 140 °С, а в остальных – вторичные пары предыдущего корпуса.

Для подогрева исходного сиропа до температуры кипения в первом выпарном аппарате используются четыре рекуперативных теплообменника и подогреватель ретурным паром П. Греющими агентами являются: смесь конденсатов греющих паров со второго по пятый корпус в теплообменнике Т1, экстрапар четвертого корпуса в теплообменнике Т2, экстрапар третьего корпуса в теплообменнике Т3, конденсат ретурного пара из первого корпуса в теплообменнике Т4. Теплообменники Т1-Т4 и подогреватель П расположены последовательно, что является традиционным для организации рекуперации в многокорпусных станциях выпаривания.

Конденсат из Т4 возвращается на ТЭЦ, а конденсат экстрапаров третьего и четвертого корпусов и частично охлажденная смесь конденсатов со второго по пятый корпус используются для подогрева технической воды. Вторичные пары пятого корпуса конденсируются и доохлаждаются в барометрическом конденсаторе, то есть их энергия не используется.

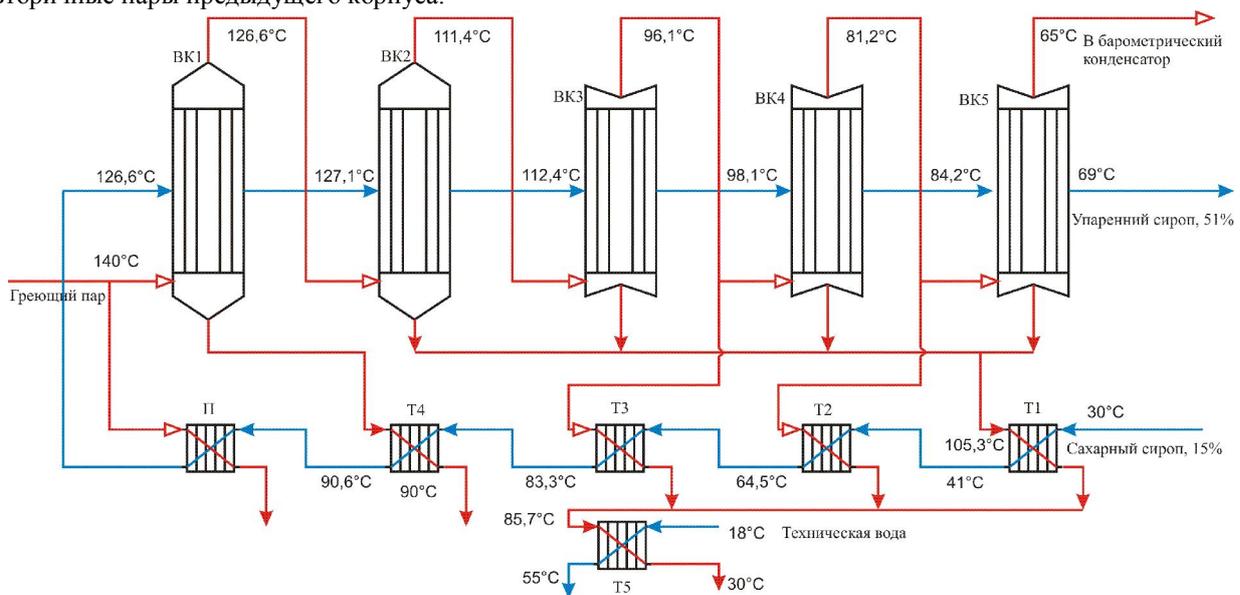


Рис. 1. Схема выпарной станции упаривания сахарного сиропа до модернизации

Для анализа рассматриваемой схемы были рассчитаны тепловые и материальные балансы [11] и составлена таблица тепловых потоков (табл. 1).

Суммарная тепловая мощность горячих потоков составляет 36417,6 кВт, холодных – 39493,52 кВт. В целом мощность рекуперации в

системе 30878,3 кВт, потребление горячих утилит составляет 8614,82 кВт, холодных – 5538,9 кВт.

Анализ потребления энергии внешних утилит и рекуперации энергии в существующей схеме методом составных кривых позволяет выявить ее недостатки.

Таблица 1 – Данные тепловых потоков выпарной станции

№	Название потока	Тип потока	$G$ , кг/с	$T_s$ , °С	$T_i$ , °С	$c$ , кДж/(кг·°С)	$r$ , кДж/кг	$\Delta H$ , кВт	$CP$ , кВт/°С
1	Вторичный пар 1-го корпуса	гор	2,628	126,6	126,6	–	2181	5729,69	–
2	Вторичный пар 2 корпуса	гор	3,034	111,4	111,4	–	2225	6750,3	–

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	Вторичный пар 3 корпуса	гор	2,673	96,1	96,1	–	2267	6058,88	–
4	Вторичный пар 4 корпуса	гор	2,073	81,2	81,2	–	2306	4779,32	–
5	Вторичный пар 5 корпуса	гор	2,22	65	65	–	2342	5212,56	–
6	Конденсат регурного пара	гор	2,696	140	90	4,24	–	571,55	11,43
7	Смесь конденсатов	гор	10,406	105,3	30	4,2	–	3290,74	43,71
8	Экстрапар 3 корпуса	гор	0,657	96,1	96,1	–	2267	1490,23	–
9	Экстрапар 4 корпуса	гор	0,803	81,2	81,2	–	2306	1852,74	–
10	Конденсат экстрапара 3 корпуса	гор	0,657	96,1	30	4,2	–	182,5	2,761
11	Конденсат экстрапара 4 корпуса	гор	0,803	81,2	30	4,2	–	172,77	3,374
12	Конденсат экстрапара 5 корпуса	гор	2,22	65	30	4,2	–	326,34	9,324
13	Испарение в 1 корпусе	хол	20	126,6	126,6	–	2181	5772,07	–
14	Испарение во 2 корпусе	хол	17,372	111,4	111,4	–	2225	5729,69	–
15	Испарение в 3 корпусе	хол	14,338	96,1	96,1	–	2267	6750,3	–
16	Испарение в 4 корпусе	хол	11,008	96,1	96,1	–	2306	6058,88	–
17	Испарение в 5 корпусе	хол	8,132	65	65	–	2342	4779,32	–
18	Исходный сироп	хол	20	30	126,6	3,947	–	7625,6	78,94
19	Техническая вода	хол	17,87	18	55	4,2	–	2777,66	75,072

На рис. 2 представлены составные кривые потоков. Они расположены на температурно-энтальпийной диаграмме таким образом, что область их перекрытия по оси энтальпии равна мощности рекуперации в существующей схеме [3]. Такое расположение составных кривых соответствует значению  $\Delta T_{\min} = 14,9^\circ\text{C}$ , при этом температура пинча холодных потоков составляет  $81,2^\circ\text{C}$ , а горячих –  $96,1^\circ\text{C}$ .

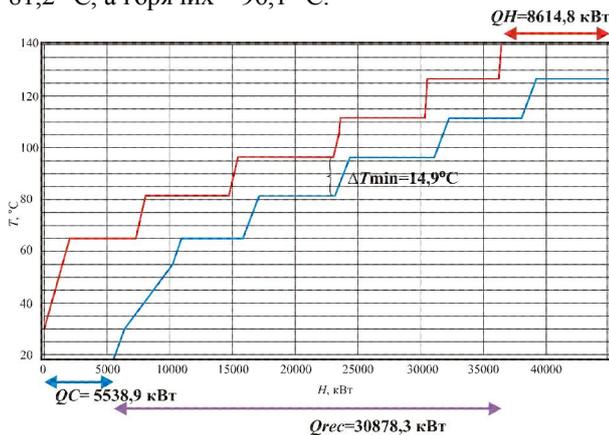


Рис. 2. Составные кривые процесса до модернизации:  
1 – горячих потоков, 2 – холодных потоков

Сеточная диаграмма исходного процесса (рис. 3), с расположенными на ней выпарными и теплообменными аппаратами позволяет сделать выводы о недостаточной эффективности организации рекуперации энергии в системе, а именно, налицо имеется перекрестный теплообмен и перенос энергии через пинч. Следствием является

завышенная величина теплопередающей поверхности в аппаратах.

Для модернизации рассматриваемого процесса было принято значение минимального температурного напора в теплообменном оборудовании  $\Delta T_{\min} = 5^\circ\text{C}$ , которое является экономически обоснованным с одной стороны, с другой – удовлетворяет требованиям конкретного процесса. Так как тепловая энергия экстрапаров и конденсата выпарных аппаратов используется в основном для подогрева исходного сиропа, надо учитывать специфику нагреваемого раствора, а именно склонность к образованию отложений на стенках теплообменных аппаратов, особенно на первых ступенях подогрева, при более низких температурах раствора. Так как уменьшение температурного напора влечет за собой увеличение поверхности теплообмена и, следовательно, уменьшение скорости потока сахарного сиропа, происходит снижение уровня касательных напряжений на стенке пластины, что приводит к увеличению вероятности появления отложений на теплопередающей поверхности.

Решение задачи проектирования системы теплообменных аппаратов перед выпариванием осложняется тем, что главным препятствием для надежного их функционирования в течение сезона сахароварения, является загрязнение поверхности теплообмена пластинчатых подогревателей, приводящее к увеличению потерь давления сахарного сиропа, проходящего через подогреватели. Последнее обстоятельство приводит к росту потребляемой мощности насосного

оборудования. В результате возникает необходимость в остановке работы аппаратов на их

чистку с полной разборкой.

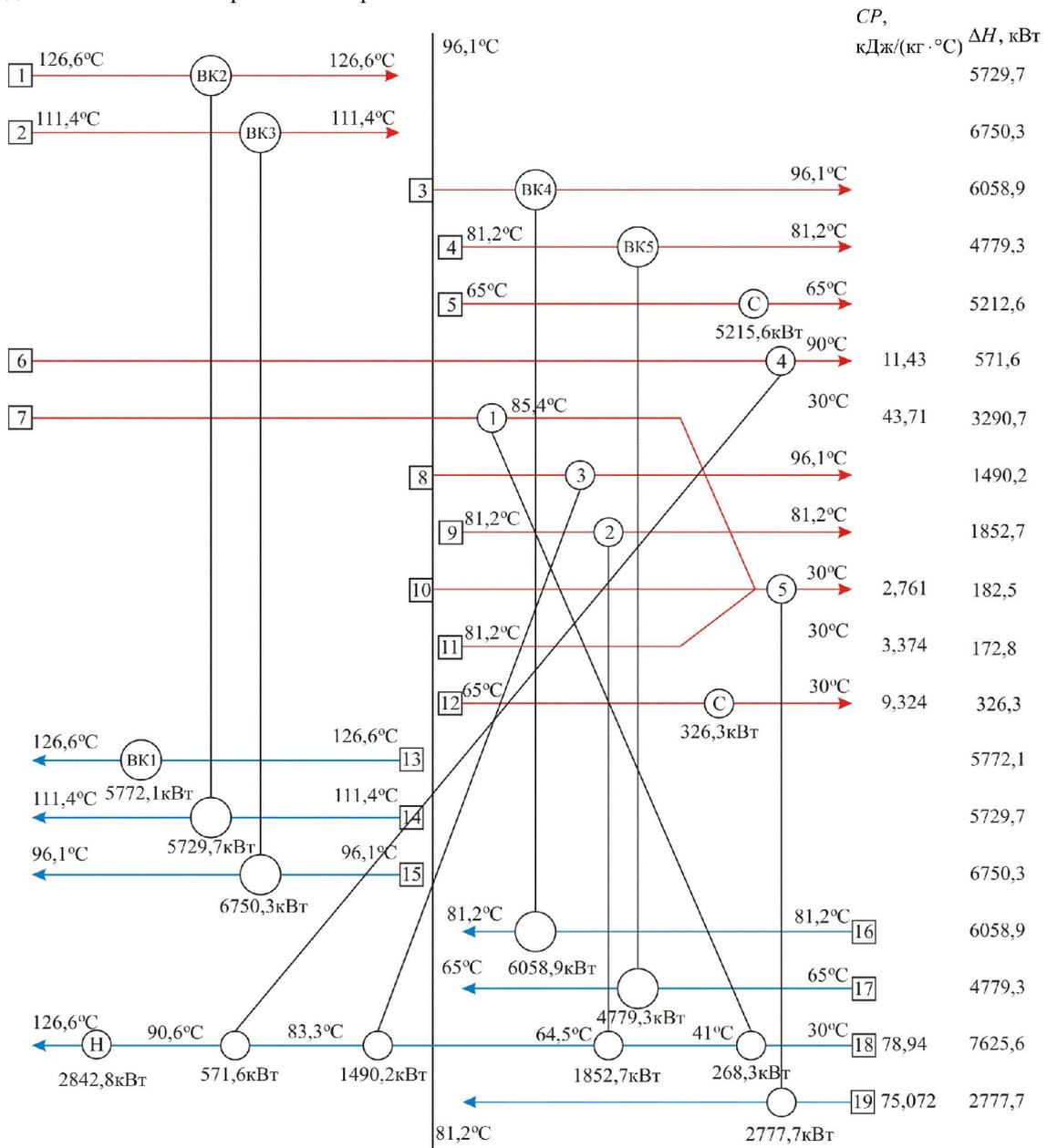


Рис. 3. Сеточная диаграмма процесса до модернизации

На рис. 4 изображены составные кривые процесса для  $\Delta T_{\min} = 5^\circ\text{C}$ . Для данного значения определены целевые значения требуемой мощности горячих утилит (пара) – 7670,5 кВт и мощности холодных утилит (охлаждающей воды) – 4595,2 кВт. Температура пинча холодных потоков равна  $91,1^\circ\text{C}$ , а горячих –  $96,1^\circ\text{C}$ . В соответствии с основными правилами пинч-технологии, а именно  $CP_{out} \geq CP_{in}$  и  $N_{out} \geq N_{in}$  были размещены теплообменники. При этом следует отметить, что расстановка теплообменников в области выше пинча не вызывает сомнений, так как является однозначной. Для расщепленного потока исходной смеси на два потока есть два горячих потока, соединение с которыми, удовлетворяет их на входе в пинч.

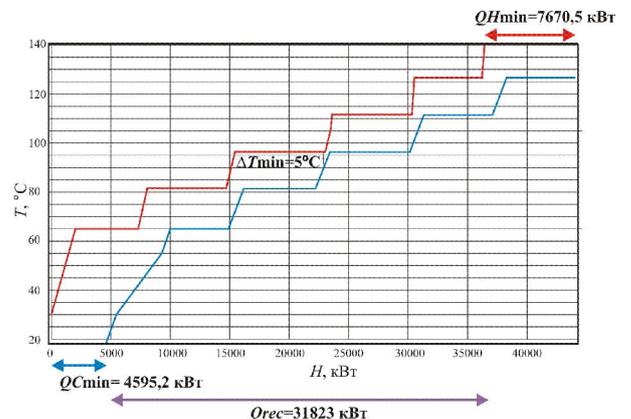


Рис. 4. Составные кривые процесса для  $\Delta T_{\min} = 5^\circ\text{C}$ : 1 – горячих потоков, 2 – холодных потоков

Нижче пінча були рассмотрены несколько вариантов размещения теплообменников, из которых в результате был выбран наиболее рациональный из соображения технологии процесса

и минимизации количества теплообменных аппаратов. Сеточная диаграмма разработанного проекта представлена на рис. 5

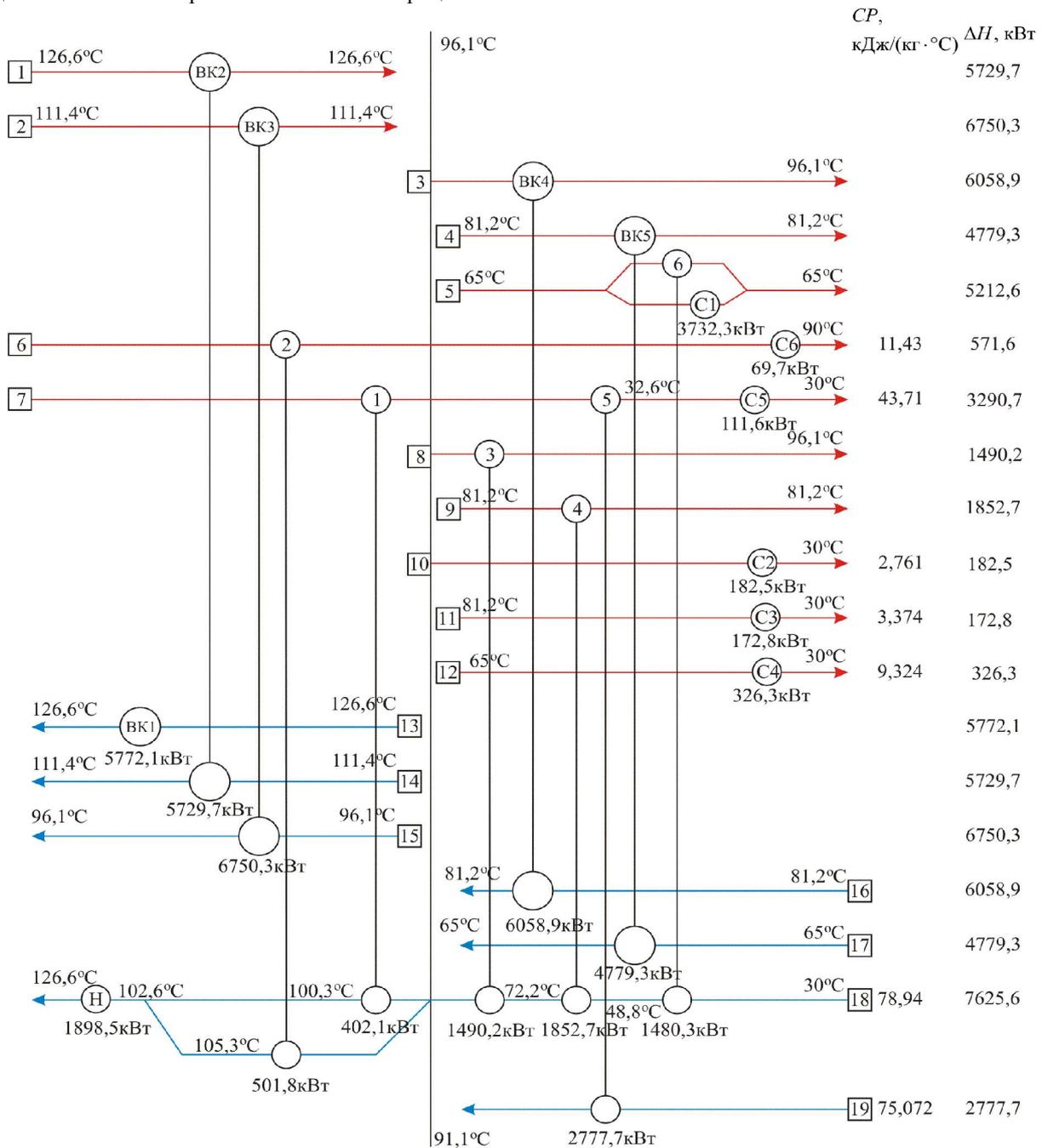


Рис. 5. Сеточная диаграмма процесса после модернизации

Анализ сеточной диаграммы показывает, что нет необходимости доохлаждения конденсата ретурного пара, так как его возврат должен быть не ниже 90 °С. Охлаждение смеси конденсатов вторичных паров соответствует температурным пределам для накопления в емкости сбора. Кроме того, потоки конденсата экстрапаров третьего и четвертого корпусов и вторичного пара пятого корпуса могут быть объединены в один поток и

доведены до целевой температуры в одном теплообменном аппарате.

На рис. 6 изображена принципиальная схема выпарной станции после модернизации.

Для установки было подобраны разборные пластинчатые теплообменники [13] фирмы Alfa Laval, в том числе специальный конденсатор паров низкого давления типа AlfaCond. В таблице 2 указаны их характеристики.

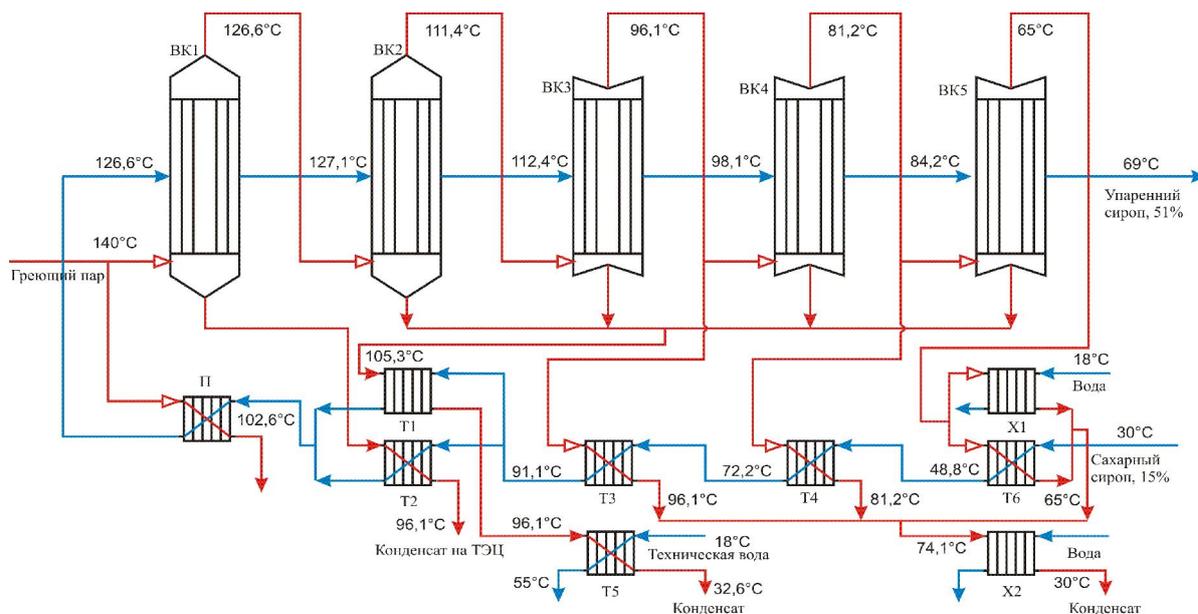


Рис. 6. Схема выпарной станции упаривания сахарного сиропа до модернизации

Таблица 2 – Выбранное теплообменное оборудование

Позиция	Тип пластины	Число пластин	Поверхность теплопередачи (м <sup>2</sup> )
PT1	M6	45	6,5
PT2	M6	75	11
PT3	M15M	66	39,7
PT4	M15M	72	43,4
PT5	M10B	87	20,4
PT6	M15M	88	53,32
П	M10M	64	13,6
X1	AlfaCond 600	68	46,2
X2	M6	45	6,45

### Выводы.

Предложенный вариант модернизации существующей схемы выпарной станции дает снижение потребления мощности горячих утилит (пара) с 8614,8 кВт до 7670,5 кВт, а мощности холодных утилит (охлаждающей воды) – с 5538,9 кВт до 4413,9 кВт с учетом принятых решений.

Срок окупаемости данного проекта составляет примерно полтора года.

### Список литературы

1. Кравчук А.Ф. Технико-экономическая оценка работы выпарной установки сахарного завода / А.Ф. Кравчук, Б.А. Еременко // Цукор України. – 2003. – 34, № 4–5. – С. 33–35.
2. Болдырев С.А. Методы энергосбережения в сахарной промышленности (обзор) / С.А. Болдырев // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2007. – №2. – С. 28–33.
3. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов: Библиотека журнала ИТЭ / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянский, [и др.]. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – 458 с.
4. Голыбин В.А. Пути повышения энергоэффективности сахарного производства / В.А. Голыбин, В.А. Федорук, М.А. Лавренова, Е.А. Денисова // Вестник ВГУИТ. – 2014. – №1. – С. 185–190.
5. Громковский А.А. Влияние распределения теплопотребителей и эффекта самоиспарения на расход пара многокорпусной выпарной установки сахарного завода / А.А. Громковский // Вестник ВГУИТ. – 2016. – №2. – С. 233–237.

6. Нечипоренко Д.И. К вопросу энергосбережения при выпаривании растворов // Д.И. Нечипоренко, В.С. Фокин, Е.Д. Пономаренко, С.Д. Нечипоренко // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2005. – №4. – С. 42–47.
7. Madaeni S.S. Energy consumption for sugar manufacturing. Part I: Evaporation versus reverse osmosis / S.S. Madaeni, S. Zereszki // Chemical Engineering Processing: Process Intensification. – 2008. – 47. – P. 1075–1080.
8. Gul S. Energy Saving in Sugar Manufacturing with the Implementation of a new Membrane Process / S. Gul, M. Harasek // Applied Thermal Engineering. – 2011. – 43. – P. 128–133.
9. Jensen A.J. Energy and environment in beet sugar production / F.J. Jensen, B. Morin // ESST Proceeding Reims, 2015. – 10 p.
10. Mushiri T. To Design and Implement a Reliable Sugar Evaporation Control System that will Work in an Energy Saving Way / T. Mushiri, C. Mbohwa // Proceedings of the World Congress on Engineering. – 2015. – Vol I. – WCE 2015, July 1 - 3, 2015, London, U.K. – P. 235-241.
11. Товажнянський Л. Л. Процеси та апарати хімічної технології: Підручник у двох книгах. Кн. 2 / Л. Л. Товажнянський, А. П. Готлінська, В. О. Леценко [та ін.]. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – 538 с.
12. Каталог оборудования «Альфа Лаваль». [Электронный ресурс]. – [http://planetaklimata.com.ua/instr/Alfa\\_Laval\\_catalog\\_2016\\_Rus.pdf](http://planetaklimata.com.ua/instr/Alfa_Laval_catalog_2016_Rus.pdf)

### References(transliterated)

1. Kravchuk A.F. Tehniko-jekonomicheskaja ocenka raboty vyparnoj ustanovki saharnogo zavoda [Technical and economic assessment of works of evaporating installation of sugar factory] / A.F. Kravchuk, B.A. Eremenko // Cukor Ukraini. – 2003. – 34, № 4–5. – P. 33–35.
2. Boldyrev S.A. Metody jenergosberezhenija v saharnoj promyshlennosti [Power savings methods in a sugar industry] (obzor) / S.A. Boldyrev // Integrirovannye tehnologii i jenergosberezhenie. – 2007. – №2. – P. 28–33.
3. Smit R. Osnovy integracii teplovyh processov [Basics integration of thermal processes]: Biblioteka zhurnala ITJe / R. Smit, J. Klemesh, L.L. Tovazhnjanskij, [i dr.]. – Har'kov.: NTU «HPI», 2000. – 458 p.
4. Golybin V.A. Puti povyshenija jenergojefektivnosti saharnogo proizvodstva [Ways of increase of power efficiency of sugar manufacture] / V.A. Golybin, V.A. Fedoruk, M.A. Lavrenova, E.A. Denisova // Vestnik VGUIT. – 2014. – №1. – P. 185–190.
5. Gromkovskij A.A. Vlijanie raspredelenija teplopetrebitelej i jeffekta samoisparenija na rashod para mnogokorpusnoj vyparnoj ustanovki saharnogo zavoda [Distribution influence warmly

- consumers of heat and effect of self-evaporation on the expense of steam of multistage evaporating installation of sugar factory] / *A.A. Gromkovskij* // *Vestnik VGUIT*. – 2016. – №2. – P. 233–237.
6. *Nechiporenko D.I.* К вопросу jenergoberezenija pri vyparivanii rastvorov [To power savings question at evaporation of solutions] // *D.I. Nechiporenko, V.S. Fokin, E.D. Ponomarenko, S.D. Nechiporenko* // *Integrirovannye tehnologii i jenergoberezenie*. – 2005. – №4. – P. 42–47.
  7. *Madaeni S.S.* Energy consumption for sugar manufacturing. Part I: Evaporation versus reverse osmosis / *S.S. Madaeni, S. Zereshki* // *Chemical Engineering Processing: Process Intensification*. – 2008. – 47. – P. 1075–1080.
  8. *Gul S.* Energy Saving in Sugar Manufacturing with the Implementation of a new Membrane Process / *S. Gul, M. Harasek* // *Applied Thermal Engineering*. – 2011. – 43. – P. 128–133.
  9. *Jensen A.J.* Energy and environment in beet sugar production / *F.J. Jensen, B. Morin* // *ESST Proceeding Reims*, 2015. – 10 p.
  10. *Mushiri T.* To Design and Implement a Reliable Sugar Evaporation Control System that will Work in an Energy Saving Way / *T. Mushiri, C. Mbohwa* // *Proceedings of the World Congress on Engineering*. – 2015. – Vol I. – WCE 2015, July 1 - 3, 2015, London, U.K. – P. 235-241.
  11. *Tovazhnyans'kyj L. L.* Protsezy ta aparaty khimichnoyi tekhnolohiyi [Processes and devices of chemical technology]: Pidruchnyk u dvokh knykhakh. Kn. 2 / *L. L. Tovazhnyans'kyj, A. P. Hotlins'ka, V. O. Leshchenko* [ta in.] – Kharkiv: NTU «KhPI», 2007. – 538 p.
  12. Katalog oborudovanija «Al'fa Laval». [Elektronnij resurs]. – [http://planetaklimata.com.ua/instr/Alfa\\_Laval\\_cata\\_log\\_2016\\_Rus.pdf](http://planetaklimata.com.ua/instr/Alfa_Laval_cata_log_2016_Rus.pdf)

Поступила (received) 06.05.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Підвищення енергоефективності станції упарювання цукрового сиропу / Т. Г. Бабак, О. О. Голубкіна, Д. С. Король, Є. Д. Пономаренко** // Вісник НТУ «ХПІ». – X : НТУ «ХПІ», 2017. – № 18 (1240). – С. 46–52. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2220-4784.

**Повышение энергоэффективности станции упаривания сахарного сиропа / Т. Г. Бабак, О. А. Голубкіна, Д. С. Король, Е. Д. Пономаренко** // Вісник НТУ «ХПІ». – X : НТУ «ХПІ», 2017. – № 18 (1240). – С. 46–52. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2220-4784.

**Energy efficiency increasing of sugar syrup evaporation plant / T. G. Babak, O. A. Holubkina, D. S. Korol, E. D. Ponomarenko** // *Bulletin of NTU «KhPI»*. Series: Innovation researches in students' scientific work. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – № 18 (1240). – P. 46–52. – Bibliogr.: 12 titles. – ISSN 2220-4784.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Бабак Тетяна Геннадіївна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Інтегрованих технологій, процесів і апаратів; тел.: +380505669654; e-mail: : [tgbabak@gmail.com](mailto:tgbabak@gmail.com).

**Бабак Татьяна Геннадиевна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Интегрированных технологий, процессов и аппаратов; тел.: +380505669654; e-mail: [tgbabak@gmail.com](mailto:tgbabak@gmail.com).

**Babak Tatyana Gennadyevna** – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», an assistant professor of integrated technologies, processes and devices; tel: +380505669654; e-mail: : [tgbabak@gmail.com](mailto:tgbabak@gmail.com).

**Голубкіна Ольга Олександрівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри Інтегрованих технологій, процесів і апаратів; тел.: +380977133599; e-mail: [oalgolubkina@gmail.com](mailto:oalgolubkina@gmail.com).

**Голубкина Ольга Александровна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры Интегрированных технологий, процессов и аппаратов; тел.: +380977133599; e-mail: [oalgolubkina@gmail.com](mailto:oalgolubkina@gmail.com).

**Holubkina Olga Aleksandrovna** – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», a senior lecturer in integrated technologies, processes and devices; tel.: +380977133599; e-mail: [oalgolubkina@gmail.com](mailto:oalgolubkina@gmail.com)

**Король Дмитро Сергійович** – спеціаліст, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: +380661236347; e-mail: [korol\\_diman@mail.ru](mailto:korol_diman@mail.ru).

**Король Дмитрий Сергеевич** – специалист, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: +380661236347; e-mail: [korol\\_diman@mail.ru](mailto:korol_diman@mail.ru).

**Korol Dmitriy Sergeevich** – specialist, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: +380661236347; e-mail: [korol\\_diman@mail.ru](mailto:korol_diman@mail.ru).

**Пономаренко Євгенія Дмитрівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Інтегрованих технологій, процесів і апаратів; тел.: +380681185532; e-mail: [yevgeniya.ponomarenko@gmail.com](mailto:yevgeniya.ponomarenko@gmail.com)

**Пономаренко Евгения Дмитриевна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Интегрированных технологий, процессов и аппаратов; тел.: +380681185532; e-mail: [yevgeniya.ponomarenko@gmail.com](mailto:yevgeniya.ponomarenko@gmail.com)

**Ponomarenko Evgeniya Dmitrievna** – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», an assistant professor of integrated technologies, processes and devices; tel.: +380681185532; e-mail: [yevgeniya.ponomarenko@gmail.com](mailto:yevgeniya.ponomarenko@gmail.com).