

УДК 536.24

Развитие энергоиспользования линий непрерывного крашения на предприятиях легкой промышленности

В. Н. Романюк¹⁾, Д. Б. Муслина¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2015
Belarusian National Technical University, 2015

Реферат. Определены и показаны изменения энергопотребления в результате утилизации низкотемпературных побочных потоков растворов широко используемых линий непрерывного крашения на отделочных производствах предприятий легкой промышленности Беларуси. Утилизация осуществляется за счет привлечения абсорбционных бромистолитиевых тепловых насосов с различными энергетическими характеристиками, которыми являются отопительный коэффициент (коэффициент преобразования $COP_{hp} = 1,15; 1,7; 2,2$) и тепловая мощность. Последняя связана с вариантом энергоиспользования преобразованного теплового потока со схемой системы нагрева теплоносителя (одно-, двух- и многоступенчатый нагрев). Рассмотрен переход на неприменяемый ранее предварительный подогрев технической воды, связанный с технологически допустимой возможностью ее подачи в красильный аппарат с более высокой температурой и расширением перечня используемых теплоносителей. Даны варианты внутреннего и внешнего энергоиспользования и их оценка на базе относительных энергетических и эксергетических характеристик. Результаты термодинамического анализа эффективности работы модернизированного производства показали, что наряду с традиционным и очевидным внутренним энергоиспользованием, связанным с рекуперацией теплоты потоков, целесообразно расширение ряда применяемых теплоносителей, возможен переход к предварительному двух- и многоступенчатому нагреву технической воды. Доказано, что крайне низкие показатели существующего энергообеспечения, величина которых обусловлена в том числе конструкцией агрегатов, традиционным подходом к энергообеспечению и использованию теплоносителей, наконец, всей теплоэнергетической системой предприятия (отвечающей требованиям ушедшего периода дешевых энергоресурсов), улучшаются на один-два порядка. Рассмотрены варианты модернизации линии крашения, предполагающие значительные инвестиции. Предварительная экономическая оценка вариантов такой неизбежной модернизации теплоэнергетической системы предприятия показала реальность выполнения всех современных требований к подобным проектам: экономических, экологических, энергетических.

Ключевые слова: эксергия текстильных материалов, эксергетический вход, эксергетический выход, утилизация, побочные тепловые потоки, тепловые насосы

Для цитирования: Романюк, В. Н. Развитие энергоиспользования линий непрерывного крашения на предприятиях легкой промышленности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 6, с. 41–54

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Energy Recovery for Continuous Dyeing Process in Textile Industry Enterprises

V. N. Romaniuk¹⁾, D. B. Muslina¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper ascertains and presents alteration in the energy consumption as a consequence of utilizing the low-temperature waste streams commonly used in the lines of continuous dyeing at the finishing shops of textile enterprises of Belarus. The utilization realizes through the engagement of lithium-bromide absorption heat pumps with various energy characteristics such as the heating coefficient (relative conversion ratio $COP_{hp} = 1,15; 1,7; 2,2$) and the heating capacity. The latter associates with the converted heat-flow energy utilization variant with the heat-transfer medium heating system scheme (one-, two- and multistage heating). The article considers transition to previously not applied service-water preheating due to the technological acceptance of feeding higher temperature water into the dyeing machine and widening specification of the heat-transfer media. The authors adduce variants of internal and external energy use and their evaluation based on the relative energy and exergy characteristics. With results of the thermodynamic analysis of the modernized production effectiveness the researchers prove that alongside with traditional and apparent interior utilization of the energy associated with the stream heat recuperation, it is advisable to widen the range of applied heat-transfer media. The transition to the service water two- and multi-stage preheating is feasible. The study shows that the existing energy supply efficiency extremely low index-numbers improve by one or two degrees. Since they are conditioned, inter alia, by the machinery design, traditional approach to energy supply and heat-medium usage as well as the enterprise whole heating system answering requirements of the bygone era of cheap energy resources. The authors examine the continuous dyeing line modernization options intending considerable investments. Preliminary economic assessment of such inevitable modernization options for the enterprise entire heat-and-power system shows reality of meeting all going with the times requirements such as economic, environmental, energy for similar projects.

Keywords: exergy of textile materials, exergy input, exergy output, utilization, waste heat streams, heat pumps

For citation: Romaniuk V. N., & Muslina D. B. Energy Recovery for Continuous Dyeing Process in Textile Industry Enterprises. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2015. No 6, pp. 41–54 (in Russian)

Введение

Всесторонний анализ энергообеспечения характерных для белорусских предприятий легкой промышленности линий непрерывного крашения отделочных производств проведен в [1–3]. Рассмотрены пути улучшения ситуации за счет реализации простой рекуперации тепловых потоков с использованием различных теплообменных аппаратов. Дальнейшее углубление утилизации побочных тепловых потоков связано с переходом к использованию низкотемпературных ($t < 45$ °С) потоков, в большом количестве сопровождающих теплотехнологию крашения отделочных производств. Для утилизации обозначенных потоков возможно применение пароконденсационных тепловых насосов (ПКТН) или абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (АБТН). В связи с этим необходимо определить и выбрать типоразмеры теплонасосных установок (ТНУ) и вариантов их применения в отделочном производстве.

Состояние проблемы

Из данных [1–3] следует, что уровень и текущее состояние энергоиспользования линий крашения отделочных производств предприятий легкой промышленности неудовлетворительны, не отвечают изменившейся ситуации на рынке энергоносителей, когда тарифы на электро- и тепловую энергию выросли на два порядка. Это, как известно, определило тяжелое финансовое положение рассматриваемых предприятий. Необходимы экстренные меры по снижению себестоимости их продукции. В условиях, когда сырье закупается на внешних рынках, остаются два пути уменьшения себестоимости: снижение уровня благосостояния работников или сокращение затрат на энергообеспечение предприятий. Естественно, приоритет за последним направлением. Среди достаточно многочисленных решений задачи снижения энергозатрат и улучшения финансового положения предприятий отрасли представляют интерес развитие и углубление утилизации побочных тепловых потоков основного производства, что имеет приоритет даже перед таким результативным путем энергосбережения, как энерготехнологическая полигенерация [4]. Это можно объяснить при системном подходе к рассмотрению проблемы с проекцией результатов на энергобаланс страны. С вводом в строй АЭС в энергосистеме Беларуси появляется чрезвычайно важная и сложная задача регулирования мощности из-за несовпадения структуры энергопотребления хозяйственного комплекса и структуры генерации потоков тепловой и электрической энергии генерирующих мощностей энергосистемы, их типоразмеров и технических возможностей. В этом контексте важны любые шаги предприятий хозяйственного комплекса по требуемому изменению структуры потребления энергопотоков и углублению утилизации тепловой энергии. В рамках решения обозначенной задачи находится предлагаемая утилизация побочных потоков, что имеет экологический эффект снижения выбросов в окружающую среду вредных ингредиентов. Для предприятий более важно то обстоятельство, что данное направление энергосбережения одновременно решает задачу улучшения их финансового положения.

Сравнение вариантов использования ПКТН и АБТН

Утилизационные тепловые насосы переживают пик развития, что обусловлено их востребованностью в настоящее время. Известно, что АБТН, несмотря на свою достаточно низкую энергетическую эффективность ($COP_{hp} = 1,2-2,2$ для АБТН против $COP_{hp} = 1,8-5,5$ для ПКТН), оказываются более удобными в эксплуатации, надежными и, наконец, экономически более эффективными. Это связано с различием в энергоресурсах, требуемых для работы ПКТН и АБТН, и соотношением тарифов в стране на используемые энергоносители для ТНУ (рис. 1).

Кроме отмеченных различий, важно другое существенное обстоятельство при использовании ТНУ в энергообеспечении теплотехнологий, заключающееся в уровне максимальных температур, до которого может быть нагрет поток, направленный к потребителю. В АБТН максимальная темпе-

ратура находится на уровне 85 °С, а в ПКТН эта температура зависит и от свойств применяемых хладагентов. В основном в качестве последних используются различные фреоны, для которых предельная температура нагрева сетевой воды составляет 55–60–70 °С [5–13]. Однако при использовании диоксида углерода (R744) в качестве рабочего тела возможно достижение температур до 130 °С, но стоимость этих ПКТН в разы превышает фреоновые агрегаты [6–9].

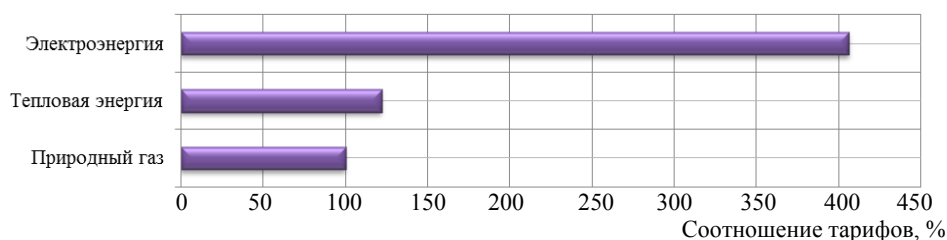


Рис. 1. Соотношение тарифов на основные энергоресурсы для промпредприятий Беларуси

Fig. 1. Correlation of the major energy resources tariffs for the industrial enterprises in Belarus

При использовании ТНУ в составе теплоэнергетической системы существующих отделочных производств со сложившимися компоновочными решениями необходимо учитывать ограниченность доступа к побочным потокам. В местах, где возможен отбор потока, его температура находится в пределах 50 °С. Для реализации максимального потенциала в ТНУ необходимо охладить поток до 20 °С. Это обстоятельство ограничивает как температуру нагреваемого потока, так и значение отопительного коэффициента (рис. 2).

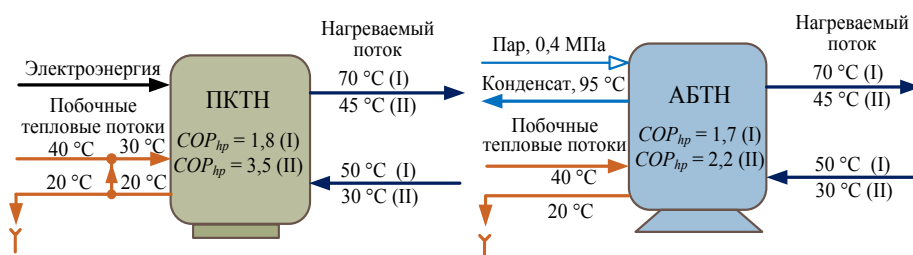


Рис. 2. Основные сравнительные характеристики ПКТН и АБТН

Fig. 2. The main comparative characteristics of vapor compression heat pumps (VCHP) and absorption heat pumps (AHP)

Для выбора типа ТНУ в качестве целевой функции принят расход условного топлива в поле экономических ограничений: сроки возврата инвестиций, IRR, NPV и др. Как аргументы используются типоразмер ТНУ, COP_{ph} , требуемый температурный график сетевой воды. Результаты приведены на рис 3, 4. Температура утилизируемых стоков в случае АБТН может снижаться на 10–20 °С до конечной температуры 15–20 °С, в случае ПКТН эта величина составляет 5–10 °С. Иные перепады температур могут

быть обеспечены с помощью перепускных потоков (рис. 2). Такая же ситуация имеет место и в отношении сетевой воды.

В существующих условиях удельный расход условного топлива (УРТ) на теплоту процесса нагрева сетевой воды и на генерацию пара давлением 0,5 МПа принимали 0,0382 т/ГДж (0,160 т/Гкал), УРТ на генерацию электроэнергии от КЭС – 0,336 т/(МВт·ч), тариф на покупку природного газа для промышленных предприятий – 3811667 руб./тыс. м³ на 07.2015. Из полученных сравнений вытекает целесообразность применения АБТН.

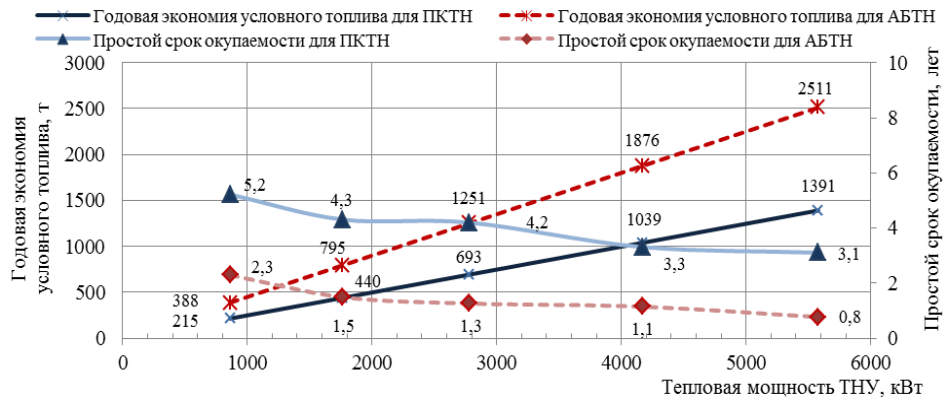


Рис. 3. Сроки возврата инвестиций для наиболее характерных брендов ПКТН с $COP_{hp} = 3,5$ и АБТН с $COP_{hp} = 2,2$ и 6,0 тыс. ч работы с номинальной мощностью при температурах нагреваемого потока 45/30 °С

Fig. 3. The investment return periods for most typical brands of VCHP with $COP_{hp} = 3,5$ and ABHP with $COP_{hp} = 2,2$, with annual 6,0 thousand operation hours at nominal capacity and generated heat flows temperature 45/30 °С

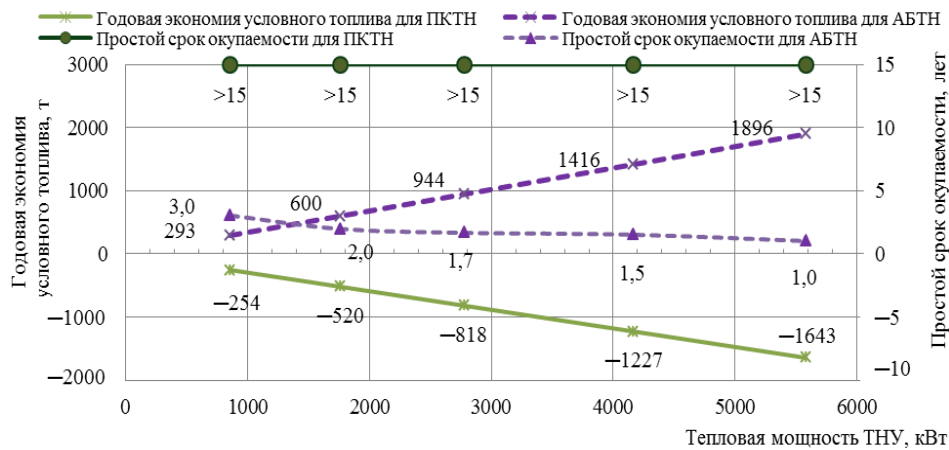


Рис. 4. Сроки возврата инвестиций для наиболее характерных брендов ПКТН с $COP_{hp} = 1,8$ и АБТН с $COP_{hp} = 1,7$ и 6,0 тыс. ч работы с номинальной мощностью при температурах нагреваемого потока 70/50 °С

Fig. 4. The investment return periods for most typical brands of VCHP with $COP_{hp} = 1,8$ and ABHP with $COP_{hp} = 1,7$, with annual 6,0 thousand operation hours at nominal capacity and generated heat flows temperature 70/50 °С

Использование АБТН в составе теплоэнергетической системы предприятий легкой промышленности и сопряженного промузла

Среди многообразия подходов к утилизации низкотемпературных потоков линии непрерывного крашения выбрали предварительный нагрев технической воды перед подачей непосредственно в красильный аппарат по двум схемам. Первая ориентирована на использование теплового потока АБТН внутри теплотехнологии крашения, вторая – на внутреннюю и внешнюю утилизацию теплового потока АБТН. В обеих схемах рассматриваются два варианта: одно- и двухступенчатого предварительного нагрева поступающего технологического потока.

Использование утилизируемого потока в пределах технологического потребления линий непрерывного крашения

Принципиальная схема составов теплотехнологических систем для расчета эксергетических показателей процесса энергообеспечения при внутренней утилизации (рекуперации) приведена на рис. 5.

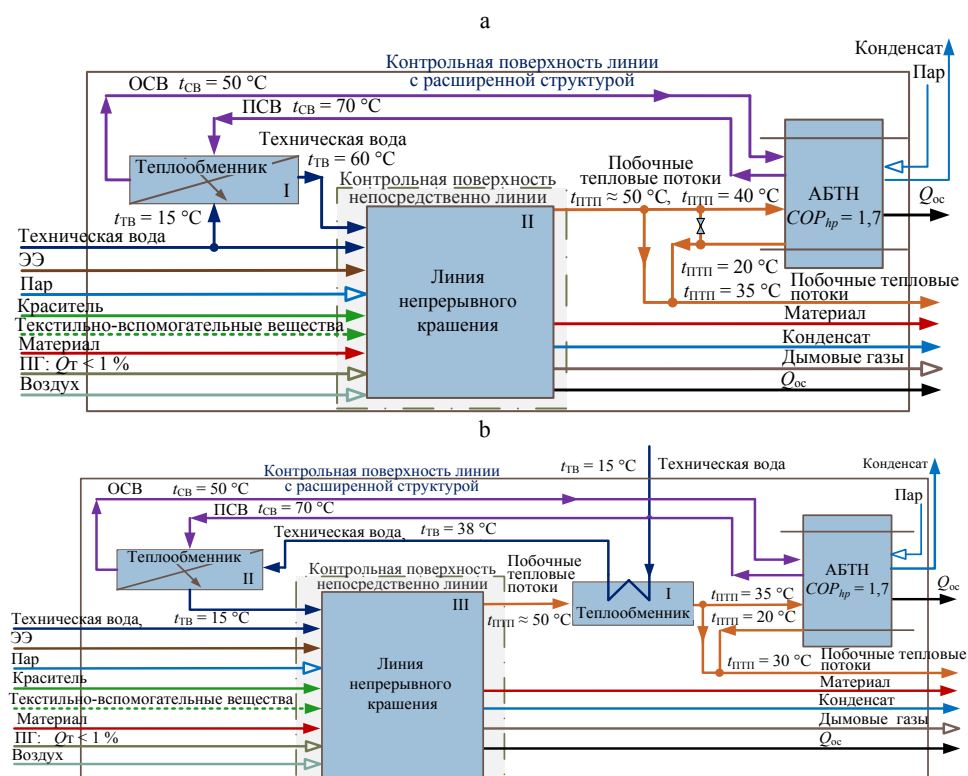


Рис. 5. Схемы составов теплотехнологических систем для расчета эксергетических показателей процесса энергообеспечения при внутренней утилизации (рекуперации): а – одноступенчатая рекуперация после модернизации с установкой АБТН; б – двухступенчатая рекуперация после модернизации с установкой АБТН и теплообменного оборудования

Fig. 5. Process flow diagrams of heat technology systems for evaluating exergetic efficiency of the energy supply process with inner utilizing (recuperation): а – single-stage recovery after modernization with ABHP installation; б – two-stage recovery after modernization with ABHP and heat-exchange equipment installation

Для одноступенчатой рекуперации проведены расчеты влияния параметров потоков на экономию тепловой энергии, глубину утилизации тепловой энергии побочных потоков (температура стоков, поступающих в канализацию), требуемые инвестиции и простой срок их возврата в зависимости от значения энергетического КПД АБТН, который изменялся в пределах $COP_{hp} = 1,2-2,2$. Температура нагрева технической воды перед поступлением в аппарат принята максимально допустимой по техническим условиям. Пределы изменений устанавливались в связи с характеристиками АБТН двух изготовителей: китайской BROAD и индийской Thermax корпораций (рис. 6).

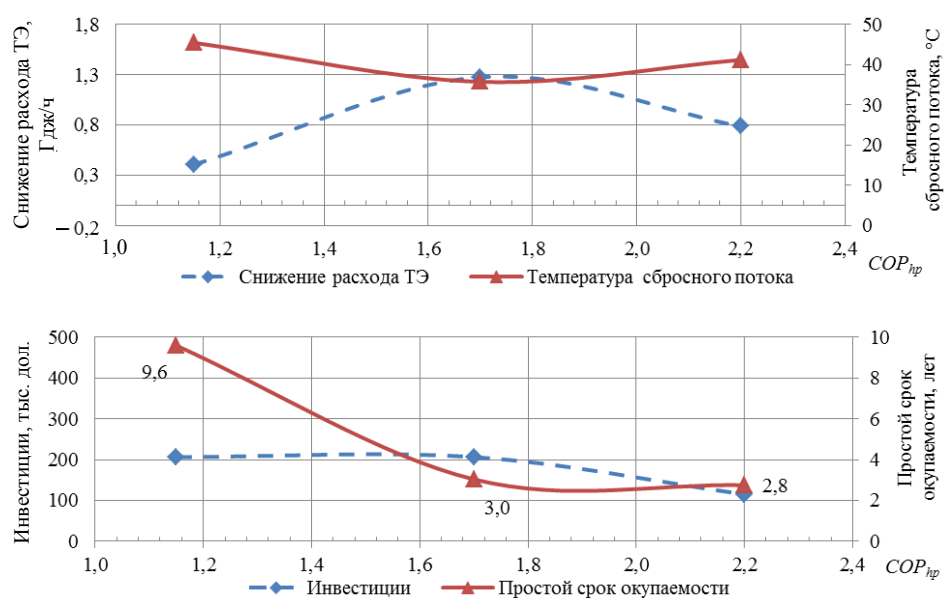


Рис. 6. Изменение показателей одноступенчатого варианта рекуперации в зависимости от энергетического КПД АБТН

Fig. 6. The single-stage recovery variant parameters alteration in terms of the ABHP energy efficiency

В случае одноступенчатого нагрева входного потока технической воды максимальная экономия тепловой энергии при практически равных инвестициях и сроке их возврата на уровне трех лет достигается с использованием АБТН с $COP_{hp} \approx 1,7$. Принятые условия во всех случаях не обеспечивают высокую глубину утилизации побочных потоков (температура стоков понижается до 38 °C), что связано с отсутствием потребления внутри теплотехнологии потока всей теплоты от АБТН. Величина последнего может быть уменьшена при переходе к двухступенчатой схеме предварительного нагрева входного потока. Для двухступенчатой схемы рекуперации результаты приведены на рис. 7.

При отопительном коэффициенте 2,2 температура нагреваемого в АБТН потока, исходя из характеристик насоса, не может превышать 35 °C,

что ниже температуры потока после 1-й ступени нагрева технической воды, равной 38 °С. Поэтому диапазон изменения отопительного коэффициента здесь сужен, и с АБТН, имеющим $COP_{hp} \approx 2,2$, схема не реализуется из-за отсутствия нагрузки для 2-й ступени. В данной схеме надо ориентироваться на АБТН с $COP_{hp} \approx 1,7$ при охлаждении стоков до температуры 30 °С.

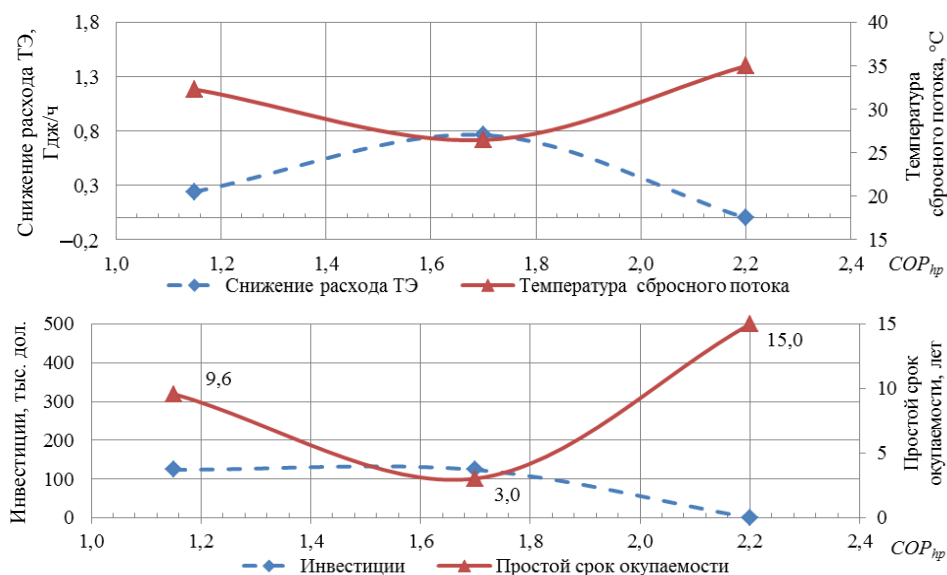


Рис. 7. Изменение показателей в зависимости от энергетического КПД АБТН для двухступенчатого варианта рекуперации

Fig. 7. Parameters alteration according to the ABTP energy efficiency for the two-stage recovery variant

Показатели термодинамического анализа обеих схем рекуперации приведены в табл. 1. Использованные характеристики для оценки эффективности варианта рассматривались ранее при анализе модернизации тепловой схемы линии непрерывного крашения без привлечения АБТН [14].

Таблица 1

Основные показатели по вариантам модернизации при многоступенчатом подогреве за счет ввода АБТН
Major parameters by the variants of modernization with multistage heating owing to the ABTP introduction

Наименование показателя	Обозначение	Положение				
		Существующее	Рекуперация на базе АБТН			
			одноступенчатая		двухступенчатая	
1	2	3	только линии*	линии с расширенной структурой*	только линии*	линии с расширенной структурой*
4	5	6	7			
Эксергетический вход, МДж/ч	$\sum E^i$	21776	21027	21419	21027	21197
Транзитная эксергия, МДж/ч	$\sum E^{tr}$	18517	18527	18471	18527	18443
Располагаемая эксергия, МДж/ч	$E_{расп}$	3259	2500	2948	2500	2754

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Полезная эксергия, МДж/ч	$E_{исп}$	4	4	4	4	4
Эксергетический выход, МДж/ч	$\sum E^i$	18520	18531	18475	18531	18447
Внешние потери эксергии ТС, МДж/ч	$\sum D_e$	706	581	581	581	581
Внутренние потери эксергии в ТС, МДж/ч	$\sum D_i$	2549	1915	2363	1915	2169
Энергетический КПД, %	$\eta_э$	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0
Степень термодинамического совершенства технической системы, %	ν	85,0	88,1	86,3	88,1	87,0
Термодинамический КПД, %	η_e	0,112	0,145	0,124	0,145	0,132
Степень технологического совершенства, %	β	15,0	11,9	13,8	11,9	13,0
Степень полного совершенства технической системы, %	μ	0,0167	0,0172	0,0170	0,0172	0,0172
Эксергетический КПД = $= \nabla E_{пол} / \nabla E_{зат}$, %	η_e^{**}	0,20	0,27	0,22	0,27	0,24
Удельные затраты энергии на тонну материала с учетом электроэнергии, ГДж/т	q	10,2	7,0	8,9	7,0	8,1
Удельные затраты эксергии на тонну материала, ГДж/т	e	2,9	2,1	2,6	2,1	2,4
Годовая экономия условного топлива, т	ΔB	–	290		476	
Простой срок возврата инвестиций, лет	τ	–	3,0		1,5	
* Пояснения линии расширенной структуры обеих схем (рис. 5).						
** Эксергетический КПД, определяемый по принятым полезным эффектам и затратам эксергии [15].						

Из анализа результатов следует, что рекуперация повышает термодинамическую эффективность энергообеспечения линии и снижает потребление энергоресурсов в поле всех экономических ограничений. В двухступенчатом варианте рекуперации тепловой энергии результирующие показатели оказываются выше: прежде всего, годовая экономия условного топлива превышает одноступенчатый вариант на 186 т у. т., или на 65 %. В масштабах отрасли для крупных отделочных производств это равносильно годовой экономии ТЭР порядка 5–7 тыс. т у. т., или 4–6 млн м³ природного газа в год.

Смешанное использование энергии утилизируемого потока

Принципиальная схема использования теплоты побочных потоков – как внутри теплотехнологии, так и внешними потребителями – приведена на рис. 8. Схема реализуема при наличии внешних по отношению к линии крашения потребителей тепловой энергии. В этом случае целесообразно совместить рекуперацию теплоты с отпуском избытков тепловой энергии на сторону, что углубляет утилизацию энергии низкотемпературных побочных потоков, обеспечивая их охлаждение до 20 °С. Внешние потребители тепловой энергии могут быть как внутри предприятия (другие производства, кондиционирование, отопление), так и сопряженного промузла, либо системы коммунального теплоснабжения. На рис. 8 показаны те же

варианты нагрева потоков, что и в случае внутреннего теплоиспользования потоков: одно- и двухступенчатая утилизация.

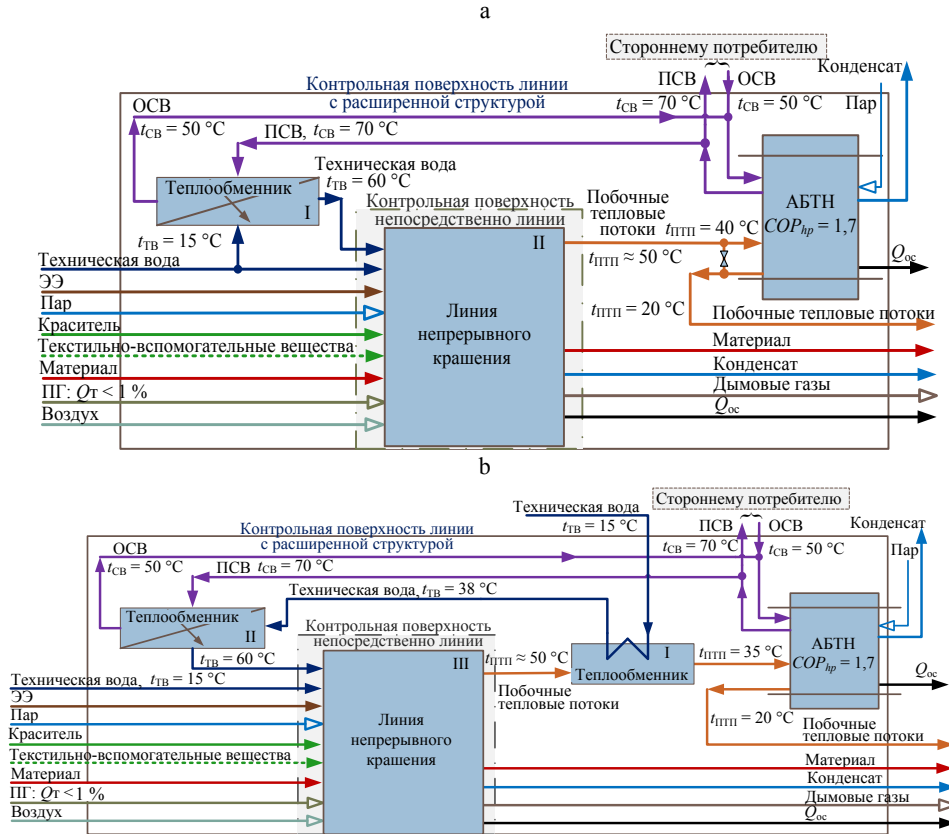


Рис. 8. Схемы составов теплотехнологических систем при отпуске избытков тепловой энергии стороннему потребителю для расчета эксергетических показателей процесса энергообеспечения: а – положение после модернизации с установкой АБТН; б – положение после модернизации с установкой АБТН и теплообменного оборудования

Fig. 8. Process flow diagrams with excess heat energy output to off-site customers for evaluating energy-supply process exergetic efficiency:

- а – position after modernization with installation of the ABHP;
б – position after modernization with installation of the ABHP and heat exchange equipment

Результаты расчетов приведены на рис. 9, 10 и в табл. 2.

В случае реализации приведенной модернизации термодинамическая эффективность энергоиспользования имеет потенциал роста на два порядка: с 0,11 до 15,00 %, т. е. в 135 раз. Таким образом, удалось доказать весьма высокую эффективность предложенной модернизации. Резкое улучшение результатов в сравнении с внутренним потреблением теплоты утилизируемых потоков связано с увеличением объемов утилизации. Этот очевидный факт находится в полном соответствии с положением концепции интенсивного энергосбережения о необходимости расширения энергосберегающей базы для достижения максимального результата [16]. Из двух рассмотренных схем утилизации при наличии внешнего потребления целесообразен одноступенчатый вариант нагрева потоков.

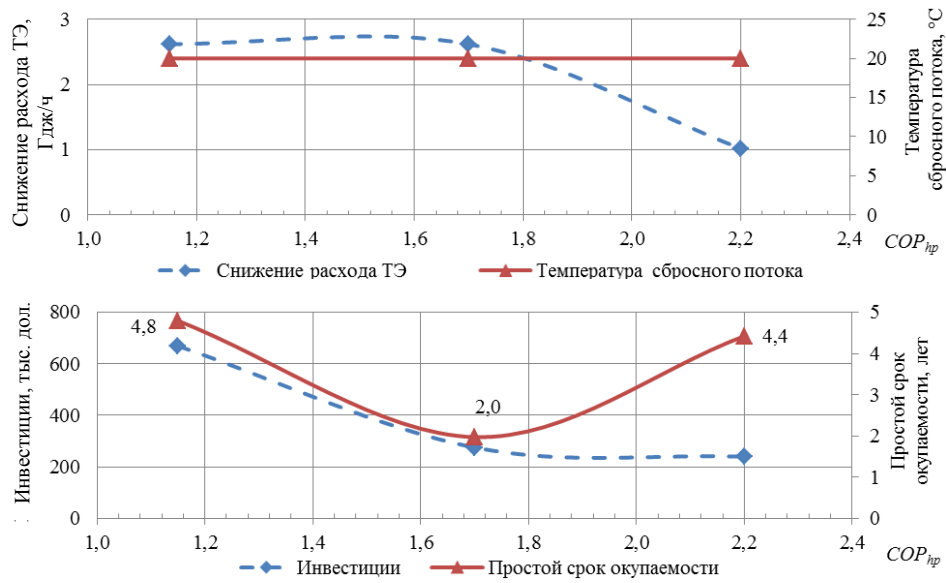


Рис. 9. Изменение показателей варианта модернизации по одноступенчатой схеме при отпуске избытков тепловой энергии стороннему потребителю после установки АБТН в зависимости от энергетического КПД АБТН

Fig. 9. The single-stage scheme modernization variant parameters alteration with excess heat energy output to off-site customers after installing the ABHP in terms of the ABHP energy efficiency

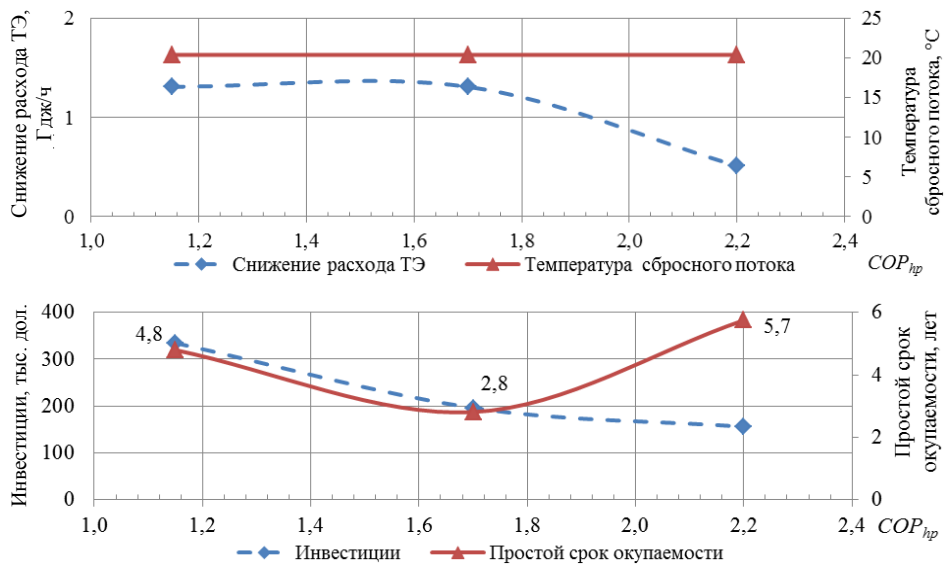


Рис. 10. Изменение показателей варианта модернизации по двухступенчатой схеме при отпуске избытков тепловой энергии стороннему потребителю в зависимости от энергетического КПД АБТН

Fig. 10. The two-stage scheme modernization variant parameters alteration with excess heat energy output to off-site customers in terms of the ABHP energy efficiency

Таблица 2

**Основные показатели по вариантам модернизации при условии отпуска избытков
тепловой энергии стороннему потребителю**

**Major parameters by the variants of modernization
on condition of excess heat energy output to off-site customers**

Наименование показателя	Обозначение	Положение		
		Существующее	после модернизации	
			линии по одно- ступенчатой схеме*	линии по двух- ступенчатой схеме*
Энергетический КПД, %	η_3	0,8	44,4	19,4
Степень термодинамического совершенства технической системы, %	ν	85,0	89,6	88,4
Термодинамический КПД, %	η_e	0,112	15,2	6,2
Степень технологического совершенства, %	β	15,0	12,2	12,4
Степень полного совершенства технической системы, %	μ	0,0167	1,85	0,77
Эксергетический КПД $= \nabla E_{\text{пол}} / \nabla E_{\text{зат}}$, %	η_e^{**}	0,20	17,6	7,3
Удельные затраты энергии на тонну материала с учетом электроэнергии, ГДж/т	q	10,2	8,3	8,1
Удельные затраты эксергии на тонну материала, ГДж/т	e	2,9	2,5	2,3
Годовая экономия условного топлива, т	ΔB	–	600	580
Годовой отпуск ТЭ стороннему потребителю, ТДж	$Q_{\text{стор}}$	–	19,5	8,33
Простой срок возврата инвестиций, лет	τ	–	2,0	2,1
* Пояснения линии расширенной структуры (рис. 8).				
** Эксергетический КПД, определяемый по принятым полезным эффектам и затратам эксергии [15].				

ВЫВОДЫ

1. Проведен всесторонний термодинамический анализ энергообеспечения линий крашения и разработаны обоснованные рекомендации по развитию схем их энергоснабжения.

2. В результате расчетно-аналитических исследований удалось доказать:

– чрезвычайно низкую эффективность существующих схем энергообеспечения теплотехнологии крашения. Проведенные многовариантные расчеты с привлечением наиболее объективных методов термодинамического анализа позволили предложить пути повышения эффективности энергообеспечения рассматриваемых линий;

– потенциальную возможность (как в отделочных производствах, так и в масштабах отрасли в целом) повышения термодинамической эффективности энергоиспользования в 135 раз за счет смешанного применения энергии вторичных энергоресурсов.

3. Выработаны рекомендации по исправлению ситуации с энергообеспечением линий непрерывного крашения, которые позволяют снизить их энергопотребление в 1,3–1,5 раза.

4. В свете предстоящего ввода в систему белорусской АЭС, проводимой модернизации ТЭЦ и перевода их на парогазовую технологию, приводящую к увеличению в три раза удельной выработки электроэнергии на единицу отпущенной теплоты, показаны:

– актуальность и экономическая целесообразность утилизации энергии низкотемпературных побочных потоков отделочных производств и ее внешнее использование в контексте необходимости устранения диспропорции между структурами генерации в энергосистеме и потребления хозяйственным комплексом страны тепловой энергии и электроэнергии при нахождении предприятий в зоне теплоснабжения ТЭЦ;

– необходимость и первоочередность значительного снижения расхода топлива на сопряженных ТЭЦ и котельных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк, В. Н. Эксергия текстильных материалов / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 3. С. 46–59.
2. Романюк, В. Н. Прогнозирование объемов производства предприятий легкой промышленности для определения их потребности в энергоресурсах. Ч. 1 / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Наука и техника. 2015. № 4. С. 67–74.
3. Романюк, В. Н. Прогнозирование объемов производства предприятий легкой промышленности для определения их потребности в энергоресурсах. Ч. 2 / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Наука и техника. 2015. № 5. С. 63–75.
4. Романюк, В. Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04 / В. Н. Романюк; БНТУ. Минск, 2010. 365 с.
5. Гельперин, Н. И. Тепловой насос / Н. И. Гельперин. Л.: Госнаучтехиздат, 1931. 152 с.
6. Холодильные машины / Н. Н. Кошкин [и др.]; под общ. ред. И. А. Сакуна. Л.: Машиностроение, 1985. 510 с.
7. Van de Bor, D. M. Low Grade Waste Heat Recovery Using Heat Pumps and Power Cycles / D. M. van de Bora, C. A. Infante Ferreira, A. A. Kiss // Energy. 2015. Vol. 89. P. 1–10.
8. Sarkar, J. Experimental Analysis of Energy Performance of Modified Single-Stage CO₂ Transcritical Vapour Compression Cycles Based on Vapour Injection in the Suction Line / J. Sarkar, S. Bhattacharyya, M. Ramgopal // International Journal of Energy Research. 2009. Vol. 33. P. 100–109.
9. A Transcritical CO₂ Heat Pump for Simultaneous Water Cooling and Heating: Test Results and Model Validation / R. Cabello [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2012. Vol. 47. P. 86–94.
10. Technical and Economic Working Domains of Industrial Heat Pumps: Part 1 – Single Stage Vapour Compression Heat Pumps / T. Ommen [et al.] // International Journal of Refrigeration. 2015. Vol. 55. P. 168–182.
11. Chua, K. J. Advances in Heat Pump Systems: a Review / K. J. Chua, S. K. Chou, W. M. Yang // Applied Energy. 2010. Vol. 87, No 12. P. 3611–3624.
12. Hepbasli, A. A Review of Heat Pump Water Heating Systems / A. Hepbasli, Y. Kalinci // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13, No 6–7. P. 1211–1229.
13. Löffler, M. K. Trapezoid Vapour Compression Heat Pump Cycles and Pinch Point Analysis / M. K. Löffler // International Journal of Refrigeration. 2015. Vol. 54. P. 142–150.
14. Романюк, В. Н. К вопросу о повышении эффективности энергообеспечения линии непрерывного крашения предприятий легкой промышленности / В. Н. Романюк, Д. Б. Муслина // Энергия и Менеджмент. 2015. № 5. С. 3–11.
15. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.

16. Ключников, А. Д. Интенсивное энергосбережение: предпосылки, методы, следствия / А. Д. Ключников // Теплоэнергетика. 2000. № 11. С. 12–16.

Поступила 27.07.2015 Подписана в печать 21.10.2015 Опубликовано онлайн 16.12.2015

REFERENCES

1. Romaniuk V. N., & Muslina D. B. (2015) Exergy of Textile Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 3, 46–59 (in Russian).
2. Romaniuk V. N., & Muslina D. B. (2015) Forecasting of Production Output for Light Industry Enterprises with Purpose of Determine their Power Resources Requirements (Part 1). *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 4, 67–74 (in Russian).
3. Romaniuk V. N., & Muslina D. B. (2015) Forecasting of Production Output for Light Industry Enterprises with Purpose of Determine their Power Resources Requirements (Part 2). *Nauka i Tekhnika* [Science and Technique], 5, 63–75 (in Russian).
4. Romaniuk V. N. (2010) *Intensivnoe Energoberezhenie v Teplotekhnologicheskikh Sistemakh Promyshlennogo Proizvodstva Stroitel'nykh Materialov. Dis. d-ra tekhn. nauk* [Intensive Energy Saving in the Thermotechnological Systems of Industrial Production of Constructional Materials. Dr. tech. sci. diss.]. Minsk. 365 p. (in Russian).
5. Gelperin N. I. (1931) *Thermal Pump*. Leningrad, Gosnauchtechizdat. 152 p. (in Russian).
6. Koshkin N. N., Sakun I. A., Bambushek, E. M., Bukharin, N. N., Gerasimov, E. D., Il'in, A. Ia., Pekarev V. I., Stukalenko A. K., & Timofeevskii L. S. (1985). *Refrigerating Machines*. Leningrad, Mashinostroenie. 510 p. (in Russian).
7. Van de Bor D. M., Infante Ferreira C. A., & Kiss A. A. (2015) Low Grade Waste Heat Recovery Using Heat Pumps and Power Cycles. *Energy*, 89, 1–10. DOI: 10.1016/j.energy.2015.06.030.
8. Sarkar J., Bhattacharyya S. & Ramgopal M. (2009) Experimental Analysis of Energy Performance of Modified Single-Stage CO₂ Transcritical Vapour Compression Cycles Based on Vapour Injection in the Suction Line. *International Journal of Energy Research*, 33, 100–109. DOI: 10.1002/er.1476.
9. Cabello R., Sánchez D., Patiño J., Llopis R., & Torrella E. (2012) A Transcritical CO₂ Heat Pump for Simultaneous Water Cooling and Heating: Test Results and Model Validation. *Applied Thermal Engineering*, 47, 86–94. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.02.031.
10. Ommen T., Jensen J. K., Markussen W. B., Reinholdt L., & Elmegaard B. (2015) Technical and Economic Working Domains of Industrial Heat Pumps: Part 1 – Single Stage Vapour Compression Heat Pumps. *International Journal of Refrigeration*, 55, 168–182. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.02.012.
11. Chua K. J., Chou S. K., & Yang W. M. (2010) Advances in Heat Pump Systems: a Review. *Applied Energy*, 87 (12), 3611–3624. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.06.014.
12. Hepbasli A., & Kalinci Y. (2009) A Review of Heat Pump Water Heating Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (6–7), 1211–1229. DOI: 10.1016/j.rser.2008.08.002.
13. Löffler M. K. (2015). Trapezoid Vapour Compression Heat Pump Cycles and Pinch Point Analysis. *International Journal of Refrigeration*, 54, 142–150. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.03.003.
14. Romaniuk V. N., & Muslina D. B. (2015) On Increasing Energy Supply Effectiveness of Chain Dyeing Lines in the Light Industry Enterprises. *Energiia i Menedzhment* [Energy and Management], 5, 3–11 (in Russian).
15. Brodyanskiy V. M., Fratsher V., & Mikhalek K. (1998) *Exergy Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat. 288 p. (in Russian).
16. Klyuchnikov A. D. (2000) Intensive Energy Saving: Prerequisites, Methods, Consequences. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 11, 12–16 (in Russian).

Received: 27 July 2015

Accepted: 21 Oktober 2015

Published online: 16 December 2015