

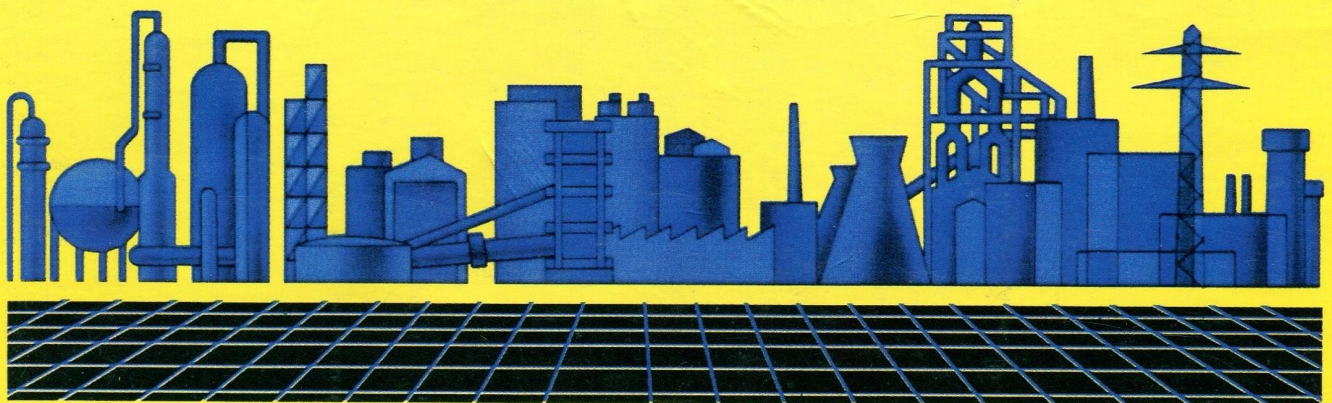
ISSN 2078-5364

# ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЩОКВАРТАЛЬНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ



## 3`2015



# ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

3'2015

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році  
(з листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

## Держвидання

Свідоцтво Міністерства інформації України  
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.

## ЗАТВЕРДЖЕНО

постановою президії ВАК України  
як наукове фахове видання  
(протокол № 1-05/3 від 14.04.2010 р.)

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

### Головний редактор

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ,  
член-кор. НАН України

### Відповідальний секретар

К. О. ГОРБУНОВ,  
канд. техн. наук, доц.

### ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

В. П. Мешалкін, *д-р техн. наук, проф.*,  
*РХТУ Москва (Росія)*  
Д. Б. Ферст, *ВА, ген. директор*  
*F. Executive Co. (Великобританія)*  
Й. Клемеш, *PhD, DSc (Hon)*  
*ун-та «Паннонія» (м. Веспрем, Угорщина)*  
*та ун-та Манчестера (Великобританія)*  
В. Плешу, *PhD, проф.*, *ун-т POLITEHNICA*  
*Бухарест (Румунія)*  
П. Стехлік, *PhD, проф.*, *VUT Брно (Чехія)*  
О. Б. Аніпко, *д-р техн. наук, проф.*  
Є. І. Сокіл, *член-кор. НАН України*  
П. А. Качанов, *д-р техн. наук, проф.*  
В. А. Малярєнко, *д-р техн. наук, проф.*  
Д. Ф. Сімбірський, *д-р техн. наук, проф.*  
В. П. Шапорєв, *д-р техн. наук, проф.*  
Ю. Б. Данилов, *д-р техн. наук, проф.*  
С. В. Яковлев, *д-р фіз.-мат. наук, проф.*  
Ю. М. Мацевітій, *акад. НАН України*  
В. Є. Ведь, *д-р техн. наук, проф.*  
Л. М. Ульянов, *д-р техн. наук*  
П. О. Капустенко, *акад. Академії будівництва України*  
О. П. Арсенєва, *д-р техн. наук, доц.*

### АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21  
Тел. 70-76-958

## ЗМІСТ

### ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

- Товажнянский Л. Л., Капустенко П. А.,  
Перевертайленко А. Ю., Дуич Н., Крайчич Г.,  
Селяков А. М., Илюнин О. О.*  
К вопросу энергосберегающей реконструкции  
систем теплоснабжения с паровыми котельными .....3
- Ульєв Л. М., Маатук А., Васильєв М. А.*  
Пинч-интеграция теплового насоса в процесс  
разделения легких углеводородов .....8
- Ульєв Л. М., Петар Варбанов, Ильченко М. В.*  
Визначення потенціалу енергозбереження процесів  
стабілізації та поділу гідродєалкілату на установці  
виробництва бензолу .....15
- Ульєв Л. М., Шумакова О. А., Петар Варбанов,  
Шпилька В. Н.*  
Увеличение мощности рекуперации теплоты  
в процессе производства карбамида.....21
- Краснокутский Е. В., Ведь В. Е., Петар Варбанов,  
Сатаев М. И.*  
Нейтрализатор отходящих газов ДВС  
с катализатором на металлическом носителе .....26
- ### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ
- Аніпко О. Б., Фєненко О. А.*  
Влияние внешних факторов при постановке задачи  
на прочность узла крепления киля самолёта  
МиГ-29 .....31

<i>Ковтонюк И. Б.</i> Научная проблема обеспечения рационального сочетания устойчивости и управляемости летательного аппарата военного назначения на основе синтеза аэродинамической компоновки на этапе концептуального проектирования.....	35	<i>Анипко О. Б., Шаблій Г. Ф.</i> К вопросу анализа точности определения сопротивления судна на основе расчетных соотношений с учетом температуры воды .....	64
<i>Анипко О. Б., Бусяк Ю. М., Коростелев О. П., Яковенко П. А.</i> Выстреливаемый из ствола автономный разведывательный летательный аппарат .....	39	<i>Арсеньева О. П., Петар Варбанов, Капустенко П. А., Хавин Г. Л., Лидия Чучек, Юзбашьян А. П., Бочарников И. А.</i> Обоснование выбора и прогноз работоспособности теплообменников подогрева отопительной воды на нефтеперерабатывающем заводе .....	67
<i>Кондратець В. О., Мацуї А. М.</i> Модельовання розподілу дробленої руди вздовж конвєсрної стрічки при розвантаженні бункерів ..	42	<i>Демирский А. В., Георгиадис М. С, Товажнянский Л. Л., Арсеньева О. П., Капустенко П. А., Бабак Т. Г., Хавин Г. Л.</i> Мониторинг динамики работы пластинчатых подогревателей сахарного сока в рабочих условиях .....	73
<i>Пономаренко А. В., Ведь В. Е., Петар Варбанов, Сатаев М. И.</i> Кинетические закономерности протекания гетерогенно-каталитических процессов очистки газовых выбросов .....	51		
<b>ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ</b>		<b>СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ</b>	
<i>Товажнянский Л. Л., Арсеньева О. П., Петар Варбанов, Капустенко П. А., Хавин Г. Л., Лидия Чучек</i> Проектирование системы теплообменников подогрева отопительной воды на нефтеперерабатывающем заводе.....	56	<i>Анипко О. Б., Бирюков И. Ю., Шульга А. В., Сиренко С. Н.</i> Анализ результатов экспериментального исследования по определению оптической заметности объектов БТТ .....	78

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 8 від 18.09.2015 р.)

**Інтегровані** технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 3. – 84 с.

Збірник наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій різноманітних галузей промисловості.





УДК 66.045.1

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Перевертайленко А.Ю., Дуич Н., Краячич Г., Селяков А.М.,  
Илюнин О.О.

## К ВОПРОСУ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПАРОВЫМИ КОТЕЛЬНЫМИ

**Введение.** В настоящее время доля энергии, потребляемой зданиями и сооружениями в странах Европейского Союза составляет около 40 % от общего энергопотребления [1].

По данным ENERDATA на 2010 год энергопотребление зданиями и сооружениями было на 9 % больше, чем в транспортном секторе, и на 27 % выше, чем в промышленном секторе. Таким образом, коммунальный сектор в части энергообеспечения зданий и сооружений является крупнейшим потребителем энергии и, соответственно, одним из крупнейших источников выбросов парниковых газов.

В Украине системы централизованного теплоснабжения обеспечивают нужды около 55 % населения страны. Потребление энергии жилым фондом городов страны почти вдвое выше европейских показателей [2].

В странах Восточной и Юго-Восточной Европы существует огромный потенциал для энергоэффективной оптимизации систем централизованного теплоснабжения. Реализация комплексных мероприятий по модернизации взаимосвязанных элементов системы централизованного теплоснабжения должна включать в себя применение наилучших доступных энергосберегающих технологий и оборудования для каждого компонента такой системы: источника тепловой энергии, системы распределения тепловой энергии и тепловых систем потребителей тепловой энергии.

**Состояние проблемы.** В 1877–1879 гг. в Нью-Йорке была создана первая система централизованного теплоснабжения протяженностью в пять километров. В качестве теплоносителя использовался водяной пар, вырабатываемый котельной. В течение последующих десяти лет подобные системы были построены и приняты в эксплуатацию в некоторых городах штатов Пенсильвания, Айова, Колорадо и в Нью-Йорке. К 1909 году в США насчитывалось уже около 150 систем централизованного теплоснабжения [3].

В начале XX века системы централизованного теплоснабжения начали распространяться и в Европе. Одна из первых таких систем, созданная в Дании в 1903 году, использовала в качестве источника энергии установку по сжиганию отходов [4].

Системы централизованного теплоснабжения, в которых в качестве теплоносителя используется перегретая выше 100 °С вода, начали эксплуатироваться в 1920–1930 гг., в основном вытеснив паровые системы. Начало и становление централизованных систем теплоснабжения в Украине в 30-е гг. XX в. связано с реализацией принятой тогда в СССР концепции развития теплофикационных установок на базе районных и промышленных теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). В Хорватии появление подобных систем связано с деятельностью генерирующей компании НЕР (Hrvatska Elektroprivreda).

В работе [5] представлена периодизация развития централизованных систем теплоснабжения с учетом перспектив на будущее до 2050 г согласно [6].

*Системы первого поколения (1880–1930-е гг.)* характеризуются тем, что в качестве теплоносителя используется водяной пар. Высокая температура пара на подаче приводит к повышенным тепловым потерям, имеет место сложная конструкция системы распределения теплоносителя и сбора и возврата конденсата, при этом из-за коррозии трубопроводов возврата конденсата имеют место большие потери последнего. Паровая система теплоснабжения плохо поддается регулированию и небезопасна в эксплуатации. В настоящее время такие системы все еще используются, например, в старых системах Манхэттена (Нью-Йорк) и Парижа [5]. В Украине подобные системы заменены на водяные до 1960-х гг. В Хорватии, в частности в Загребе, они в небольшом количестве сохранились на тех источниках тепловой энергии, которые вырабатывают пар в том числе для технологических нужд производственных предприятий [4].

*Системы второго поколения (1930-е–1970-е гг.)* характеризуются тем, что в качестве теплоносителя используется перегретая вода с температурой до 150 °С. Применение подобных систем позволило избежать ряда недостатков, присущих системам первого поколения, например, более полно использовать преимущества когенерации, снизить тепловые потери, а также более точно и надежно осуществлять отпуск тепла потребителям в зависимости от температуры наружного воздуха.

В системах второго поколения применялись кожухотрубчатые теплообменники и достаточно металлоемкая запорная арматура, что связано с достаточно высокими температурами и давлениями теплоносителя.

В СССР на тепловых вводах потребителей были установлены элеваторы – смесительные устройства, регулировавшие расход теплоносителя потребителю, и настроенные на определенный перепад давления на вводе. Подобные устройства имеют очень простую конструкцию и дешевы, но существенно ограничивают возможности потребителя по энергосбережению.

Одной из прогрессивных тенденций развития систем второго поколения было расширение применения ТЭЦ для теплоснабжения городов.

*Системы третьего поколения (с 1980-х гг.)* характеризуются снижением температурного потенциала теплоносителя, в ряде случаев ниже 100 °С [5], а также внедрением целого ряда энергосберегающих разработок, например:

- применение предварительно собранных индивидуальных тепловых пунктов на вводах потребителей;
- применение предварительно изолированных труб для прокладки тепловых сетей;
- расширение применения когенерационных установок;
- замена паровых котлов там, где это возможно, на водогрейные или их перевод в водогрейный режим;
- применение средств автоматического регулирования на вводах потребителей и создание систем диспетчеризации и мониторинга;
- применение пластинчатых теплообменников вместо кожухотрубчатых, что связано с выходом на рынок инновационных конструкций пластинчатых теплообменников [7].

Для систем третьего поколения характерно доминирование применения природного газа в качестве топлива для генерирующих установок, что улучшило экологическую ситуацию, но создало определенные проблемы в области энергобезопасности ряду стран, в том числе Украине.

В настоящее время системы централизованного теплоснабжения Украины и Хорватии в той или иной степени находятся в переходном состоянии от систем второго поколения к системам третьего поколения.

Концепция *систем четвертого поколения (2020–2050 гг.)* изложена в [6] и может быть охарактеризована следующими основными подходами:

- применение низкотемпературного теплоносителя для подогрева воды на нужды отопления и горячего водоснабжения;
- синергия энергосбережения и расширения и распространения систем централизованного теплоснабжения;
- минимизация потерь тепла в тепловых сетях;
- интеграция в системы централизованного теплоснабжения возобновляемых и альтернативных источников энергии.

Последний подход находится в хорошем соответствии с концепцией, изложенной в [8], для многоцелевой региональной интеграции, в том числе, энергоресурсов, которая может быть успешно применена для промышленного узла, включающего предприятия и жилой сектор.

### **Изложение основного материала**

Паровые котельные можно разделить на три вида:

- источники тепла для систем теплоснабжения с теплоносителем в виде пара;
- источники тепла для систем теплоснабжения с использованием перегретой воды в виде теплоносителя;
- источники тепла для систем теплоснабжения и отпуска пара потребителям на технологические нужды.

Объектом энергосберегающей реконструкции была выбрана котельная третьего вида – паровая котельная промышленного узла, снабжающая теплом жилой массив и поставляющая пар на технологические нужды промышленному предприятию.

Основным энергосберегающим мероприятием является реконструкция пароводогрейной части котельной путем применения автоматизированной пароводогрейной модульной установки на базе высокоэффективных пластинчатых теплообменных аппаратов.

Исходные данные для расчета и выбора теплообменников представлены в таблице 1.

Анализ исходных данных, результатов обследования и специфики выработки и отпуска пара сторонним предприятиям позволил сформулировать следующий подход к разработке схемы подогрева сетевой воды: разделить общую систему подогрева производительностью 15 Гкал/ч на две идентичные теплоустановки по 7,5 Гкал/ч (50 % необходимой производительности) каждая. При этом отбор пара на каждую установку из общего парового коллектора осуществляется отдельно.

Потоковая схема приведена на рис. 1.

Таблица 1

1.	Объект	Котельная промузла
2.	Количество тепла, нормативно передаваемого в единицу времени: (на две установки)	15 Гкал/ч
3.	Входная температура греющего теплоносителя (пар)	$T1 = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$
4.	Выходная температура греющего теплоносителя (конденсат)	$T2 \leq 94\text{ }^{\circ}\text{C}$
5.	Температура обратной сетевой воды	$T21 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$
6.	Температура подачи сетевой воды	$T11 = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$
7.	Максимальное давление в аппарате: – по пару – по сетевой воде	$P1 = 13\text{ кг/см}^2$ $P2 = 16\text{ кг/см}^2$
8.	Потеря напора по греющему теплоносителю	$\Delta p_1^0 \leq 3\text{ м в.ст}$
9.	Потеря напора по нагреваемому теплоносителю	$\Delta p_2^0 \leq 5\text{ м в.ст}$
10.	Фактор загрязнения	$\delta_w / \lambda_w = 0.06$

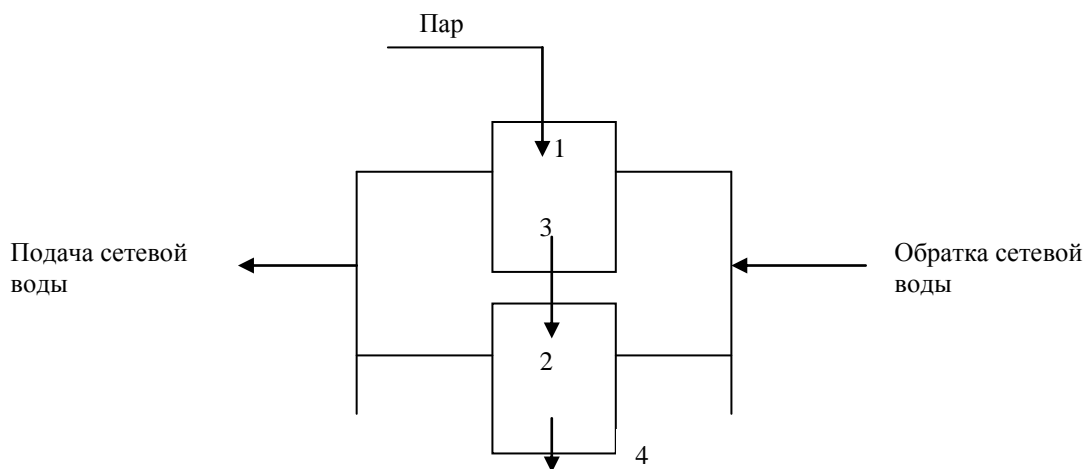


Рисунок 1 – Схема установки подогрева сетевой воды  
 1 – пластинчатый теплообменник со сварным пакетом пластин (конденсатор);  
 2 – паяный пластинчатый теплообменник (доохладитель конденсата);  
 3 – конденсат на доохладение;  
 4 – конденсат в емкость сбора конденсата котельной

При выборе схемы теплоустановки были разработаны следующие основные технические решения:

- применение специальных пластинчатых теплообменников со сварной конструкцией пакета для конденсации греющего пара;
- применение паяных пластинчатых теплообменников для доохладения конденсата до температуры невоскипания;
- последовательная схема подключения конденсатора и доохладителя конденсата по паровой стороне и параллельная схема подключения вышеупомянутых теплообменников по сетевой воде с пропорциональным расходом сетевой воды на каждый теплообменник;
- контроль расхода пара по температуре наружного воздуха, подачи сетевой воды, обратки сетевой воды и контроль температуры конденсата на подаче в емкость сбора конденсата котельной;
- интеграция контроллера теплоустановки в систему диспетчеризации котельной.

Выбор схемы потоков был произведен на основании гидравлических, тепловых и технико-экономических расчетов с применением соответствующего программного обеспечения, консультаций с экспертами компании «Альфа-Лаваль» (Швеция), а также анализа опыта эксплуатации паровых водоподогревательных установок сетевой воды, спроектированных, изготовленных и поставленных АО «Содружество-Т».

Расчет теплообменников производился по соответствующим компьютерным программам.

К установке на позицию конденсатора греющего пара принят пластинчатый теплообменник Компакт-блок CPL-30-N (см. табл. 2). Устройство теплообменника подробно описано в [7].

Таблица 2

Наименование показателей	Размерность	Величина
Температура греющего насыщенного пара на входе	°С	180,0
Температура конденсата греющего пара на выходе	°С	159,0
Максимальный массовый расход греющего пара	кг/ч	11370
Максимальная скорость пара во входном штуцере	м/с	12,8
Массовый расход сетевой воды	кг/ч	94760
Материал пластин	–	нерж.сталь AISI 316 hps
Относительное направление потоков		Перекрестный ток
Масса заполненного аппарата	кг	986
Площадь поверхности теплопередачи	м <sup>2</sup>	
Гидравлическое сопротивление по полости конденсирующегося пара	кПа	1,41
Гидравлическое сопротивление по полости сетевой воды	кПа	13,7

К установке на позицию доохладителя конденсата принят пластинчатый теплообменник типа СВ 76 (см. табл. 3). Устройство теплообменника описано в [7].

Таблица 3

Наименование показателей	Размерность	Величина
Температура конденсата на входе	°С	159,0
Температура конденсата на выходе	°С	93,6
Массовый расход конденсата	кг/ч	11370
Массовый расход сетевой воды	кг/ч	14000
Материал пластин	–	нерж.сталь AISI 316
Материал пайки	–	медь
Относительное направление потоков	–	противоток
Площадь поверхности теплопередачи	м <sup>2</sup>	5,8
Коэффициент теплопередачи расчетный	Вт/( м <sup>2</sup> К)	6724
Гидравлическое сопротивление по полости конденсата	кПа	24,2
Гидравлическое сопротивление по полости сетевой воды	кПа	25,7

Расход греющего теплоносителя–пара регулируется через расход конденсата клапаном с электроприводом в зависимости от температуры наружного воздуха и температуры на подаче сетевой воды в систему отопления.

Предусмотрена схема автоматизации системы централизованного теплоснабжения с использованием электронных регуляторов температуры теплоносителя тепловой сети. Электронный регулятор предназначен для управления регулирующим клапаном.

Предложен адаптивный алгоритм регулирования с элементами нечеткой кластеризации.

Расчет экономического эффекта от реализации данной разработки показал возможность снижения расхода потребляемого топлива – природного газа – на 20 %, при этом срок окупаемости не превышает двух лет.

**Выводы.** Рассмотрена концепция энергосберегающей реконструкции паровой котельной, которая является источником тепла для централизованной системы теплоснабжения и поставляет пар с заданными параметрами промышленному предприятию для технологического процесса.

Основным элементом реконструкции является применение автоматизированной модульной пароводогрейной установки на базе высокоэффективных пластинчатых теплообменных аппаратов. Разработанная система автоматизации позволяет осуществлять качественное регулирование отпуска тепла в систему теплоснабжения при сохранении параметров отпускаемого котельной пара.

Разработанная концепция может быть применена для реконструкции различных паровых котельных, в том числе и при замене паровых систем теплоснабжения на водяные.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Европейской Комиссии, проект DISKNET PIRSES-GA-2011-294933.



Литература

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). – “Official Journal of the European Union”, 18.6.2010, p.L153/13 – L153/35.
2. C. Fekete. Central and Eastern European District Heating Outlook.-KPMG’s Energy and Utilities Advisory Edition, Budapest, 104 pp.
3. P. Ulloa. Potential for CHP and District Heating and Cooling from Waste-to-Energy facilities in the U.S. – learning the Danish Experience. – Master’s Thesis, Columbia University, 2007, 79 pp.
4. D. Culig-Tokic. Comparative analysis of the District Heating Systems in Croatia and Denmark. – Master’s Thesis, University of Zagreb, 2013, 103pp.
5. H. Lund et al. 4<sup>th</sup> Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. – “Energy”, 2014, 68, p.1–11.
6. D. Connolly et al. Heat Roadmap Europe: second pre-study; 2013.
7. Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, П.А. КАПУСТЕНКО, Г.Л. ХАВИН, О.П. АРСЕНЬЄВА. Пластинчатые теплообменники в промышленности. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004.– 232 с.
8. Cucek L., Varbanov P.S., Klemes J.J., Kravanja Z. Multi-Objective Regional Total Ste Integration.– “Chemical Engineering Transactions”, 2013,35, p. 97–102.

Bibliography (transliterated)

1. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). – “Official Journal of the European Union”, 18.6.2010, p.L153/13 – L153/35.
2. C. Fekete. Central and Eastern European District Heating Outlook.-KPMG’s Energy and Utilities Advisory Edition, Budapest, 104pp.
3. P. Ulloa. Potential for CHP and District Heating and Cooling from Waste-to-Energy facilities in the U.S. – learning the Danish Experience. – Master’s Thesis, Columbia University, 2007, 79 pp.
4. D. Culig-Tokic. Comparative analysis of the District Heating Systems in Croatia and Denmark. – Master’s Thesis, University of Zagreb, 2013, 103 pp.
5. H. Lund et al. 4<sup>th</sup> Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. – “Energy”, 2014, 68, p. 1–11.
6. D. Connolly et al. Heat Roadmap Europe: second pre-study; 2013.
7. L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, G.L. Khavin, O.P. Arsenyeva. Platinchatye teploobmenniki v promyshlennosti. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2004. –232 p.
8. Cucek L., Varbanov P.S., Klemes J.J., Kravanja Z. Multi-Objective Regional Total Ste Integration.- “Chemical Engineering Transactions”, 2013,35, p. 97–102.

УДК 66.045.1

Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Перевертайленко О.Ю., Дуїч Н., Краячич Г., Селяков О.М., Ілюнін О.О.

**ДО ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ  
З ПАРОВИМИ КОТЕЛЬНЯМИ**

Розглянуто концепцію енергозберігаючої реконструкції парової котельні, що є джерелом тепла для централізованої системи теплопостачання та відпускає пару на технологічні потреби промислового підприємства. Відзначено, що основним заходом є застосування автоматизованої модульної паро водогрійної установки на базі високоефективних пластинчастих теплообмінних апаратів, що дозволяє регулювати постачання тепла користувачам.

Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Perevertaylenko O.Yu., Duic N., Krajacic G., Selyakov O.M., Ilynin O.O.

**ON THE PROBLEM OF STEAM BOILERHOUSE BASED DISTRICT HEATING SYSTEM  
ENERGY SAVING RETROFIT**

The conception of energy saving retrofit for case of steam boilerhouse based district heating system is considered. It was taken into account that boilerhouse supplies the steam for process needs of neighbour site. The main emphasis of the energy saving retrofit is the installation of automatized modular steam/water heating substitution based on high effective plate heat exchangers. It lets to manage the heat supply to consumers.

**ПИНЧ-ИНТЕГРАЦИЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСА В ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ ЛЕГКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ**

**Введение.** Уровень экономического развития любой страны сегодня определяется не количеством добытых или потребленных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а эффективностью их использования – энергоемкостью ВВП, удельными затратами ТЭР на единицу изготовленной продукции. Масштаб и устройство украинской экономики предопределяют довольно значительное конечное потребление первичных энергоресурсов. Украина относится к энергодефицитным странам, удовлетворяя в последние годы за счет собственной добычи потребности в природном газе на 24–27 %, в нефти – на 10–15 %. Дефицит угля, также является проблемой в последнее время. В топливном балансе Украины доминирующая роль принадлежит природному газу. По потреблению газа Украина занимает шестое место в мире после США, России, Великобритании Германии и Канады [1].

Повышение конкуренции на рынке переработке углеводородов и уменьшение рентабельности производства, вынуждает предприятия газохимической отрасли искать пути повышения энергоэффективности. Эффективное энергосбережение является одной из наиболее распространенных проблем на химических и нефтехимических заводах [2, 3].

**Анализ существующего процесса.** В данной работе с помощью метода пинч-анализа [4, 5] анализируется энергопотребление в процессах стабилизации пропан-пропиленовой фракции (ППФ) и процесс разделения широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) на установке газодифракционирования и компримирования (ГиК).

Ранее, в работе [6], было начато решение проблемы по энергосбережению разделения ШФЛУ и ППФ на ГиК.

На основании обследования технологической схемы [6], была построена сеточная диаграмма [4, 5], были определены теплообменные связи между технологическими потоками (рис. 1).

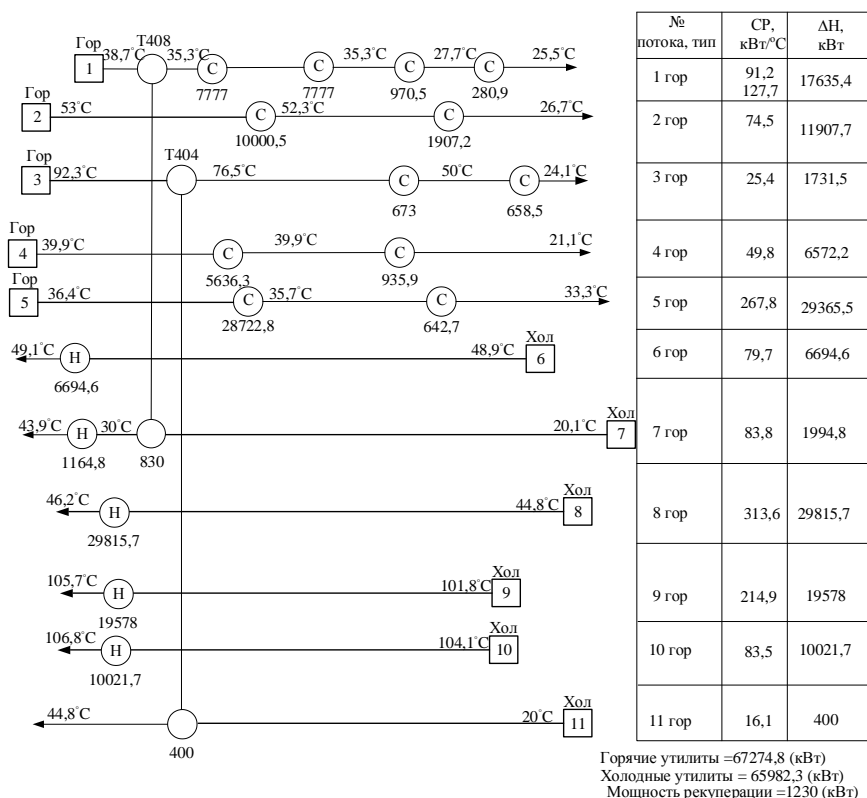


Рисунок 1 – Существующая в настоящее время система теплообмена:  
 T408, T404 – рекуперативные теплообменные аппараты, С – охладитель, Н – нагреватель

Для определения  $\Delta T_{\min}$  существующего проекта в пинч-анализе используется аппарат составных кривых [4, 5]. Составные кривые показывают суммарное энтальпийное изменение в системе потоков (холодных или горячих соотв.) во всех интервалах температуры (рис. 2).

Используя сеточную диаграмму исходной технологической схемы (рис. 1), определяем мощность рекуперации тепловой энергии. В теплообменной схеме процессов разделения легких углеводородов на ГИК два рекуперативных теплообменных аппарата [7], Т408 с нагрузкой 830 кВт и Т404 с нагрузкой 400 (рис. 1), следовательно, мощность рекуперации составит  $\sim 1230$  кВт.

На основе технологических данных, построим на энтальпийно-температурной диаграмме горячую и холодную составные кривые [4, 5] выбранной системы технологических потоков, и далее разместим их таким образом, чтобы интервал перекрытия между ними составил величину в 1230 кВт (рис. 2).

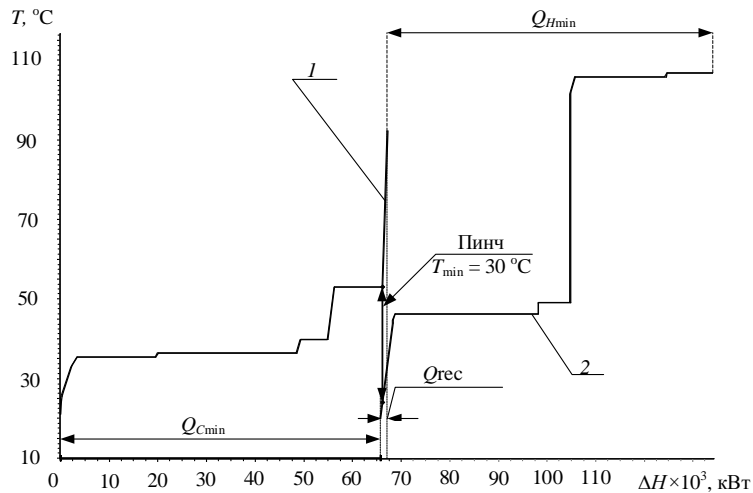


Рисунок 2 – Составные кривые процесса разделения легких углеводородов для существующей теплообменной системы:

1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков;  
 $Q_{Hmin}$ ,  $Q_{Cmin}$ ,  $Q_{rec}$  – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации;  
 $Q_{Hmin} = 67274$  кВт,  $Q_{Cmin} = 65982$ ,  $Q_{rec} = 1230$  кВт

**Потенциал энергосбережения.** Для выполнения проекта выбран метод пинч-анализа, который показал свою эффективность в исследованиях, проводившихся ранее в химической [8, 9] и нефтехимической [10, 11] отраслях промышленности. Преимущество метода состоит в возможности достижения минимальной дисконтированной стоимости проекта, которая определяется экономическими и термодинамическими законами [4].

Выбор оптимального проекта реконструкции осуществляется путем достижения такого значения  $\Delta T_{\min}$ , при котором приведенные затраты будут минимальными. Достигается подобное значение путем компромисса между приведенной стоимостью энергии и приведенными капитальными затратами. Стоимость зависимости приведенных величин от минимальной разности температур, спроектированные при помощи программы «Pinch», разработанной на кафедре интегрированных технологий, процессов и аппаратов НТУ «ХПИ» [12], представлены на (рис. 3). Для того, чтобы экономически оптимально интегрировать рассматриваемый процесс, необходимо определить основные значения капитальных и удельных затрат, которые существенно влияют на приведенную стоимость проекта.

В качестве топлива для нагрева горячих утилит используется природный газ, стоимость которого составляет – 400 долл. США за  $1000 \text{ м}^3$ , теплота сгорания газа составляет  $32 \text{ ГДж}/1000 \text{ м}^3$ , соответственно цена горячих утилит, с учетом того, что в году 8000 рабочих часов, составит – 360 долл. США за 1 кВт год. Цена холодных утилит составит – 30 долл. США за 1 кВт год. Для определения минимальных приведенных затрат примем следующие стоимостные характеристики теплообменного оборудования. Стоимость теплообменных аппаратов определяется выражением (1):

$$\text{Кап. стоимость} = A_r + B_r (S)^c \quad (1)$$

где  $A = 50000$  долл. США;  $B = 500$  долл. США;  $S$  – площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ ; для пластинчатых теплообменников, как правило,  $c = 0,87$  [7].

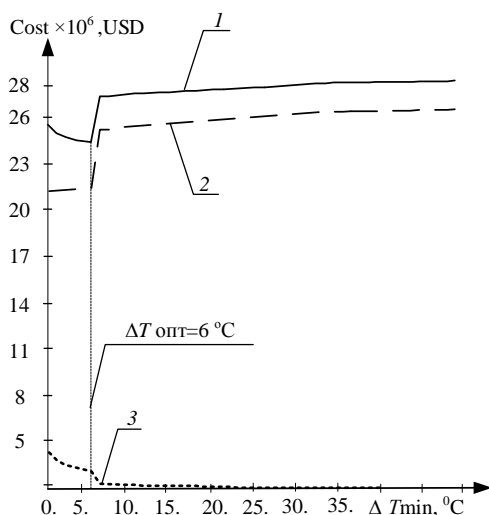


Рисунок 3 – Стоимостные зависимости приведенных величин от минимальной разности температур для системы потоков на рисунке 1:

1 – приведенная общая стоимость, 2 – приведенная стоимость энергии, 3 – приведенные капитальные затраты

Построение стоимостных кривых для рассматриваемого процесса (рис. 3) позволило определить значение  $\Delta T_{\text{min, опт}}$ , которое составило: 6 °C. Построение составных кривых (рис. 4) для системы потоков технологического процесса с учетом найденного значения  $\Delta T_{\text{min, опт}}$  позволяет определить целевые энергетические значения для проекта реконструкции. Потребление горячих утилит процессом составит – 54914 кВт, потребление холодных утилит – 53658 кВт, мощность рекуперации в теплообменной сети 13575 кВт. Снижение потребления горячих и холодных утилит – 18,37 % и 18,67 %.

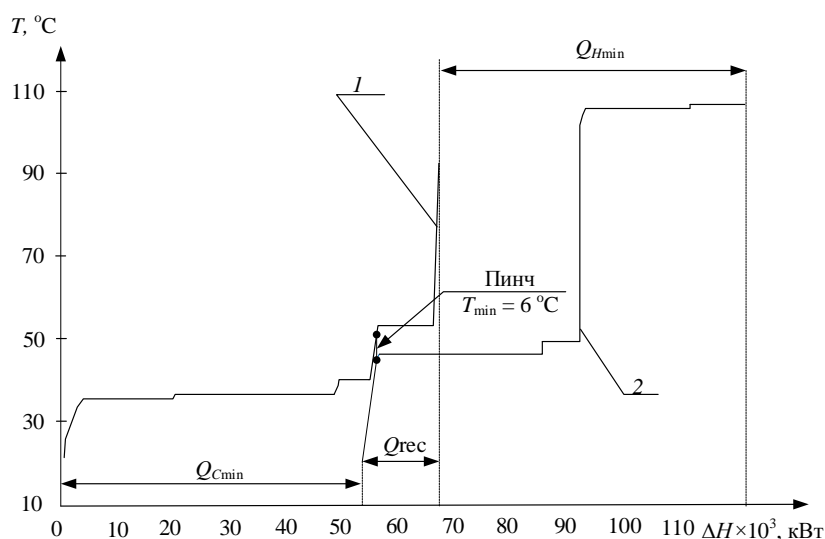


Рисунок 4 – Составные кривые после реконструкции для найденного значения  $\Delta T_{\text{opt}}$ :

1, 2 – горячая и холодная составная кривая;

$Q_{\text{Hmin}}$ ,  $Q_{\text{Cmin}}$ ,  $Q_{\text{Rec}}$  – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации;  
 $Q_{\text{Hmin}} = 54914$  кВт,  $Q_{\text{Cmin}} = 53658$ ,  $Q_{\text{Rec}} = 13575$  кВт

В соответствии с принципами пинч-анализа [4, 5], для полученного значения  $\Delta T_{\text{min, опт}}$ , спроектированы новые сеточные диаграммы и рассчитана мощность теплообменного оборудования (рис. 5).

Оценка численных значений энергопотребления, рекуперации в существующем и предполагаемом проекте приведена в таблице 1.

В пинч-анализе наиболее подходящим инструментом понимания взаимодействия утилит с процессом является «большая составная кривая» [4, 5]. Для сеточной диаграммы с оптимальным значением  $\Delta T_{\text{min}}$  (рис. 5), была построена большая составная кривая (БСК) (рис. 6).



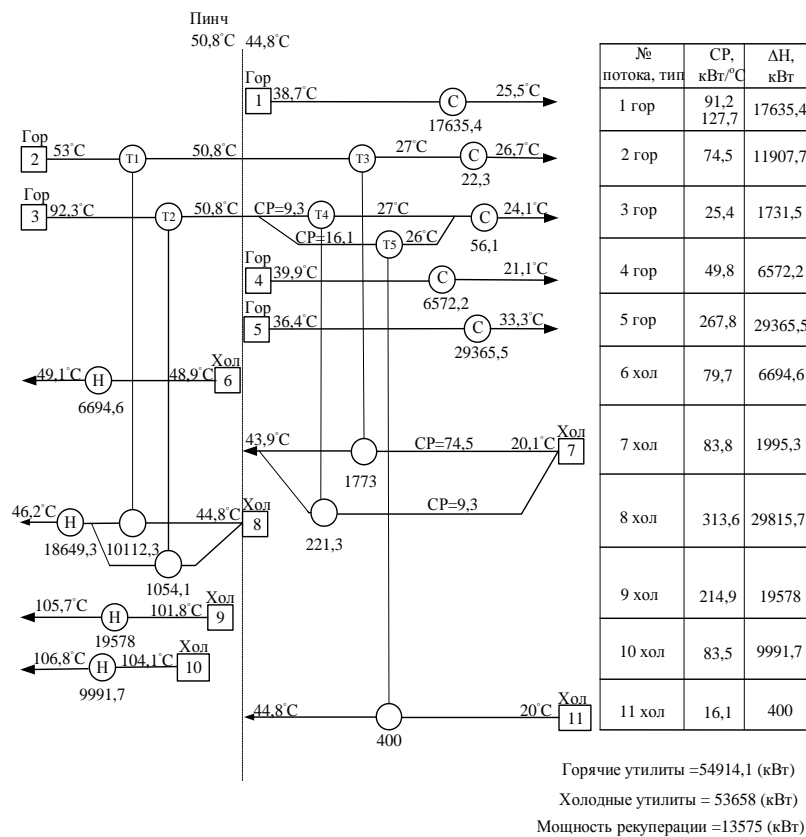


Рисунок 5 – Сеточная диаграмма оптимизированного проекта реконструкции теплообменной сети: Т1–Т5 – новые рекуперативные теплообменные аппараты, С – охладитель, Н – нагреватель

На БСК процесса разделения ШФЛУ и ППФ на ГИК показана возможность установки теплового насоса [4, 9] (рис. 6). Интеграция теплового насоса с процессом при размещении насоса поперек пинча обеспечивает энергосбережение за счет сокращения потребления внешних энергоносителей [4].

Эффективность действия теплового насоса часто оценивают коэффициентом преобразования, который определяется как отношение полезной энергии, передаваемой процессу, к затрачиваемой на это работе (уравнение 2), т. е. с помощью большой составной кривой мы можем определить тепловые нагрузки и необходимые температуры для интеграции тепловых насосов в ХТС.

$$\varepsilon = \frac{Q_{TH} + W}{W}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon=17$ ;  $Q_{TH} - 5636,3$  кВт;  $W - 350$  кВт.

С помощью программы «Aspen Hysys» [13] составлена компьютерная модель и рассчитана мощность теплового насоса (рис. 7), которая составила 350 кВт.

Простой срок окупаемости теплового насоса ( $P$ ) рассчитываемся по формуле (3), как отношение капитальных затрат к годовой экономии от сокращения потребления внешних энергоносителей, и составляет 2,4 месяца. Затраты на оборудование ( $K$ ) состоят из стоимости теплообменника и стоимости компрессора. Оценочная стоимость теплообменника – 189,1 тыс. долл. США, стоимость компрессора – около 200 тыс. долл. США [14].

$$P = \frac{A_{TH} + K}{Q_{hot} \times S_{hot} + Q_{cold} \times S_{cold} - W \times S_{elec}}, \quad (3)$$

где  $A_{TH} - 50000$  долл. США;  $K - 389100$  долл. США;  $Q_{hot} - 5989,3$  кВт;  $S_{hot} - 360$  долл. США за 1 кВт год;  $Q_{cold} - 5639,3$  кВт;  $S_{cold} - 30$  долл. США за 1 кВт год;  $W - 350$  кВт;  $S_{elec} - 500$  долл. США за 1 кВт год.

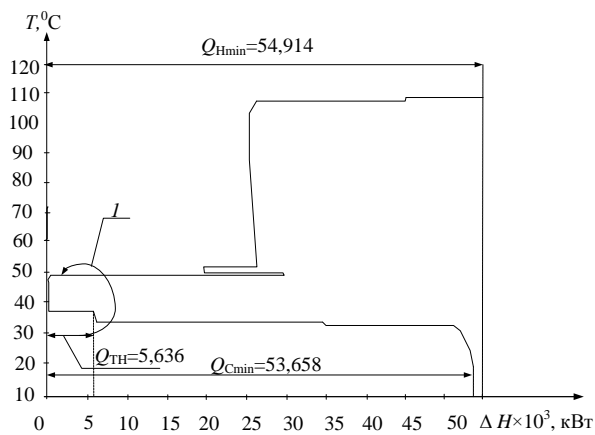


Рисунок 6 – Большая составная кривая:  
I – показывает возможность интеграции теплового насоса

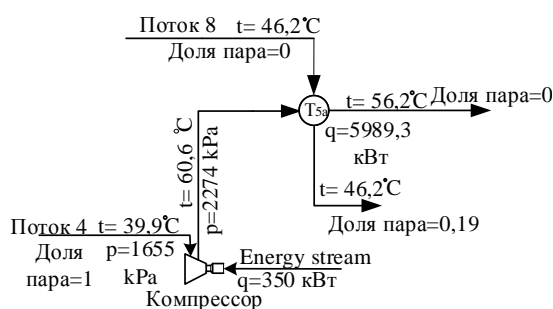


Рисунок 7 – Nysys модель подключения теплового насоса

Таблица 1 – Энергопотребление и рекуперация существующей системы теплообмена и системы теплообмена в предлагаемом проекте реконструкции

Энергетическая характеристика процессов	Мощность горячих утилит, кВт	Мощность холодных утилит, кВт	Мощность рекуперации теплоты, кВт
Существующая система теплообмена	67245,4	65982,3	1230
предлагаемая система теплообмена без теплового насоса	54914	53658	13560
предлагаемая система теплообмена с тепловым насосом	48924,7	48018,7	19549,3
% от существующего значения без тепловых насосов	81,2	80,6	1102,4
% от существующего значения с тепловых насосов	72,7	72,8	1589,4

**Выводы.** В результате исследования процесса стабилизации ППФ, разделения ППФ на ГиК, разделения ШФЛУ на ГиК, составлена таблица потоковых данных, построена сеточная диаграмма, определены теплообменные связи между технологическими потоками, а также была посчитана мощность рекуперации теплоты, которая составила 1230 кВт для существующего процесса. Спроектированная составная кривая выявила недостатки существующей теплообменной системы, которые приводят к увеличению энергопотребления. С помощью инструмента стоимостных кривых получено новое значение  $\Delta T_{\min, \text{opt}} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для нового значения  $\Delta T_{\min, \text{opt}} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$  спроектирована сеточная диаграмма, также рассмотрена возможность установки теплового насоса и оценена экономическая эффективность проекта. Капитальные затраты составят 1760,8 тыс долл. США, срок окупаемости – три месяца.

Благодарность: Авторы благодарят Европейское Сообщество за финансовую поддержку в рамках проекта ЕС "Distributed Knowledge-Based Energy Saving Networks" – DISKNET (FP7-PEOPLE-2011-IRSES-294933).

**Обозначения.**  $A_{TH}$  – общая стоимость установки теплового насоса, долл. США;  $CP$  – потоковая теплоемкость кВт/°С;  $K$  – стоимость теплового насоса, долл. США;  $T$  – температура, °С;  $\Delta H$  – изменение энтальпии потоков, кВт;  $\Delta T_{min}$  – минимальная разность температур, °С;  $\varepsilon$  – коэффициент преобразования теплового насоса;  $Q_{hot}$  – тепловая мощность для нагрева горячих потоков кВт;  $Q_{TH}$  – количество передаваемого тепла, кВт;  $W$  – мощность в тепловом эквиваленте, затрачиваемая на привод компрессора, кВт;  $S_{hot}$  – стоимость годовой энергии для нагрева холодных потоков, долл. США за 1 кВт год;  $Q_{cold}$  – тепловая мощность для нагрева холодных потоков, кВт;  $S_{cold}$  – стоимость годовой энергии для нагрева холодных потоков, долл. США за 1 кВт год;  $S_{elec}$  – стоимость годовой энергии для работы компрессора.

#### Литература

1. Ukraine policy review. [электронный ресурс] // International Energy Agency. Режим доступа: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ukraine2006.pdf>. accessed 28.08.2015.
2. Angsutorn N. Heat Exchanger Network Synthesis on Gas Separation Plant No.2 (GSP2) in Thailand / N Angsutorn, P. Saikhaw, R. Chuvaree, S. Kitipat // Chemical Engineering Transaction. – 2014 – vol. 39 – P. 1471–1476.
3. Nguyen T.V. Evaluation of the life performance of oil and gas o\_shore platforms: Site-scale integration and exergy-based assessment / T.V. Nguyen, T.G. Fulop, P. Brehuhaus, B. Elmegaard // Technical University of Denmark. – 2014. – 42 p.
4. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ и др. – Х.: ХГПУ, 2000. – 457 с.
5. Kemp, Ian C. Pinch analysis and process integration A user guide on process integration for the efficient use of energy (2nd Ed.) / Ian C. Kemp. – Elsevier Ltd, 2007. – 415 p.
6. Ульев Л.М. Экстракция технологических данных процессов разделения широкой фракции легких углеводородов и пропан-пропиленовой фракции / Л.М. Ульев, А. Маатоук // Вісник НТУ «ХПІ». – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 7. – С. 22–28.
7. Hesselgreaves J.E. Compact heat exchangers. Selection, design and operation. / J.E. Hesselgreaves. – Amsterdam: Elsevier, 2001. – 398 p.
8. Tovazhnyansky L. Process integration of sodium hypophosphite production / L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, L. Ulyev, S. Boldyryev, O. Arsenyeva // Applied Thermal Engineering. – 2010. – V. 30, Issue 16. – P. 2306–2314.
9. Ульев Л.М. Пинч-интеграция тепловых насосов в процесс очистки тетрахлорида титана / Л.М. Ульев, В.В. Сивак // Интегрированные технологии и энергосбережение. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2013. – № 2. – С. 35–44.
10. Клемеш Й. Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки / Й. Клемеш, Ю.Т. Костенко, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев, А.Ю. Перевертайленко, Б.Д. Зулин // Теорет. основы хим. технологии. – 1999. – Т. 33. – №4. – С. 420–431.
11. Ульев Л.М. Пинч-реконструкция секций гидроочистки и каталитического риформинга на установке Л-35-11/600 / Л.М. Ульев, Д.Д. Нечипоренко // Интегрированные технологии и энергосбережение. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2013. – № 2. – С. 95–101.
12. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Применение программного обеспечения PINCH2.02 / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев, Э.Р. Нагорный // ІТЕ. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2003. – № 4. – С. 14–19.
13. Seider W.D. Product and process design principles synthesis, Analysis, and Evaluation / W.D. Seider, J.D. Seader, D.R. Lewin. – Second Edition. – San Francisco: Wiley, 2003. – 1122 p.
14. Горшков В.Г. Тепловые насосы. Аналитический Обзор // Справочник промышленного оборудования. – 2004. – № 2. – 80 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Ukraine policy review. [elektronnyiy resurs]. International Energy Agency, France.: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ukraine2006.pdf>. accessed: 28.08.2015.
2. Angsutorn N. Heat Exchanger Network Synthesis on Gas Separation Plant No.2 (GSP2) in Thailand. N Angsutorn, P. Saikhaw, R. Chuvaree, S. Kitipat. Chemical Engineering Transaction. – 2014 – vol. 39 – P. 1471–1476.

3. Nguyen T. V. Evaluation of the life performance of oil and gas o<sub>shore</sub> platforms: Site-scale integration and exergy-based assessment. T.V. Nguyen, T.G. Fulop, P. Breuhaus, B. Elmegaard. Technical University of Denmark. – 2014. – 42 p.
4. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov. [Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M.]. – Harkov: NTU «HPI», 2000. – 458 p.
5. Kemp, Ian C. Pinch analysis and process integration a user guide on process integration for the efficient use of energy (2nd Ed.). Ian C. Kemp. – Elsevier Ltd, 2007. – 415 p.
6. Ulyev L.M. Jekstrakcija tehnologicheskikh danykh processov razdelenija shirokoj frakcii legkih uglevododov i propan-propilenovoj frakcii. L.M. Ulyev, A. Maatouk. Vestnik NTU “KhPI”. – 2015. – № 7. – P. 22–28.
7. Hesselgreaves JE. Compact heat exchangers. Selection, design and operation. JE. Hesselgreaves. Amsterdam: Elsevier, 2001. – 398 p.
8. Tovazhnyansky L. Process integration of sodium hypophosphite production. L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, L. Ulyev, S. Boldyryev, O. Arsenyeva. Applied Thermal Engineering. – 2010. – V. 30, Issue 16. – P. 2306–2314.
9. Ulyev L.M. Pinch-integracija teplovyh nasosov v process ochistki tetrahlorida titana. L.M. Ulyev, V.V. Sivak. Integrated Technologies and Energy Conservation. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2013 – № 2. – P. 35–44.
10. Klemes J. Primenenie metoda pinch-analiza dlja proektirovaniya jenergosberegajushhih ustanovok neftepererabotki. J. Klemes, Y.T. Kostenko, L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev, A.Y. Perevertaylenko, B.D. Zulin. Teoret. osnovy him. tehnologii. – 1999. – T. 33. – №4. – P. 420–431.
11. Ulyev L.M. Pinch-rekonstrukcija sekcij gidroochistki i kataliticheskogo riforminga na ustanovke L-35-11/600. L.M. Ulyev, D.D. Nechiporenko. ITE. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2013. – № 2, P. 95–101.
12. Tovazhnyansky L. Primenenie programmnoho obespechenija PINCH2.02. L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, L. Ulyev, E.R. Nagorni. ITE. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2003. – № 4. – P. 14–19.
13. Seider W.D. Product and process design principles synthesis, Analysis, and Evaluation. W.D. Seider, J.D. Seader, D.R. Lewin. – Second Edition. – San Francisco: Wiley. – 2003. – 1122 p.
14. Gorshkov V. Teplovye nasosy. Analiticheskij Obzor. Spravochnik promyshlennogo oborudovaniya. – 2004. – № 2. – 80 p.

УДК 338.45: 662.276

Ульєв Л.М., Маатук А., Васильєв М.А.

### **ПИНЧ-ИНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ У ПРОЦЕС РОЗДІЛЕННЯ ЛЕГКИХ ВУГЛЕВОДНІВ**

Потенціал енергозбереження в процесах стабілізації пропан-пропіленової фракції (ППФ), розділення ППФ та розділення широкі фракції вуглеводнів, досліджується в даній роботі. На підставі аналізу технологічної схеми і поточкових даних, за допомогою метода пінч-аналізу спроектована сіткова діаграма теплообмінної системи, побудовані складові криві відповідно до існуючого навантаження теплообмінної системи. Знайдене нове значення  $\Delta T_{\min}$  та побудуванні складові криві згідно цього значення. Розглянута можливість інтеграції теплового насосу та розраховані економічні параметри процесу. У статті показано шляхи зменшення споживання зовнішніх енергоносіїв в процесі розділення легких вуглеводнів, а також запропоновані шляхи покрової модернізації заводу.

Ulyev L.M, Maatouk A., Vasilyev M.A.

### **PINCH-INTEGRATION OF HEAT PUMP FOR LIGHT HYDROCARBONS SEPARATION PROCESS**

Energy conservation is one of the most common concerns in gas separation plants. This article contains information about data extraction and heat integration of separation of light hydrocarbons plant. The pinch analysis method was selected to perform a reconstruction project. Technological streams that are needed for the integration process by using the pinch analysis method were identified. Grid diagram was constructed on the basis of these data, heat exchange between process streams was determined. Heat recovery power of existing process was calculated. In addition to that composite curves for the existing process was made. According to principles of pinch analysis, new composite curves are designed. Application of the methods of pinch-analysis and integration of heat pumps allows to decrease the external hot utilities usage by 27 % and cold utilities usage by 27 %, and also offered the way of step-by-step retrofit of the plant.



**ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА ПОДІЛУ ГІДРОДЕАЛКІЛАТУ НА УСТАНОВЦІ ВИРОБНИЦТВА БЕНЗОЛУ**

**Вступ.** Скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів в промисловості зв'язане з широко-масштабною реалізацією сучасних енергозберігаючих технологій, створенням високоефективних енерготехнологічних комплексів.

За підсумками 2010 року енергоємність ВВП в Україні склала 1,4 кг н.е. на 1 дол. США. Цей показник є сьогодні найвищим серед країн Європи. Зокрема, в Росії енергоємність ВВП складає 0,75 кг н.е. / дол. США, в країнах Європи – 0,2 кг н.е. /дол. США [1]. Особливо важливим є зменшення енергоспоживання в хімічній, нафтохімічній і металургійній промисловості, де ціна на паливо становить основну частину собівартості продукції.

Застосування методів теплоенергетичної інтеграції дозволяє домогтися істотної фінансової економії за рахунок мінімізації використання зовнішніх енергоносіїв, шляхом максимізації рекуперації теплоти в рамках розглянутої енерготехнологічної системи [2].

**Опис технологічної схеми установки.** Раніше в роботах [3–6] була розглянута теплова інтеграція процесів виділення бензол-толуол-ксілольної фракції, гідрування, гідрознесірчування та гідротермопереробки на виробництві бензолу. Ці дослідження торкнулися лише частини установки, тому в даній роботі ми продовжимо вивчення схеми для вирішення проблеми з енергозбереження процесів стабілізації і поділу гідрдеалкілату.

Гідрдеалкілат підігрівается у теплообміннику Т-314 та подається у колонну стабілізації К-305. Пари легких вуглеводнів з верха колони частково конденсуються у повітряному конденсаторі Т-335 та потрапляють до флегмової ємності Е-309. Газова фракція з ємності Е-309 додатково конденсується в пропіленовому конденсаторі Т-330, а залишкові гази виходять до паливної системи.

Теплообмін у колоні стабілізації К-305 відбувається шляхом циркуляції кубової рідини через виносний кип'ятильник Т-316.

Кубова рідина колони К-305 подається в колону виділення бензольної фракції від важких вуглеводнів К-306.

Пара бензольної фракції з верха колони К-306 частково конденсується у повітряному конденсаторі Т-322 та потрапляє до флегмової ємності Е-314. Із неї балансова кількість бензольної фракції подається до теплообмінника Т-325, звідки через підігрівач Т-327 надходить до реактора контактної доочистки Р-304/1,2.

Теплообмін у колоні К-306 відбувається шляхом циркуляції кубової рідини на виносних кип'ятильниках Т-324/1/2. Бензольна фракція з низу екстракторів Р-304/1,2 подається в колону виділення товарного бензолу К-307.

Пари бензолу з верху колони К-307 конденсуються у повітряному конденсаторі Т-332 та потрапляють до флегмової ємності Е-315. Пара бензолу з ємності Е-315 охолоджується та конденсується у теплообміннику Т-424. Товарний бензол після холодильника Т-328 надходить на склад. Теплообмін у колоні виділення товарного бензолу К-307 відбувається шляхом циркуляції кубової рідини через виносний кип'ятильник Т-329.

Технологічна схема процесів стабілізації та поділу гідрдеалкілату представлена на рисунку 1.

**Екстракція даних.** Використовуючи результати вивчення технологічної схеми, регламенту та матеріального балансу установки, складемо таблицю потокових даних, необхідних для визначення теплової потужності, споживаної процесами стабілізації та поділу гідрдеалкілату (табл. 1).

**Визначення енергозберігаючого потенціалу.** Побудуємо популяцію гарячих і холодних технологічних потоків по таблиці 1 на сітковій діаграмі згідно з температурними інтервалами в яких розташовані досліджувані потоки.

Сіткова діаграма існуючої сітки теплообміну показана на рисунку 2.

За виміряними температурами технологічних потоків і їх потоковими теплоємності визначаємо потужність кожного з рекуперативних теплообмінників [7–9].

Після визначення та підсумовування теплових навантажень усіх теплообмінних апаратів отримано потужність рекуперації 352,94 кВт.

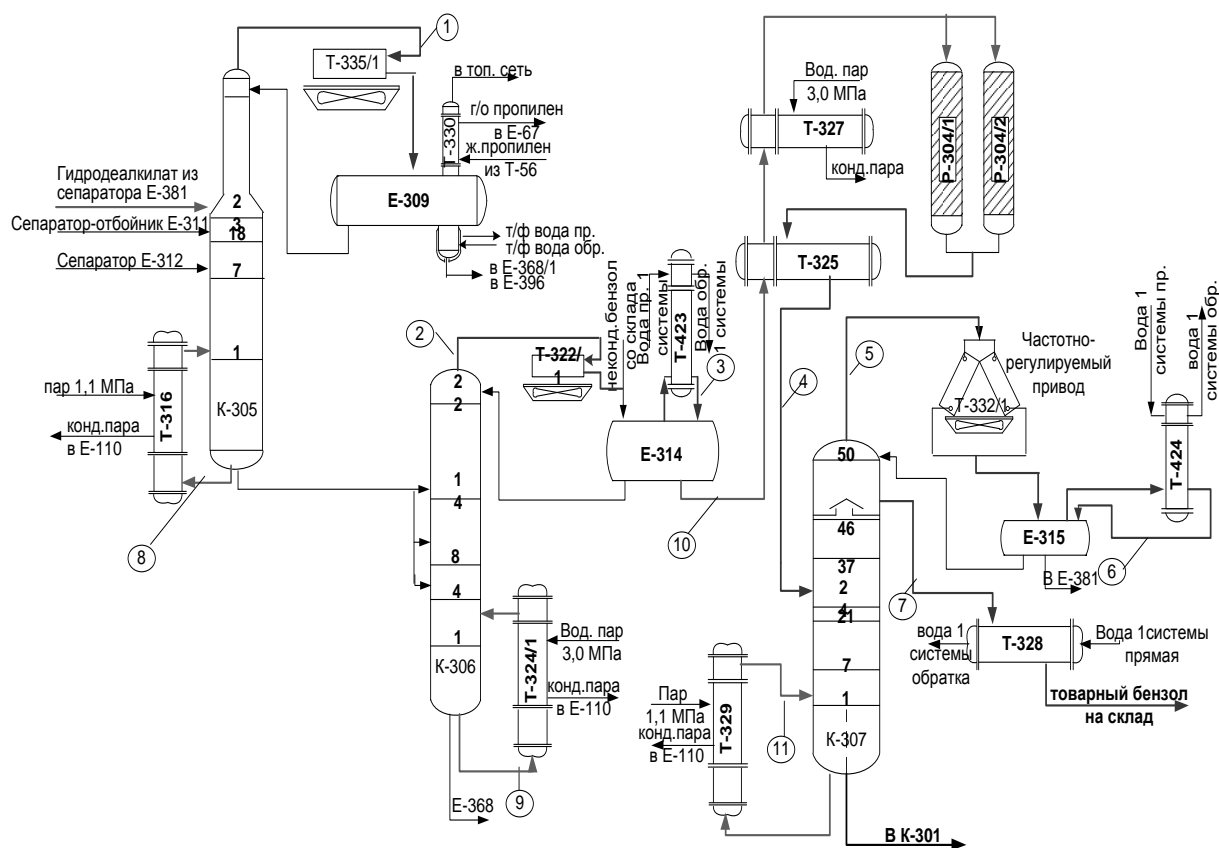


Рисунок 1 – Технологічна схема процесів стабілізації та поділу гідродекільату  
 К-305, К-306, К-307 – ректифікаційні колони стабілізації та поділу гідродекільату з виділенням товарного бензолу;  
 Т – теплообмінники; Р-304/1,2 – реактори контактного доочищення

Таблиця 1 – Система потоків для аналізу енергоспоживання процесів стабілізації та поділу гідродекільату

№	Назва потоку	Тип	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_r, ^\circ\text{C}$	G, кг/ч	C, кДж/(кг·°C)	CP, кВт/°C	$\Delta H$ , кВт
1	Пара легких углеводнів з К-305	гар	126	45	9 746	2,079	5,627	454,10
2	Пара бензолної фракції з К-306	гар	86	69	9 048	1,835	4,612	78,40
3	Пара БТК фракції	гар	48	26	550	1,637	0,250	5,50
4	Бензолна фракція з Р-304	гар	195	119	8 053	2,076	4,644	352,94
5	Пара бензолу з К-307	гар	84	81	32 184	1,868	16,700	50,10
6	Пара бензолу з Е-315	гар	78	18	650	1,686	0,304	18,20
7	Товарний бензол з К-307	гар	85	38	8 056	1,750	3,915	183,22
8	Кубова рідина К-305	хол	148	162	84 253	2,851	66,724	967,49
9	Кубова рідина з К-306	хол	192	211	93 781	2,802	72,993	1364,97
10	З Е-314	хол	69	204	8053	1,811	4,051	546,90
11	Кубова рідина К-307	хол	114	129	176 287	2,005	98,182	1512,00

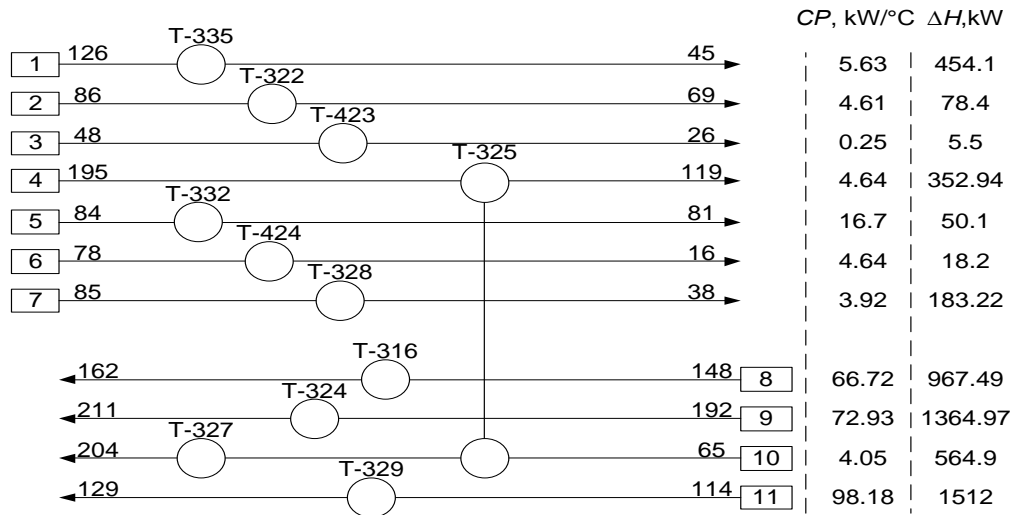


Рисунок 2 – Сіткова діаграма існуючого процесу:  
 1–7 – гарячі потоки; 8–11 – холодні потоки;  
 CP – потокова теплоємність; ΔH – теплові навантаження для кожного потоку

Використавши дані сіткової діаграми (рис. 2), будемо на ентальпійно-температурній діаграмі гарячу і холодну складові криві обраної системи технологічних потоків (рис. 3). Розташування кривих повинне бути таким, щоб інтервал перекриття між ними складав розраховану величину рекуперації потужності ( $Q_{Rec}$ ) [10]. Проекція гарячої складової кривої на ентальпійну вісь (абсцис) показує значення теплової потужності, яку можливо відвести від системи гарячих потоків і використати для підігріву холодних потоків. Ця величина складає значення  $Q_{Cmin} = 789,52$  кВт. Аналогічно для холодної складової кривої потужність складає  $Q_{Hmin} = 3\,985,2$  кВт.

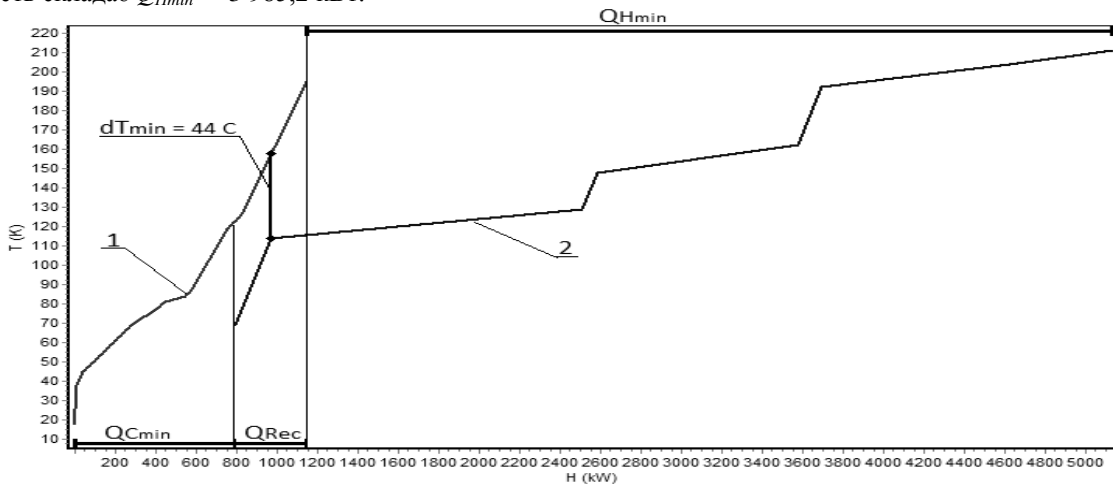


Рисунок 3 – Складові криві існуючого процесу  
 1 – гаряча складові крива; 2 – холодна складові крива;  
 $Q_{Cmin}$ ,  $Q_{Hmin}$  – споживання холодних та гарячих утиліт;  
 $Q_{Rec}$  – потужність рекуперації;  $\Delta T_{min}$  – мінімальна різниця температур

За допомогою програмного забезпечення «Pinch» [11] будемо вартісні криві (рис. 4). Проаналізувавши отримані дані, обираємо нове значення мінімальної різниці температур  $\Delta T_{min} = 5$  °C. Будемо складові криві для нової оптимальної різниці температур (рис. 5).

Ми бачимо, що пінч локалізується на температурі для гарячих потоків, рівною 119 °C, і відповідно для холодних потоків – 114 °C.

Потужність рекуперації теплової енергії збільшується до 578,5 кВт. Гарячі утиліти зменшуються до 3 766 кВт, а холодні до 570,35 кВт.

У таблиці 2 представлені результати можливої економії енергії при зменшенні  $\Delta T_{min}$  в системі теплообміну досліджуваного підприємства.

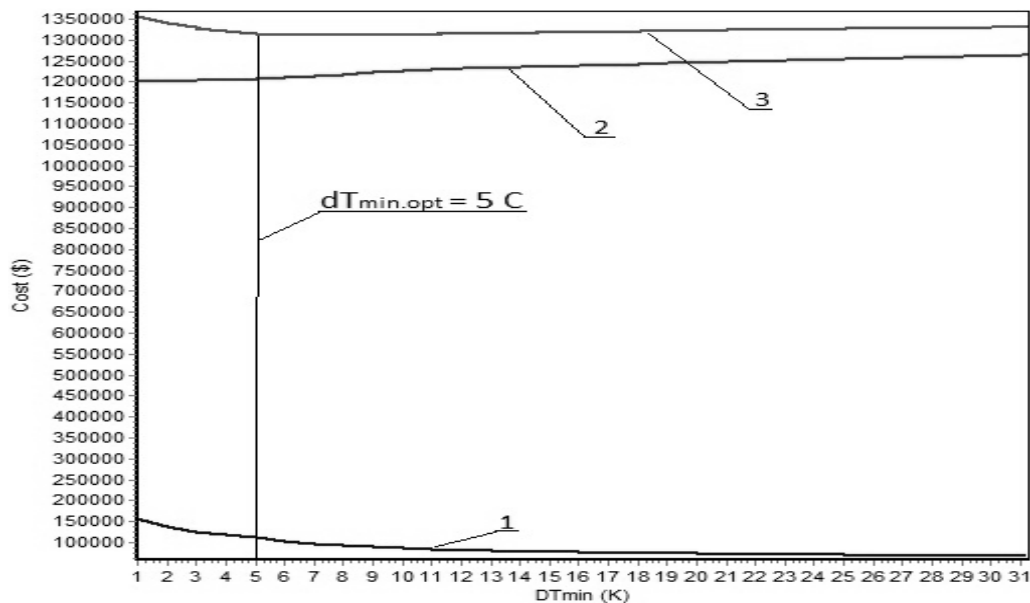


Рисунок 4 – Вартісні криві  
 1 – вартість капітальних вкладень; 2 – вартість зовнішніх енергоносіїв;  
 3 – загальна вартість проекту;  $\Delta T_{\min, \text{opt}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$

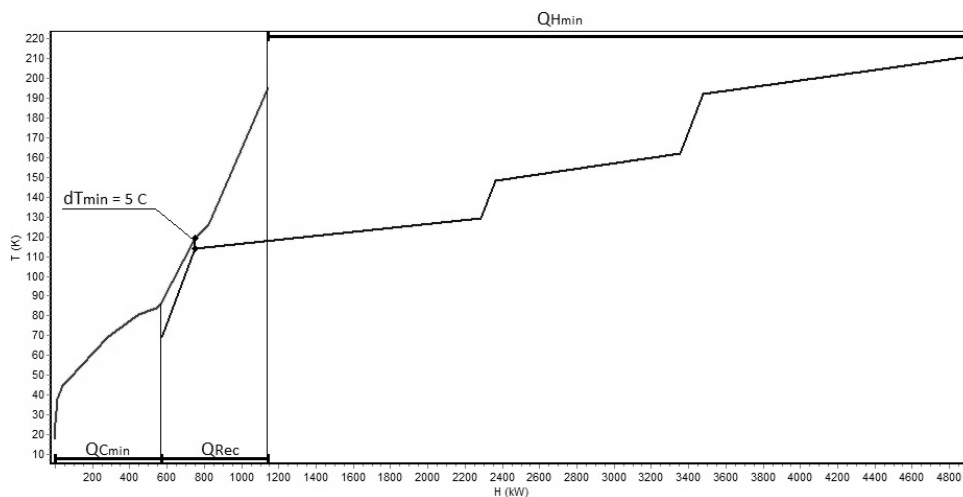


Рисунок 5 – Складові криві інтегрованого процесу

Таблиця 3 – Порівняння енергетичних характеристик існуючої і запропонованої у проекті реконструкції системи теплообміну установки

	Існуючий процес, кВт	Інтегрований процес, кВт
Гарячі утиліти	4 056,42	3 766,00
Холодні утиліти	789,52	570,35
Рекуперация	352,94	578,50

**Висновки.** В результаті обстеження процесів стабілізації та поділу гідроеалкілату на установці виробництва бензолу були виявлені недоліки існуючої системи теплообміну, котрі призводять до нераціонального енергоспоживання. Досягнена мінімальна різниця температур між холодною і гарячою складовими кривими, що дозволяє зменшити енергоспоживання на установці на 225,5 кВт, в порівнянні з існуючою.



**Подяка.** Автори дякують Європейському Співтовариству за фінансову підтримку в рамках проекту ЕС "Distributed Knowledge-Based Energy Saving Networks" – DISKNET (FP7-PEOPLE-2011-IRSES-294933)

Література

1. Ukraine policy review. [електронний ресурс] // International Energy Agency. Режим доступу: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Ukraine2012\\_free.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Ukraine2012_free.pdf) accessed 08.05.2015.
2. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р.Смит, Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев – Харьков: ХГПУ, 2000. – 457 с.
3. Ульев Л.М. Экстракция данных для пинч-интеграции процессов выделения бензол-толуол-ксилольной фракции, гидрирования, гидрообессеривания и гидротермопереработки установки производства бензола / Л.М. Ульев, М.В. Ильченко // Тези доп. 22-ї міжнар. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (MicroCAD–2014), 21-23 травня 2014 р. / ред. Л. Л. Товажнянський. – Харків : НТУ "ХПІ", 2014. – с. 47.
4. Ульев Л.М. Экстракция данных для пинч-анализа процессов выделения бензол-толуол-ксилольной фракции и гидродеалкилата в производстве бензола / Л.М. Ульев, О.А. Яценко, М.В. Ильченко // Наукові праці ОНАХТ.– Одесса: 2014. – Вип. 45.–Том. 3.– с. 125–130.
5. Ульев Л.М. Энергозберігаючий потенціал процесів виділення бензол-толуол-ксилольної фракції та гідродеквалітата в процесі виробництва бензолу / Л.М. Ульєв, О.О. Яценко, М.В. Ільченко // НТУ "ХПІ". Харків: НТУ "ХПІ". – 2014. – №49 (1091). – с. 116–124.
6. Ульев Л.М. Энергосберегающий потенциал процессов выделения бензол-толуол-ксилольной фракции, гидрирования, гидрообессеривания и гидротермопереработки установки производства бензола / Л.М. Ульев, М.В. Ильченко // Тези доп. 23-ї міжнар. Наук.-практ. Конф. "Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (MicroCAD–2015), 20–22 травня 2015 р. / ред. Л.Л. Товажнянський. – Харків : НТУ "ХПІ", 2015. – с. 308.
7. Nordman R. New process integration methods for heat-saving retrofit projects in industrial systems. Thesis for the degree of doctor of philosophy / R. Nordman – Goteborg: Printed by Chalmers Reproservice, Sweden. 2005. – p. 77.
8. Linnhoff B. User guide on process integration for the efficient use of energy / B. Linnhoff, D.W. Townsend, et al. – Rugby, UK. 1994. – p. 247.
9. Andreja Nemet. Heat Integration retrofit analysis – an oil refinery case study by Retrofit Tracing Grid Diagram / Andreja Nemet, Jiří Jaromír Klemesš, Petar Sabeв Varbanov, Valter Mantelli // Frontiers of Chemical Science and Engineering. – 2015. Volume 9. Issue 2. P. 163–182.
10. Leonid M. Ulyev, Petro A. Kapustenko, Liana A. Melnykovskaya, Darina D. Nechyporenko The Precise Definition of the Payload Tube Furnaces for Units of Primary Oil Reforming // Chemical Engineering Transaction. – 2013, – Vol. 35. – P. 247–252.
11. Ульєв Л.М. Программное обеспечение для проектирования теплообменных сетей / Л.М. Ульєв, О.А. Яценко // Вестник НТУ "ХПІ". – 2012. – №10. – с. 61–72.

Bibliography (transliterated)

1. Ukraine policy review. [elektronnyiy resurs]. International Energy Agency. Rezhim dostupu: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Ukraine2012\\_free.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Ukraine2012_free.pdf) accessed 08.05.2015.
2. Smit R. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov. R. Smit, Y. Klemesh, L.L. Tovazhnyanskyu, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev – Harkov: HGPU, 2000. – 457 p.
3. Ulyev L.M. Ekstraktsiya dannyih dlya pinch-integratsii protsessov vyideleniya benzol-toluol-ksilolnoy fraktsii, gidrirovaniya, gidroobesserivaniya i gidrotermopererabotki ustanovki proizvodstva benzola. L.M. Ulyev, M.V. Ilchenko. Tezi dop. 22-Yi mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Informatsiyni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya" (MicroCAD–2014), 21–23 travnya 2014 y. / red. L.L. Tovazhnyanskyu. – Harkiv : NTU "HPI", 2014. – p. 47.
4. Ulyev L.M. Ekstraktsiya dannyih dlya pinch-analiza protsessov vyideleniya benzol-toluol-ksilolnoy fraktsii i gidrodealkilata v proizvodstve benzola. L.M. Ulyev, O.A. Yatsenko, M.V. Ilchenko. Naukovi pratsi ONAHT. – Odessa: 2014. – # 45.–Tom. 3. – p. 125–130.
5. Ulyev L.M. Energozberigayuchiy potentsial protsesiv vidilennya benzol-toluol-ksilolnoyi fraktsiyi ta gidrodealkilata v protsesi virobnytstva benzolu. L.M. Ulyev, O.O. Yatsenko, M.V. Ilchenko. NTU "HPI". Harkiv: NTU "HPI". – 2014. – #49 (1091). – p. 116–124.
6. Ulyev L.M. Energosberigayuschiy potentsial protsessov vyideleniya benzol-toluol-ksilolnoy fraktsii, gidrirovaniya, gidroobesserivaniya i gidrotermopererabotki ustanovki proizvodstva benzola. L.M. Ulyev, M.V.

Ilchenko. Tezi dop. 22-Yi mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Informatsiyni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya" (MicroCAD–2014), 20–22 travnya 2015 y. / red. L.L. Tovazhnyansky. – Harkiv : NTU "HPI", 2015. – p. 308.

7. Nordman R. New process integration methods for heat-saving retrofit projects in industrial systems. Thesis for the degree of doctor of philosophy / R. Nordman – Goteborg: Printed by Chalmers Reproservice, Sweeden. 2005. – p. 77.

8. Linnhoff B. User guide on process integration for the efficient use of energy. B. Linnhoff, D.W. Townsend, et al. – Rugby, UK. 1994. – p. 247.

9. Andreja Nemet. Heat Integration retrofit analysis – an oil refinery case study by Retrofit Tracing Grid Diagram. Andreja Nemet, Jiří Jaromír Klemeš, Petar Sabev Varbanov, Valter Mantelli. Frontiers of Chemical Science and Engineering. – 2015. Volume 9. Issue 2. P. 163–182.

10. Leonid M. Ulyev, Petro A. Kapustenko, Liana A. Melnykovskaya, Darina D. Nechyporenko The Precise Definition of the Payload Tube Furnaces for Units of Primary Oil Reforming. Chemical Engineering Transaction. – 2013, – Vol. 35. – P. 247–252.

11. Ulyev L.M. Programmnoe obespechenie dlya proektirovaniya teploobmennyih setey. L.M. Ulyev, O.A. Yatsenko. Vestnik NTU "KhPI". – 2012.– # 10. – p. 61–72.

УДК 547.53

Ульєв Л.М., Петар Варбанов, Ильченко М.В.

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРОЦЕССОВ СТАБИЛИЗАЦИИ И РАЗДЕЛЕНИЯ ГИДРОДЕАЛКИЛАТА НА УСТАНОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА БЕНЗОЛА**

Работа посвящена исследованию и обработке результатов обследования установки производства бензола. Определены предпосылки для минимизации использования внешних энергоносителей за счет максимизации рекуперации теплоты в рамках рассматриваемой энерготехнологической системы. В статье приводится краткое описание процесса стабилизации и разделения гидродеалкилата. На основе рассмотренной технологической схемы производства проведен анализ данных энергопотребления и определены перспективы для пинч-интеграции установки.

Ulyev L.M., Petar Varbanov, Ilchenko M.V.

#### **ENERGY SAVING POTENTIAL DEFINITION OF PROCESSES OF STABILIZATION AND SEPARATION HYDRODEALKILATE ON BENZENE PRODUCTION UNIT**

The work is devoted to research and treatment of data obtained of benzene production unit. The pre-conditions for minimizing the use of external energy sources due to the maximization of heat recovery in the framework of this energy-technological system are determined. This article provides a brief description of the process of stabilization and hydrodealkilate separation. Based on the review of the technological scheme of production, the analysis of energy consumption is given and the perspectives for a pinch-integration system are identified.

УДК 612.461.2

Ульєв Л.М., Шумакова О.А., Варбанов П.С., Шпилька В.Н.

### УВЕЛИЧЕНИЕ МОЩНОСТИ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА КАРБАМИДА

В условиях роста стоимости энергии производственные предприятия постоянно ищут более разумные и рациональные пути использования уже имеющихся в их распоряжении энергетических ресурсов. Одним из таких путей является утилизация тепла. Под влиянием топливного кризиса начала 1970-х годов предприятия с большим уровнем энергопотребления стали заниматься оценкой общего энергетического баланса и изыскивать потенциальные возможности экономии энергии.

Ежегодные затраты на оплату энергии для крупного химического или нефтеперерабатывающего завода могут превышать 100 млн. евро. При осуществлении инвестиций в модернизацию (включая систему управления энергопотреблением), по самой осторожной оценке, экономия энергии может составить 10 % при сроке окупаемости затрат менее трех лет [1].

Повышение эффективности использования энергии – обычно наиболее дешевый, быстрый и экологически безопасный способ справиться с энергетическими потребностями во всем мире. Повышенная эффективность использования энергии снижает потребность в инвестировании в новые ее источники. Таким образом, решения по повышению эффективности использования энергии будут приносить прибыль, и они будут и в дальнейшем окупать себя на протяжении всего срока эксплуатации за счет уменьшения расходов на энергоснабжение.

Системный подход к управлению энергопотреблением в промышленности сможет помочь в принятии верного решения и осуществлении инвестиций. Кроме того, методы анализа, позволяющие определить конкретные места размещения и оптимизировать характеристики оборудования для утилизации тепла, в настоящее время настолько хорошо разработаны, что нет причин их не использовать.

Пинч-анализ является основным способом определения мест технологического процесса производства, в которых можно минимизировать уровень энергопотребления. Использование этого метода позволяет снизить удельное энергопотребление на 30–50 % и значительно снизить капитальные затраты при создании новых предприятий [2].

Выбрать наиболее приемлемый для предприятия способ утилизации тепла не так просто. При проведении различных химических технологических процессов имеется ряд потоков, подлежащих нагреву, и ряд – охлаждению. Необходимо обеспечить максимальную степень утилизации тепла, чтобы сэкономить энергию и уменьшить размеры систем вспомогательного обеспечения.

В процессе производства карбамида имеется 14 потоков энергии различного типа (табл. 1). Наличие способа, позволяющего рассчитать и правильно организовать процесс теплообмена между этими потоками, является ключевым моментом в деле энергосбережения. В таблице 1 представлены основные параметры технологического процесса: начальная и конечная температуры ( $T_S$  и  $T_T$ , °C), теплота парообразования ( $r$ , кДж /кг), потоковая теплоемкость ( $CP$ , кВт/К) и нагрузка на поток ( $\Delta H$ , кВт).

В работе [3, 4], в результате исследования технологической схемы и построения сеточной диаграммы существующего процесса была рассчитана тепловая мощность рекуперативных теплообменных аппаратов, которая составила 1118,9 кВт.

С помощью программного обеспечения, входящего в состав пакета PINCH 2.02, которое базируется на основных принципах и правилах пинч-анализа [4], построим составные кривые для технологических потоков, представленных в табл. 1. Расположение кривых должно быть таким, чтобы интервал перекрытия между ними составлял рассчитанную величину рекуперации мощности.

Составные кривые существующей установки процесса производства карбамида отображены на рис. 1.

На рисунке 1 видно, что при  $\Delta T_{\min} = 74$  °C мощность рекуперации  $Q_{Rec} = 1118,9$  кВт. Для того чтобы нагреть холодные потоки нужно подвести тепловую энергию, равную 8219,1 кВт ( $Q_{Hmin}$ ), соответственно для охлаждения горячих потоков отвести тепловую энергию, равную 64697 кВт ( $Q_{Cmin}$ ). Для этого предприятие тратит каждый год 5434900 долл. США, из них 3041100 долл. США на горячие утилиты и 2393800 долл. США на холодные утилиты.

Чтобы оптимально интегрировать процесс производства грануляции, выясним наиболее важные экономические показатели, которые влияют на приведенную стоимость выполненного проекта.

Во-первых, внедрение проекта предприятие несет капитальные вложения, которые связаны, прежде всего, с закупкой оборудования и его монтажом.

Таблица 1 – Система потоков для анализа энергопотребления процесса производства карбамида

№	Название потока	Тип	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_T, ^\circ\text{C}$	$r,$ кДж/кг	$CP,$ кВт/К	$\Delta H,$ кВт
1	Реакционная смесь из R-201	гор	183	160		48,7	1120,1
2.1	Конденсация газов из R-201	гор	183	183	1563		5693
2.2	Газы из R-201	гор	183	68,7		9,38	1072,1
3.1	Конденсация газовой смеси из R-201	гор	102,9	102,9	1357		5642
3.2	Газовая смесь из R-201	гор	102,9	68,4		6,41	217,3
4	Теплота абсорбции из C-304	гор	59,4	40		11	213,4
5	Пары аммиака в E-701	гор	90,3	42		1,84	88,9
6.1	Соковый пар в E-702	гор	129,8	100		8,16	243,17
6.2	Конденсация сокового пара	гор	100	100	3839		16507,7
6.3	Соковый конденсат в E-702	гор	100	42		149,47	8669,26
7.1	Соковый пар в E-703	гор	133,8	100		4,88	189,34
7.2	Конденсация сокового пара	гор	100	100	3832		9809,2
7.3	Соковый конденсат в E-703	гор	100	40		90,98	5458,8
8.1	Соковый пар в E-704	гор	109	100		2,46	22,14
8.2	Конденсация сокового пара	гор	100	100	3794		4932,2
8.3	Соковый конденсат в E-704	гор	100	42		44,71	2593,18
9.1	Соковый пар в E-705	гор	116,5	100		1,02	16,83
9.2	Конденсация сокового пара	гор	100	100	4037		2179,98
9.3	Соковый конденсат в E-705	гор	100	40		18,84	1130,4
10	Диоксид углеводорода	хол	100	180		13,97	1117,6
11	Реакционная смесь в R-201	хол	106,8	167,3		81,49	4930,15
12	Разложение карбамата	хол	110,4	135		54,53	1341,44
13	Раствор карбамиду на 1 ст	хол	90,3	130		42,64	1692,81
14	Раствор карбамиду на 2 ст	хол	130	140		23,95	239,5

Капитальную стоимость одного теплообменного аппарата можно определить выражением [5–7]:

$$\text{Кап. стоимость} = A_T + B_T \cdot S^c$$

где  $A_T$  – стоимость установки одного теплообменного аппарата,  $A_T = 20000$  долл. США;  $B_T$  – коэффициент, эквивалентный стоимости 1 м<sup>2</sup> площади поверхности теплообмена,  $B_T = 2000$  долл. США;  $S$  – площадь поверхности теплообмена;  $c$  – коэффициент, отражающий нелинейную зависимость стоимости теплообменника от величины его поверхности,  $c = 0,87$ .

Во-вторых, необходимо учесть затраты на энергию.

Стоимость горячих утилит, использованных в процессе, примем равной 370 долл. США за 1 кВт год, с учетом того, что в году 8000 рабочих часов. Стоимость холодных утилит принимаем на порядок меньшей, то есть 0,1 стоимости горячих утилит, что дает значения 37,0 долл. США за 1 кВт год.

Расчет дисконтированных величин стоимостей проекта позволяет определить значение оптимальной разности температур между теплоносителями в будущей системе рекуперации тепловой, а также рассчитать минимальные затраты на проектирование (рис. 2).

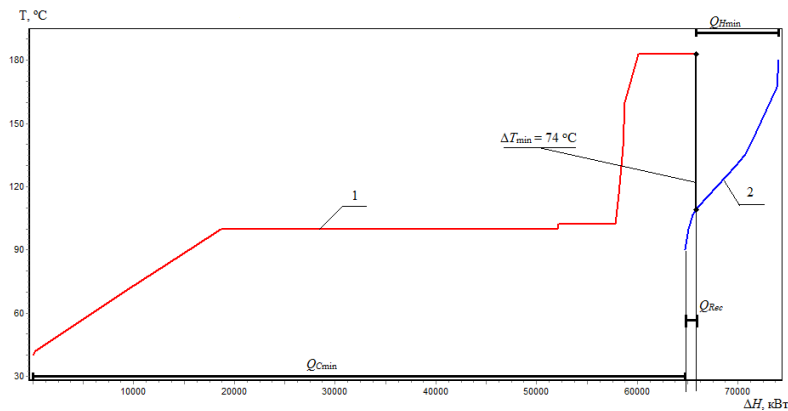


Рисунок 1 – Составные кривые существующего процесса производства карбамида  
 1, 2 – составные кривые горячих и холодных технологических потоков;  
 $Q_{Hmin}$  – целевая величина горячих утилит;  $Q_{Cmin}$  – целевая величина холодных утилит;  
 $Q_{Rec}$  – мощность рекуперации

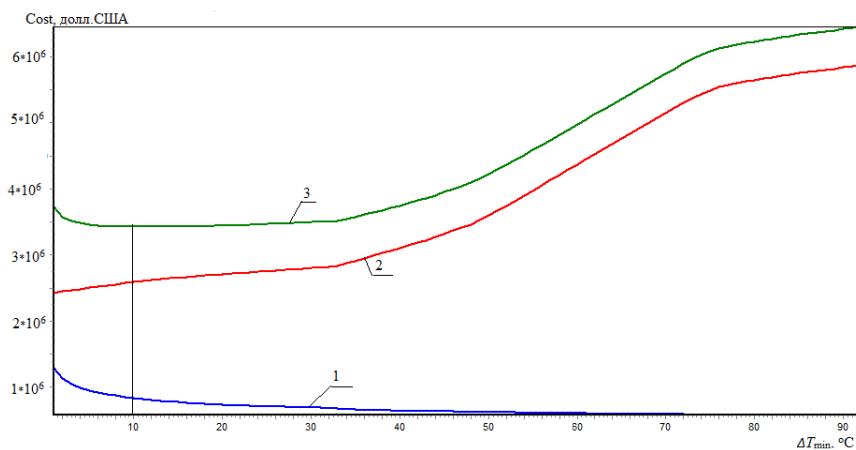


Рисунок 2 – Стоимостные кривые  
 1 – инвестиции в оборудование, 2 – затраты на энергию, 3 – общая стоимость

Анализ области локализации  $\Delta T_{min}$  показывает нам, что при выборе величины  $\Delta T_{min} = 10$  °C теплообменная система существующего процесса будет работать в экономически оптимальном режиме, минимальные затраты на проектирования составят 3427000 долл. США.

Сдвинутые технологические потоки интегрированного процесса при  $\Delta T_{min} = 10$  °C представлены на рис. 3.

На рисунке 3 видно, что при  $\Delta T_{min} = 10$  °C мощность рекуперации  $Q_{Rec} = 7526,46$  кВт. Для того чтобы нагреть холодные потоки нужно подвести тепловую энергию, равную 1232,7 кВт ( $Q_{Hmin}$ ), соответственно для охлаждения горячих потоков отвести тепловую энергию, равную 2591400 кВт ( $Q_{Cmin}$ ). Для этого предприятие тратит каждый год 2591400 долл. США, из них 456080 долл. США на горячие утилиты и 2135300 долл. США на холодные утилиты.

Наглядно энергосберегающий потенциал процесса приведен в таблице 2.

Эффективность работы интегрированного процесса производства гранулированного карбамида оценивается не только чисто экономическими показателями. К факторам эффективности необходимо отнести такие показатели как влияние производства на окружающую среду [8], т.е. экологический фактор, факторы надежности и технологической безопасности, простоту контроля технологических линий и управления процессами, а также гибкость используемого способа производства по отношению к внешним и внутренним возмущающим воздействиям.

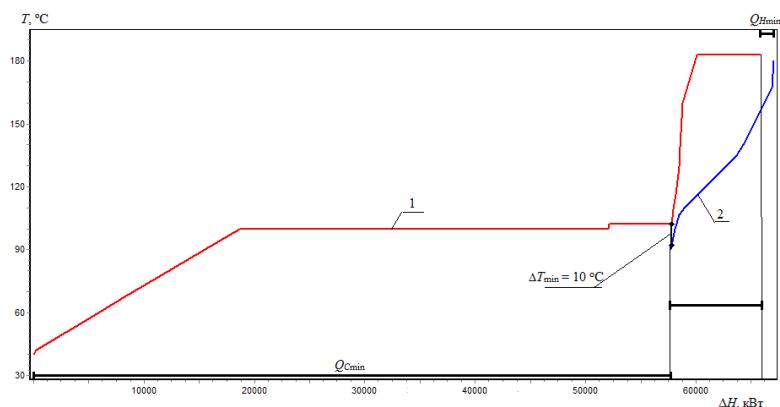


Рисунок 3 – Составные кривые интегрированного процесса производства карбамида  
 1, 2 – составные кривые горячих и холодных технологических потоков;  
 $Q_{Hmin}$  – целевая величина горячих утилит;  $Q_{Cmin}$  – целевая величина холодных утилит;  
 $Q_{Rec}$  – мощность рекуперации

Таблица 2 – Сравнение энергетической эффективности до и после интеграции

Основные параметры:	Существующий процесс	Интегрированный процесс	Уменьшение энергопотребление
$\Delta T_{min}, ^\circ C$	74	10	–
$Q_{Rec}, кВт$	1118,9	7526,46	–
$Q_{Hmin}, кВт$	8219,1	1232,7	на 15%
$Q_{Cmin}, кВт$	64697	57711	на 89 %
Затраты на энергию, долл. США	5434900	2591400	в 2,1 раза

**Выводы и перспективы дальнейшего развития данного направления.** При обследовании процесса производства карбамида до поступления на грануляцию были выявленные существенные недостатки существующей теплообменной системы, которые приводят к увеличению энергопотребления. Так как стоимость на энергоносители с каждым годом возрастает, а их количество на земле уменьшается, то возникла необходимость сокращать потребление энергоносителей и увеличить мощность рекуперации теплоты. Теплоэнергетическая интеграция процесса позволит снизить энергопотребление горячих и холодных утилит на 6986,4 кВт, что составляет экономию 15 % по горячим и 89 % по холодным утилитам.

**Благодарность:** Авторы благодарят Европейское Сообщество за финансовую поддержку в рамках проекта ЕС "Distributed Knowledge-Based Energy Saving Networks" – DISKNET (FP7-PEOPLE-2011-IRSES-294933).

#### Литература

1. Экологический Ответ. Технические решения [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://eco-answer.ru/новое-мышление/>.
2. Капустенко П.А. Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы / П.А. Капустенко, А.К. Кузин, Е.Л. Макаровский, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, Л.М. Ульев, Е.Б. Черная. – Харьков: ООО «Издательский дом» Вокруг света». – 2004.– 312 с.
3. Ульев Л.М. Экстракция даних процесу виробництва карбаміду / Л.М. Ульєв, О.О. Яценко, В.М. Шпилька // Наукові праці ОНАХТ – Одесса: 2015 –подано до друку.
4. Ульев Л.М. Экстракция данных для пинч-интеграции процесса производства карбамида / Л.М. Ульев, О.А. Яценко, В.Н. Шпилька // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, Ч-П (20–22 травня 2015 р, Харків). – Харків: НТУ «ХПІ». – с. 311.
5. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев. – Харьков: ХГПУ, 2000. – 457 с.
6. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Пластинчатые теплообменники в промышленности / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, О.П. Арсеньева. – Х.: НТУ «ХПІ», 2004. – 232 с.

7. Ульєв Л.М. Определение энергосберегающего потенциала на установке АК-70 с помощью pinch-анализа / Л.М.Ульєв, О.А. Яценко // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса:2013.– Вип. 43.–том 1.– с. 11–15.
8. Klemes J.J. Process intensification and integration: an assessment / J.J. Klemes, P.S. Varbanov // Clean Technologies and Environmental Policy– June 2013–Vol. 15.– p. 417–422.

Bibliography (transliterated)

1. Ekologicheskii Otvet. Tehnicheskie resheniya [Elektronnyi resurs] Rezhim dostupa: <http://ecoanswer.ru/novoe-myishlenie/>.
2. Kapustenko P.A. Alternativnaya energetika i energosberezhenie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy. P.A. Kapustenko, A.K. Kuzin, E.L. Makarovskiy, L.L. Tovazhnianskiy, L.M. Ulyev, E.B. Chernaya. – Kharkov: OOO «Izdatelskiy dom» Vokrug sveta». –2004.– 312 p.
3. Ulyev L.M. Ekstraktsiya danih protsesu virobnitstva karbamidu. L.M. Ulyev, O.O. Yatsenko, V.M. Shpilka. Naukovi pratsi ONAHT – Odessa:2015 –podano do druku.
4. Ulyev L.M. Ekstraktsiya danih dlya pinch-integratsii protsesa proizvodstva karbamida. L.M. Ulyev, O.A. Yatsenko, V.N. Shpilka. Informatsiyni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorovya: Tezi dopovidey mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferentsii, part-II (20–22 may 2015, Kharkov). – Kharkov: NTU «KhPI». – p. 311.
5. Smit R. Osnovyi integratsii teplovyih protsesov. R. Smit, Y. Klemesh, L.L. Tovazhnianskiy, P. A. Kapustenko, L.M. Ulyev. – Kharkov: KhGPU, 2000. – 457 p.
6. Tovazhnianskiy L.L. Plastinchatye teploobmenniki v promyshlennosti. L.L. Tovazhnianskiy, P.A. Kapustenko, G.L. Havin, O.P. Arseneva. – H.: NTU «KhPI», 2004. – 232 p.
7. Ulyev L.M. Opredelenie energosberegayuschego potentsiala na ustanovke АК-70 s pomoschyu pinch-analiza. L.M. Ulyev, O.A. Yatsenk. Naukovi pratsi ONAHT. – Odessa:2013. – Vol. 43.– tom 1.– p. 11–15.
8. Klemes J.J. Process intensification and integration: an assessment. J.J. Klemes, P.S. Varbanov. Clean Technologies and Environmental Policy– June 2013–Vol. 15.– p. 417–422.

УДК 612.461.2

Ульєв Л.М., Шумакова О.О., Петар Варбанов, Шпилька В.М.

**ЗБІЛЬШЕННЯ ПОТУЖНОСТІ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА**

Метою даного проекту є обстеження процесу виробництва карбаміду до вступу на грануляцію. Були виявлені істотні недоліки існуючої теплообмінної системи, які призводять до збільшення енергоспоживання. Так як вартість на енергоносії з кожним роком зростає, а їх кількість на землі зменшується, то виникла необхідність скорочувати споживання енергоносіїв і збільшити потужність рекуперації теплоти. Теплоенергетична інтеграція процесу дозволить знизити енергоспоживання гарячих і холодних утиліт на 6986,4 кВт, що складає економію 15 % по гарячих і 89 % по холодних утиліт.

Ulyev L.M., Shumakova O.O., Petar Varbanov, Shpilka V.N.

**INCREASE THE CAPACITY OF THE HEAT RECOVERY IN THE PRODUCTION PROCESS OF UREA**

The purpose of this project is to survey the process of production of urea prior to granulation. The shortcomings of the existing heat exchanger system were detected. They lead to higher energy consumption. The cost for energy is growing every year, and their number on the ground is reduced. Therefore there was a need to reduce energy consumption and increase the capacity of heat recovery. Heat integration of the process will reduce the consumption of hot and cold utilities on 6986,4 kW which is a saving of 15 % on hot and 89 % cold utilities.



**НЕЙТРАЛИЗАТОР ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ДВС С КАТАЛИЗАТОРОМ  
НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ НОСИТЕЛЕ**

**Проблема токсичности отработавших газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС).** Промышленная деятельность человека и значительно увеличившееся количество автомобильного транспорта в последнее время приводит к росту заболеваемости среди населения крупных городов, снижению адаптационных способностей организма людей. Проведенные исследования [1–6] показали, что загрязнение окружающей среды, а именно воздушного бассейна городов, вызванное выбросами в атмосферу отработавших газов ДВС, приводят к снижению общего иммунитета, развитую аллергических заболеваний и даже к снижению интеллектуальных способностей населения.

К сожалению, также получили распространение неизвестные ранее такие явления, как фотохимический смог, кислотные дожди, вызывающие определенные проблемы репродуктивного здоровья населения. Эти негативные для здоровья человека проблемы связаны не в последнюю очередь с растущими выбросами в атмосферу вредных веществ от транспорта, теплоэнергетических установок, промышленных объектов, активными урбанизационными явлениями, увеличением промышленных выбросов и выбросов отработанных газов автомобильным транспортом [7, 8].

Основным загрязнителем окружающей среды в целом и атмосферы в частности в крупных городах является автомобильный транспорт.

**Способы уменьшения токсичности выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания.** Объем и токсичность выхлопных газов зависят от особенностей конструкции двигателя внутреннего сгорания, от состава топлива и наличия в нем различных присадок, а также от режима эксплуатации двигателя. Это позволяет выделить основные подходы к уменьшению как объема выбросов, так и их токсичности, а именно:

- совершенствование старых конструкций двигателей и разработка новых с учётом требований к их экологичности [9, 10];
- разработка новых присадок к существующим типам топлива [11];
- разработка аппаратов для физико-химической нейтрализации уже образовавшихся токсичных соединений [12].

За счёт простоты аппаратного оформления, пригодности к использованию независимо от типа используемого типа топлива и особенностей конструкции двигателя внутреннего сгорания широкое распространение получила каталитическая нейтрализация отходящих газов двигателей внутреннего сгорания транспортных средств.

**Создание каталитически активного покрытия на металлическом носителе.** В соответствии с предложенной нами методикой [13] были синтезированы каталитически активные покрытия на носителях типа фольга сплава H80X20. Исследования синтезированного покрытия с помощью атомно-силовой микроскопии показало наличие кристаллических структур на поверхности каталитического покрытия (рис. 1, рис. 2). Кристаллические структуры, погружены в аморфную стеклокристаллические фазу, способствуют увеличению удельной поверхности каталитического покрытия, а также являются концентраторами каталитически активных центров гетерогенно-каталитического процесса конверсии органических соединений и оксида углерода.

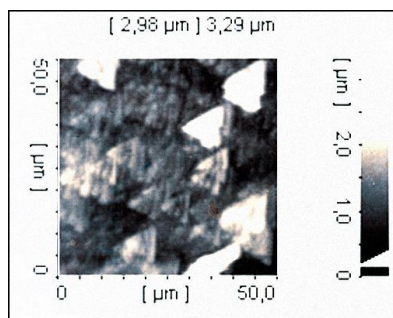


Рисунок 1 - Синтезированное каталитически активное покрытие на носителях типа фольга сплава H80X20 (атомно-силовая микроскопия, фронтальная проекция)

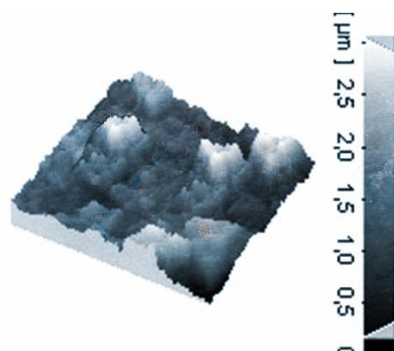


Рисунок 2 - Синтезированное каталитически активное покрытие на носителях типа фольга сплава H80X20 (атомно-силовая микроскопия, изометрия)

Профилограмма синтезированного каталитически активного покрытия на носителях типа фольга сплава H80X20 свидетельствует о значительном осложнении микрорельефа поверхности катализатора (рис. 3). Данные, приведённые на рис. 3 позволяют получить истинное значение площади поверхности каталитически активного покрытия и ввести соответствующие корректировки в разработанные нами математические модели конверсии вредных газовых выбросов на стеклокристаллических каталитических покрытиях, лежащие в основе проектирования опытного образца блока каталитической конверсии.

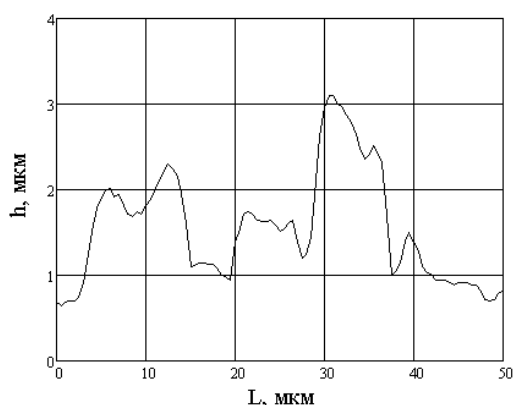


Рисунок 3 - Профилограмма каталитически активного покрытия на носителях типа фольга сплава H80X20

Таблица 1 - Геометрические характеристики каталитически активного покрытия на носителях типа фольга сплава H80X20

Наименование покрытия	Длина профиля покрытия $\Sigma$ , мкм	Линейный коэффициент увеличения поверхности покрытия $\sigma_L$	Коэффициент увеличения площади поверхности покрытия $\sigma_S$
Каталитически активное покрытие на носителях типа фольга сплава H80X20	52,757	1,055	1,113

В соответствии с созданной нами математической моделью процесса конверсии вредных газовых выбросов [14] и разработанным методом синтеза катализаторов был спроектирован и изготовлен блок каталитического преобразователя отработавших газов двигателя внутреннего сгорания.

Для оценки эксплуатационных характеристик изготовленного на основе модели процесса очистки и предложенного катализатора блока каталитического преобразователя были проведены сравнительные испытания его эксплуатационных характеристик с новым, выпущенным в США, каталитическим нейтрализатором Bosal 099-886, предназначенным для нейтрализации отходящих газов автомобильных двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием рабочим объемом до 1300 см<sup>3</sup>. Испытания были проведены на стендовом двигателе ВАЗ-21081.

**Технические характеристики стендового двигателя ВАЗ-21081.** Двигатель ВАЗ-21081 в штатном исполнении является четырехтактным, бензиновым, карбюраторным с рабочим объемом 1100 см<sup>3</sup>, степень сжатия 9.0. Номинальная мощность двигателя 40 кВт при частоте вращения коленчатого вала  $n=5\ 600\ \text{мин}^{-1}$ . Максимальный крутящий момент 77.9 Н·м при  $n=3400\ \text{мин}^{-1}$ . В качестве топлива использовался бензин А-95. Экспериментальные исследования конверсии газовых выбросов двигателя ВАЗ-21081 было проведено на базе исследовательского моторного стенда кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Моторный стенд оснащен погрузочным устройством, системой подачи топлива, системы выпуска отработанных газов с каталитическим преобразователем, водной и воздушной системами охлаждения, органов управления и измерительной аппаратурой.

**Результаты сравнительных испытаний.** Проведенные экспериментальные исследования позволили получить данные, представленные в графической форме в виде зависимостей начального (до каталитического нейтрализатора) и остаточного (после него) содержания углеводородов и оксида углерода (II) от мощности, развиваемой двигателем при частоте вращения коленчатого вала  $3600\ \text{мин}^{-1}$ .

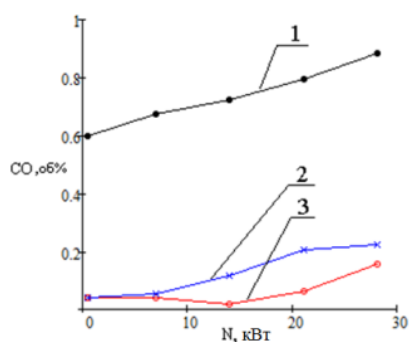


Рисунок 4 - Содержание CO, об.%, в отработавших газах двигателя ВАЗ-21081 до очистки (1), после конверсии: в нейтрализаторе Bosal 099-886 (2) и в разработанном нейтрализаторе (3) в зависимости от мощности двигателя при частоте вращения коленчатого вала  $n=3600\ \text{мин}^{-1}$

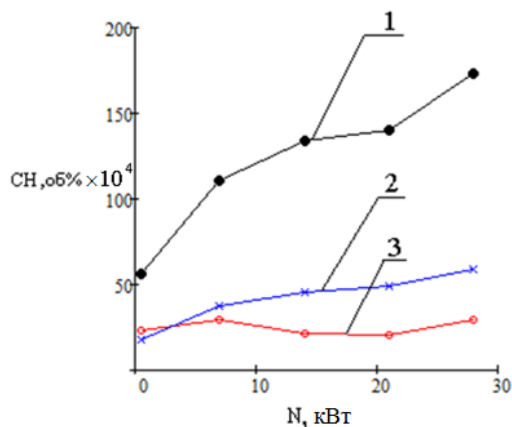


Рисунок 5 - Содержание CH₄, об.%, в отработавших газах двигателя ВАЗ-21081 до очистки (1), после конверсии: в нейтрализаторе Bosal 099-886 (2) и в разработанном нейтрализаторе (3) в зависимости от мощности двигателя при частоте вращения коленчатого вала  $n=3600\ \text{мин}^{-1}$

**Выводы.** В соответствии с предлагаемыми нами методиками было синтезировано каталитически активное покрытие на металлическом носителе и спроектирован блок каталитической нейтрализации отходящих газов двигателей внутреннего сгорания. Стендовые сравнительные испытания показали более высокую степень очистки отходящих газов ДВС от монооксида углерода и углеводородов в случае использования разработанного нами блока каталитической нейтрализации по сравнению с промышленным аналогом марки Bosal 099-886.

**Благодарность.** Работа выполнена при поддержке Европейской комиссии, проект DISKNET PIRSES-GA-2011-294933.

Литература

1. Ёркина Н.В. Здоровье населения в контексте экологического мониторинга воздушной среды урбо-системы / Н.В. Ёркина // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. – 2012. – Т. 25 (64), № 1. – С. 75–83.
2. Димань Т.М. Екологія людини : [підручник] / Димань Т.М. – К. : Академія, 2009. – 376 с.
3. Розенберг Г.С. Комплексный анализ урбоэкологических систем (на примере городов Самарской области) / Г.С. Розенберг // Экология. – 1993. – № 4. – С. 13–19.
4. Яницкий О.Н. Экология города. Зарубежные междисциплинарные концепции / Яницкий О.Н. – М.: Наука, 1984. – 240 с.
5. Мазинг В.В. Экосистема города, ее особенности и возможности оптимизации / В.В. Мазинг // Экологические аспекты городских экосистем. – Минск, 1984. – С. 181–191.
6. Стольберг Ф.В. Экология города / Стольберг Ф.В. – Киев : Либра, 2000. – 464 с.
7. Чаплинский Р.Ю. Применение плазменной электроники и фотоники для улучшения экологии дизельных двигателей / Р.Ю. Чаплинский, А.И. Кузьмичёв, О.Д. Вольпян, А.В. Лецишин, Г.Н. Веремейченко // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2010. – № 3. – С. 96–100.
8. Марков В.А. Токсичность отработанных газов дизелей / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 376 с.
9. Кузнецов И.В. Экологические показатели серийного форкамерного ДВС: резервы улучшения / И.В. Кузнецов // Автомобил. пром-сть. – 2005. - № 4. - С. 9–11.
10. Кузнецов И.В. Совершенствование процесса смесеобразования в форкамерном ДВС с целью улучшения экологических и экономических показателей / И. В. Кузнецов // Экология и пром-сть России. – 2006. - № 9. - С. 22–25.
11. Ковалев В.В. Влияние неисправностей карбюраторного двигателя на состав отработавших газов: [Монография] / В. В. Ковалев, В. Н. Пензев, Токарев А. Н. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002. - 190 с.
12. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов — М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
13. Мамалис А.Г. Создание упорядоченных каталитически активных поверхностей для организации селективной последовательности многостадийных многомаршрутных химических реакций / А.Г. Мамалис, В.Е. Ведь, Е.В. Краснокутский // Вісник Національного технічного університету Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. С. 17–23.
14. Krasnokutskii E.V. Substantiating Reaction Mechanism Of Thermocatalytic Benzene Conversion / E.V. Krasnokutskii and V.E. Ved // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2013, Vol. 47, No. 1, pp. 60–65.

Bibliography (transliterated)

1. Yorkina N.V. Zdorove naseleniya v kontekste ekologicheskogo monitoringa vozduшной sredy urbo-sistemyi. N.V. Yorkina. Uchenyie zapiski Tavricheskogo natsionalnogo universiteta im. V.I. Vernad'skogo. – 2012. – T. 25 (64), # 1. – P. 75–83.
2. Diman T.M. Ekologiya lyudini : [pIdruchnik]. Diman T.M. – K. : Akademiya, 2009. – 376 p.
3. Rozenberg G.S. Kompleksnyiy analiz urboekologicheskikh sistem (na primere gorodov Samarskoy oblasti). G.S. Rozenberg. Ekologiya. – 1993. – # 4. – P. 13–19.
4. Yanitskiy O.N. Ekologiya goroda. Zarubezhnyie mezhdistsiplinarnyie kontseptsii. Yanitskiy O.N. – M.: Nauka, 1984. – 240 p.
5. Mazing V.V. Ekosistema goroda, ee osobennosti i vozmozhnosti optimizatsii. V.V. Mazing. Ekologicheskie aspektyi gorodskih ekosistem. – Minsk, 1984. – P. 181–191.
6. Stolberg F.V. Ekologiya goroda. Stolberg F.V. – Kiev : Libra, 2000. – 464 p.
7. Chaplinskiy R.Yu. Primenenie plazmennoy elektroniki i fotoniki dlya uluchsheniya ekologii dizelnyih dvigateley. R.Yu. Chaplinskiy, A.I. Kuzmichyov, O.D. Volpyan, A.V. Leschishin, G.N. Veremeychenko. Elektronika i svyaz. Tematicheskii vyipusk «Elektronika i nanotekhnologii». – 2010. – # 3. – P. 96–100.
8. Markov V.A. Toksichnost otrabotannyih gazov dizeley. V.A. Markov, R.M. Bashirov, I.I. Gabitov. – M.: MGTU im. N.E. Baumana, 2002. – 376 p.

9. Kuznetsov I.V. Ekologicheskie pokazateli seriynogo forkamernogo DVS: rezervyi uluchsheniya. I.V. Kuznetsov. Avtomobil. prom-st. – 2005. # 4. P. 9–11.

10. Kuznetsov I.V. Sovershenstvovanie protsessa smeseobrazovaniya v forkamernom DVS s tselyu uluchsheniya ekologicheskikh i ekonomicheskikh pokazateley. I.V. Kuznetsov. Ekologiya i prom-st Rossii. – 2006. # 9. P. 22–25.

11. Kovalev V.V. Vliyanie neispravnostey karbyuratornogo dvigatelya na sostav otrabotavshih gazov: [Monografiya]. V.V. Kovalev, V.N. Penzev, Tokarev A.N. Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2002. 190 p.

12. Zvonov V.A. Toksichnost dvigateley vnutrennego sgoraniya. V.A. Zvonov — M.: Mashinostroenie, 1973. – 200 p.

13. Mamalis A.G. Sozdanie uporyadochennykh kataliticheskikh aktivnykh poverhnostey dlya organizatsii selektivnoy posledovatelnosti mnogostadiynnykh mnogomarshrutnykh himicheskikh reaktsiy. A.G. Mamalis, V.E. Ved, E.V. Krasnokutskiy. Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu Harkivskiy politehnicniy institut». Zbirnik naukovih prats. Tematichniy vipusk «Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya». – Harkiv: NTU «HPI», 2010. P. 17–23.

14. Krasnokutskii E.V. Substantiating Reaction Mechanism Of Thermocatalytic Benzene Conversion. E.V. Krasnokutskii and V.E. Ved. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2013, Vol. 47, No. 1, pp. 60–65.

УДК 544.4:66.021.3

Краснокутський Є.В., Ведь В.Є., Петар Варбанов, Сатаєв М.І.

**НЕЙТРАЛІЗАТОР ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДВЗ ІЗ КАТАЛІЗАТОРОМ  
НА МЕТАЛЕВОМУ НОСІЇ**

У роботі показана структура каталітично активного покриття на металевому носії, розроблено блок каталітичної нейтралізації із запропонованим каталізатором на металевому носії. Показано результати порівняльних стендових випробувань із очищення відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згорання розробленим блоком каталітичної нейтралізації та його промисловим аналогом марки Bosal 099-886.

Krasnokutsky Ye.V., Ved V.E., Petar Varbanov, Sataev M.I.

**NEUTRALIZER OF COMBUSTION ENGINE EXHAUST GASES WITH A CATALYST  
ON A METAL CARRIER**

In paper the structure of the catalytically active coating on a metal support is shown. Catalytic unit with the proposed metallic catalyst carrier is designed. The results of comparative bench testing of exhaust gases purification of internal combustion engines with designed catalytic unit and its industrial analogues Bosal 099-886.

УДК 629.7.017

Анипко О.Б., Фененко О.А.

### ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ ПРИ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ НА ПРОЧНОСТЬ УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ КИЛЯ САМОЛЁТА МиГ-29

**Введение.** Наибольшему воздействию летательный аппарат (ЛА) подвергается при работе в условиях изменяющихся внешних факторов, поэтому основные нагрузки ЛА воспринимает в полёте [1]. Режимы работы, перепады давлений и температур, силовые нагрузки, вибрация, действующие на ЛА в полёте, зависят от характера полётного задания и состояния атмосферы. Так, при полётах на малых и больших высотах повышенные нагрузки испытывают обшивка и элементы силового набора. Нагрузка органов взлёта и посадки зависит от состояния взлетно-посадочной полосы. Изменение атмосферных факторов влияет на физико-химические и механические характеристики элементов конструкции ЛА [2,3].

В связи с этим возникает задача оценки прочности элементов конструкции планера ЛА с учётом влияния внешних факторов во время выполнения полётного задания.

**Изложение основного материала.** Одним из элементов конструкции, который характеризуется повышенными нагрузками практически во всём диапазоне режимов полёта самолёта МиГ-29 [4,5] является узел крепления киля к фюзеляжу, рис. 1.



Рисунок 1 – Вертикальное оперение самолёта МиГ-29

Киль самолёта МиГ-29 крепится к фюзеляжу с помощью дюралевой накладки (ленты), которая с внутренней стороны к панелям киля приклеена и приклепана. С её помощью киль крепится к полкам бортовой нервюры подкилевой надстройки двухрядным винтовым соединением на анкерных гайках. Установка киля на подкилевою надстройку производится двумя болтами по узлам переднего и заднего лонжеронов кессона [6,7], рис. 2.

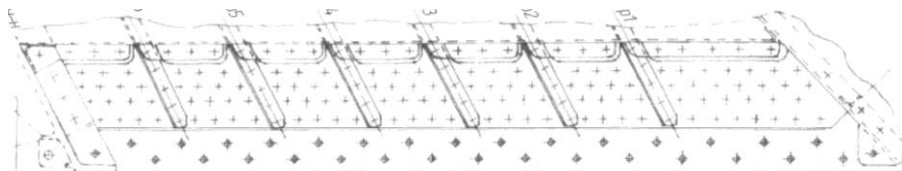


Рисунок 2 – Лента крепления киля к подкилевой надстройке самолёта МиГ-29

Частоту, величину и время изменения параметров выполнения маневрирования можно проконтролировать по материалам объективного контроля выполнения полётных заданий каждого отдельно взятого ЛА.

На рис. 3 изображена тестерограмма стандартного полёта маневренного ЛА (облёт ЛА после выполнения регламентных работ), обработанная с помощью мобильного комплекса оперативного контроля «Беркут».

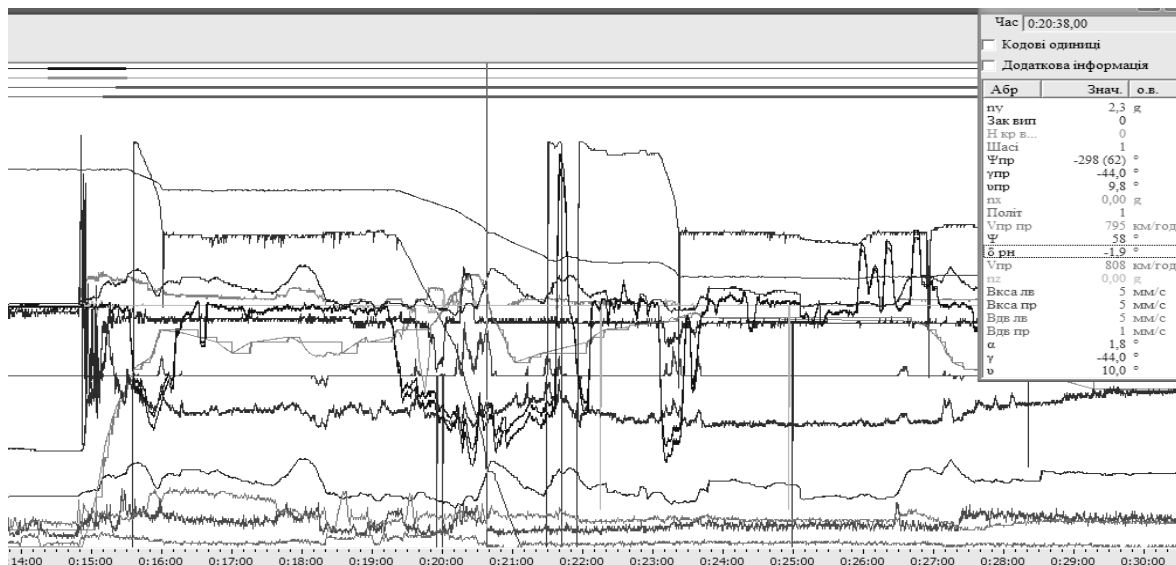


Рисунок 3 – Тестерограмма об'єктивного контролю польоту маневренного летального апарата з використанням мобільного комплексу оперативного контролю «Беркут»

Проведя анализ материалов об'єктивного контролю виконання різних програм польотів ЛА класу А (тренувальні, за заданням, перехват, повітряний бій, пілотаж при різних метеорологічних умовах дня і ночі), були отримані результати змін різних зовнішніх експлуатаційних параметрів при виконанні завдання середнього за часом польоту:

- $n_y$  (перегрузка) – змінюється від 0,3g до 6,2g за час 0,5 сек. більше 15 раз;
- $\alpha$  (кут атаки) – змінюється від 0° до  $\pm 27^\circ$  50 раз з різним інтервалом часу;
- H (висота польоту) – змінюється від 300 до 3500 м близько 17 раз, а від 3500 до 8000 м більше 5 раз;
- V (швидкість польоту) – змінювалася від 350 до 675 км/ч 29 раз, а від 350 до 980 км/ч 14 раз з різними інтервалами часу;
- $\delta_{рн}$  (кут відхилення штурвала напрямку) – змінювався від  $-17^\circ$  до  $+17^\circ$  близько 69 раз;
- B (вібрація) – змінювалася від 2 до 12 мм/с в залежності від змін режимів роботи авіаційних двигачів близько 58 раз.

Всі вище розглянуті параметри впливають на планер ЛА з різною частотою і тим самим впливають на міцність його елементів (фюзеляж, крило, горизонтальне і вертикальне оперення) [8].

Таким чином, аналіз міцності повинен ґрунтуватися на: типовому спектрі навантажень, переліку критичних місць конструкції ЛА, руйнування яких може призвести до аварійного або катастрофічного руйнування із-за втоми, корозії або випадкового пошкодження. Тому, взагалі необхідно проводити аналіз міцності для кожної частини конструкції ЛА окремо, а в частині – ленти.

Виходячи з цього, вертикальне оперення (кіль) ЛА повинно витримувати вигинаючі і крутячі сили і моменти, виникаючі в результаті нестационарного силового впливу повітряного потоку на поверхню килевої балки. Найбільш ефективно такі навантаження витримує жорстко закріплена балка. Однак така конструкція непридатна з точки зору аеродинаміки, згідно з якою поперечні перерізи килевої балки повинні бути тонкими, добре обтікаємими профілями. Це обумовлює важливу особливість авіаційних конструкцій, при проектуванні яких наряду з виконанням вимог міцності необхідно забезпечувати високі аеродинамічні характеристики.

При розрахунку на міцність необхідно оцінити величину напружень в силових елементах готових конструкцій, величинами і характером їх деформацій [9].

При постановці задачі міцності вибрано елемент конструкції килевої балки, а саме, ленту кріплення килевої балки до підкілевої надбудовки маневренного літака типу МиГ-29, рис. 2.

В результаті розрахунків на міцність розглянуто два варіанти навантаження ленти зовнішніми силами, діючими на ленту при нормальних умовах експлуатації ЛА.

В залежності від прикладення сил (положення штурвала напрямку) отримуємо статично визначену і статично невизначену систему [8].

Із отриманих результатів задачі міцності поперечного перерізу ленти (рис. 4), які були виконані в програмі «Балка», видно, що в області корозійного пошкодження (рис. 4а), описаної



в работе [2], изгибающий момент  $M$  имеет различные значения в зависимости от направления приложения сил к килю.

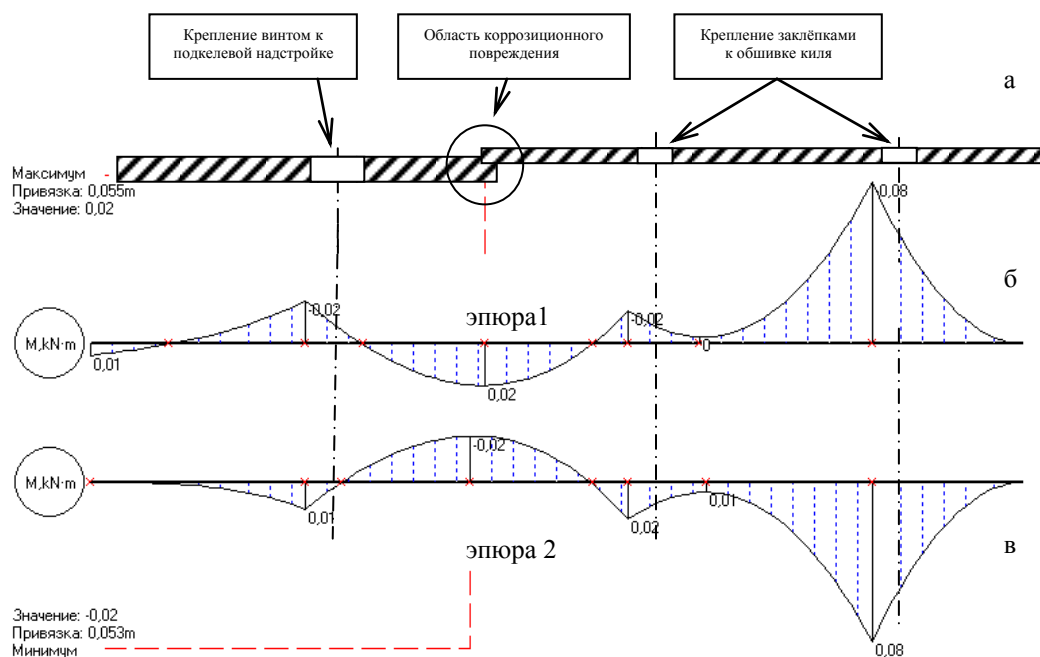


Рисунок 4 – Сечение ленты (а) с эпюрами изгибающих моментов  $M$ ,  $kN \cdot m$  (б, в)

Эпюра 1 (рис. 4б) показывает положительный изгибающий момент при условии, когда нижняя часть ленты жёстко закреплена. Эпюра 2 (рис. 4в) показывает отрицательный изгибающий момент при условии, когда нижняя часть ленты не закреплена, что приводит к циклическим нагрузкам, которые могут привести к усталостному разрушению конструкции, а именно в области коррозионного повреждения ленты.

**Вывод.** В результате исследований следует, что при анализе прочности конструкции принципиальными являются два вопроса: где наиболее слабые (критические) места конструкции и какое состояние критического места конструкции можно считать её отказом, в результате чего возникает ряд задач:

определение наиболее слабых мест силовой конструкции (опасных сечений) планера ЛА по расчётам на прочность с учётом статистических данных дефектов и отказов;

выполнение расчёта на прочность в зависимости от изменения нагрузок при выполнении маневренного полёта;

при проектировании перспективных образцов ЛА с аналогичной компоновочной схемой крепления киля необходимо учитывать влияние внешних факторов при расчётах элементов крепления киля к фюзеляжу на прочность.

#### Литература

1. Галашев Е.С. Аэродинамика и динамика полёта маневренного самолёта / Е.С. Галашев, М.Н. Лысенко, С.А. Микоян, В.И. Некрасов, Ю.Н. Нечаев, М.И. Ништ, М.И. Радченко, Г.Ф. Сивков // – М.: Военное издательство, 1984. – 545 с.

2. Анипко О.Б. Дефекты стыковочной ленты узла крепления киля к подкилевой надстройке и физико-химические процессы, приводящие к ним [текст] / О.Б. Анипко, О.А. Фененко // Интегрированные технологии и энергосбережение – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. №4. – С. 96–102.

4. Боевое применение самолёта МиГ-29. Методическое пособие лётчику. Изд. № 11/031890р-Т89 «Б» з/н. – 148 с.

5. Практическая аэродинамика самолёта МиГ-29. Учебное пособие – М.: Изд. №11/029831р, 1987. – 316 с.

6. Самолёт 9-12, Временное руководство по технической эксплуатации. Самолёт и его системы, книга I, часть I, II – М.: ГК-473, 1983. –654 с.

7. Левин А.Ф. Самолёт 9-12, Особенности конструкции и работы планера и систем самолёта / А.Ф. Левин, А.М. Киселёв // – М.: Издательство ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1987. – 213 с.
8. Зайцев В.Н. Конструкция и прочность самолётов / В.Н. Зайцев, В.Л. Рудаков // – К.: Изд. Объединение «Вища школа», 1978. – 488 с.
9. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций / Р.Р. Мавлютов – М.: Наука, 1981. – 141 с.

### Bibliography (transliterated)

1. Galashev E.S. Aerodnamika i dinamika polyota manevrenogo samolyota. E.S. Galashev, M.N. Lyisenko, S.A. Mikoyan, V.I. Nekrasov, Yu.N. Nechaev, M.I. Nisht, M.I. Radchenko, G.F. Sivkov. – М.: Voennoe izdatstvo, 1984. – 545 p.
2. Anipko O.B. Defektyi styikovochnoy lentyi uzla krepleniya kilya k podkilevoy nadstroyke i fizikohimicheskie protsessyi, privodyaschie k nim [tekst]. O.B. Anipko, O.A. Fenenko. Integrirovannyye tehnologii i energoberezhenie – Н.: NTU «НPI», 2014. #4.– P. 96–102.
4. Boevoe primeneniye samolyota MiG-29. Metodicheskoye posobie lyotchiku. Izd. # 11/031890r-T89 «B» z/n. – 148 p.
5. Prakticheskaya aerodinamika samolyota MiG-29. Uchebnoye posobie – М.: Izd. #11/029831r, 1987. – 316 p.
6. Samolyot 9-12, Vremennoye rukovodstvo po tehnikoskoy ekspluatatsii. Samolyot i ego sistemyi, kniga I, chast I, II – М.: GK-473, 1983. –654 p.
7. Levin A.F. Samolyot 9-12, Osobennosti konstruksii i raboty planera i sistem samolyota. A.F. Levin, A.M. Kiselyov. – М.: Izdatelstvo VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 1987. – 213 p.
8. Zaytsev V.N. Konstruksiya i prochnost samolyotov. V.N. Zaytsev, V.L. Rudakov. – К.: Izd. Ob'edinenie «Vischa shkola», 1978. – 488 p.
9. Mavlyutov R.R. Kонтсentratsiya napryazheniy v elementah aviatsionnyih konstruksiy. R.R. Mavlyutov – М.: Nauka, 1981. – 141 p.

УДК 629.7.017

Аніпко О.Б., Фененко О.О.

### **ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ ПРИ ПОСТАНОВЦІ ЗАВДАННЯ НА МІЦНІСТЬ ВУЗЛА КРІПЛЕННЯ КІЛЯ ЛІТАКА МиГ-29**

У статті розглянуто проблеми впливу зовнішніх факторів на міцність кріплення кіля літака МиГ-29. Проведено аналіз матеріалів об'єктивного контролю польотів маневреного літального апарату. Розглянута зміна згинального моменту в залежності від напрямку докладання зусиль на кіль.

Anipko O.B., Fenenko O.O.

### **IMPACT OF EXTERNAL FACTORS WHILE DEFINING THE PROBLEM OF MiG-29 FIN KNOT STRENGTH**

The article review's the impact of external factors on the strength of MiG-29 fin strength. The analysis of objective control materials of maneuverable aircraft flight is conducted. The change of bending moment depending on the direction of applying efforts on the finis reviewed.

**НАУЧНАЯ ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ  
УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ВОЕННОГО  
НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ  
НА ЭТАПЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

В современных условиях происходит расширение круга задач, решаемых летательными аппаратами (ЛА) военного назначения. К задачам, выполняемым во время глобальных военных конфликтов, добавляются задачи, связанные с борьбой с терроризмом и выполнением полицейских функций.

Для развития ЛА военного назначения в настоящее время характерны расширение диапазонов изменения параметров полета, многофункциональность, многорежимность, повышение точности управления [1–8]. Эксплуатационная область режимов полета многих современных ЛА военного назначения ограничена, исходя из недостаточной устойчивости и управляемости ЛА на этих режимах, что приводит к повышению требований к характеристикам устойчивости и управляемости, которые обеспечиваются аэродинамической компоновкой ЛА. Необходимость обеспечения требуемых характеристик устойчивости и управляемости распространяется на все типы ЛА военного назначения.

Таким образом, в настоящее время существует широкомасштабное проблемное направление по разработке методов и конструктивных решений, направленных на достижение улучшенных характеристик устойчивости и управляемости ЛА военного назначения, которые закладываются на концептуальных, ранних этапах разработки и направлены на достижение приоритетов, обусловленных боевым применением ЛА.

Проведение научных исследований в данном направлении выдвинуло в последнее время ряд сложных научных и практических проблем по дальнейшему усовершенствованию аэродинамической компоновки ЛА военного назначения. Сущность этих проблем составляют следующие противоречия в теории и практике разработки и совершенствования ЛА военного назначения:

– противоречие между последовательным возрастанием тактико-технических требований к летно-техническим характеристикам и характеристикам устойчивости и управляемости ЛА военного назначения и несовершенством научно-методического аппарата (НМА) формирования аэродинамической компоновки ЛА, базирующегося на подходах, которые не учитывают действия многих влияющих факторов, являются довольно приближенными, не обеспечивают требуемых аэродинамических характеристик ЛА и приводят к необходимости корректировки получаемых результатов на последующих этапах разработки;

– противоречие между необходимостью системного подхода при формировании аэродинамической компоновки ЛА военного назначения и несовершенством теоретических основ синтеза такой компоновки;

– противоречие между необходимостью снижения затрат на разработку ЛА военного назначения и обеспечением высокого уровня научно-технических и конструкторских решений, принимаемых на этапе концептуального проектирования.

Совокупность данных противоречий приводит к возникновению проблемной ситуации в области разработки и модернизации ЛА военного назначения. Сущность этой проблемной ситуации заключается в том, что методология комплексных исследований по формированию аэродинамической компоновки ЛА военного назначения для принятия обоснованных конструкторских решений на этапе концептуального проектирования находится на уровне, который не отвечает предъявляемым требованиям. Данная проблемная ситуация порождает научную проблему обеспечения рационального сочетания устойчивости и управляемости ЛА военного назначения на основе синтеза аэродинамической компоновки на этапе концептуального проектирования. Решение этой научной проблемы позволяет более глубоко и полнее исследовать физические процессы, происходящие в полете, за счет чего повысить надежность получаемых результатов, обеспечить обоснованное формирование соответствующих конструкторских решений и в целом повысить эффективность аэродинамического проектирования модернизируемых и перспективных ЛА военного назначения.

В основу решения рассматриваемой научной проблемы положен системный подход, предполагающий проведение комплексных исследований широкого круга вопросов. Методически исследования объединены в несколько основных направлений, связанных единой методологией, которая включает в себя также определение объекта, предмета, цели, задач и составных частей проводимого исследования, разработку методов решения проблемы.

Согласно формулировке научной проблемы, рассматриваемой в настоящей работе, объект исследования составляет аэродинамическая компоновка планера ЛА. Предметом исследований является процесс формирования аэродинамической компоновки ЛА на этапе концептуального проектирования.

Главными направлениями исследований являются (рисунок 1):



– разработка НМА оценки аэродинамических характеристик (АХ) ЛА военного назначения на основе синтеза методов и методик, которые обеспечивают прогноз аэродинамических характеристик ЛА на этапе концептуального проектирования, и проверка достоверности результатов исследований, получаемых при использовании разработанного НМА;

– усовершенствование НМА оценки потребного управления ЛА на основе математической модели, базирующейся на решении обратной задачи динамики полета, и проверка работоспособности данного НМА;

– разработка теоретических основ и НМА синтеза аэродинамической компоновки ЛА военного назначения, и практических рекомендаций проектировщикам для принятия конструкторских решений на этапе концептуального проектирования, проверка адекватности разработанного НМА.

Исследования, направленные на решение поставленной научной проблемы, подразделяются на три основных этапа.

На первом этапе проводится анализ современного состояния НМА синтеза аэродинамической компоновки ЛА военного назначения и определяются направления его совершенствования. Анализируются существующие методы определения АХ летательных аппаратов, выбираются математические модели для исследования АХ ЛА.

На втором этапе проводятся исследования по совершенствованию существующего и разработке нового НМА синтеза аэродинамической компоновки ЛА военного назначения. Этот этап включает в себя аппроксимацию данных экспериментальных исследований в аэродинамических трубах, усовершенствование полумпирических методик определения АХ ЛА, формирование математической модели потребного управления ЛА, проведение вычислительного и трубного экспериментов. Этап завершается разработкой метода синтеза и выбора рациональных аэродинамических компоновок.

Содержанием третьего этапа является практическая реализация усовершенствованного НМА, разработка практических рекомендаций по применению результатов исследования для улучшения летно-технических характеристик (ЛТХ) ЛА военного назначения на этапе концептуального проектирования.

Таким образом, определены основные направления и этапы решения рассматриваемой научной проблемы.

#### Литература

1. Булат П.В. О сравнении истребителей четвертого и пятого поколения. Часть I. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://paralay.com/>
2. Булат П.В. На пути к пятому и шестому поколению. Часть II. Десять лет спустя. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://paralay.com/>
3. Стелс машины. ПАК ФА Т-50. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [paralay.com /pakfa/pakfa.html](http://paralay.com/pakfa/pakfa.html)
4. Основи теорії обґрунтування вимог до параметрів стійкості руху керованих ракет класу «поверхня – повітря» на гіперзвукових швидкостях / [Боровик О.В., Зубарев В.В., Ковтуненко О.П., Коростельов О.П.]. – К.: Книжкове видавництво НАУ, 2007. – 320 с.
5. Системы управления вооружением истребителей: Основы интеллекта многофункционального самолета / [Бабанов Л.Е., Давидов А.Н., Корниенко В.Н. и др.]; под ред. Е.А. Федосова. – М.: Машиностроение, 2005. – 400 с.
6. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов / Под ред. Г.С. Бюшгенса. – М.: Наука, Физматлит. – 1998. – 816 с.
7. Летно-технические характеристики самолета Су-27 / [М.С. Архипов, В.К. Игнаткин, В.Г. Момджи и др.]; под ред. А.И. Нелюбова. – М.: ВВИА им. проф. М.Е. Жуковского, 1988. – 139 с.
8. Летно-технические характеристики самолета Миг-29 / [Ф.И. Ганиев, А.А. Новад, В.Н. Петренко и др.]; под общ. ред. А.М. Тарасенкова. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1985. – 85 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Bulat P.V. O sravnenii istrebiteley chetvertogo i pyatogo pokoleniya. Chast I. [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://paralay.com/>
2. Bulat P.V. Na puti k pyatomu i shestomu pokoleniyu. Chast II. Desyat let spustya. [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://paralay.com/>
3. Stels mashinyi. PAK FA T-50. [Elektronnyiy resurs]. – Rezhim dostupa: [paralay.com /pakfa/pakfa.html](http://paralay.com/pakfa/pakfa.html)

4. Osnovi teorii obgruntuvannya vimog do parametriv stiykosti ruhu kerovanih raket klasu "poverhnyapovitrya" na giperzvukovih shvidkostyahi. [Borovik O.V., Zubarev V.V., Kovtunenکو O.P., Korostelov O.P.]. – K.: Knizhkovе vidavnistvo NAU, 2007. – 320 p.

5. Sistemyi upravleniya vooruzheniem istrebiteley: Osnovyi intellekta mnogofunktsionalnogo samoleta. [Babanov L.E., Davidov A.N., Kornienko V.N. i dr.]; pod red. E.A. Fedosova. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 400 p.

6. Aerodinamika, ustoychivost i upravlyaemost sverhzvukovyih samoletov. Pod red. G.S. Byushgensa. – M.: Nauka, Fizmatlit. – 1998. – 816 p.

7. Letno-tehnicheskie harakteristiki samoleta Su-27. [M.S. Arhipov, V.K. Ignatkin, V.G. Momdzhi i dr.]; pod red. A.I. Nelyubova. – M.: VVIA im. prof. M.E. Zhukovskogo, 1988. – 139 p.

8. Letno-tehnicheskie harakteristiki samoleta Mig-29 / [F.I. Ganiev, A.A. Novad, V.N. Petrenko i dr.]; pod obsch. red. A.M. Tarasenkova. – M.: VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 1985. – 85 p.

УДК 629.73.017.2

Ковтонюк І.Б.

**НАУКОВА ПРОБЛЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПОЄДНАННЯ СТІЙКОСТІ І КЕРОВАНОСТІ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ СИНТЕЗУ АЕРОДИНАМІЧНОГО КОМПОНУВАННЯ НА ЕТАПІ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ**

Розглянуто наукову проблему забезпечення раціонального поєднання стійкості і керованості літальних апаратів військового призначення на основі синтезу аеродинамічного компонування на етапі концептуального проектування. Визначено напрямки та етапи вирішення даної наукової проблеми.

Kovtonyuk I.B.

**THE SCIENTIFIC PROBLEM OF ENSURING THE RATIONAL COMBINATION OF STABILITY AND CONTROLLABILITY MILITARY AIRCRAFTS BASED ON THE SYNTHESIS OF AERODYNAMIC ARRANGEMENT AT THE STAGE OF CONCEPTUAL DESIGN**

The scientific problem of ensuring the rational combination of stability and controllability military aircrafts based on the synthesis of aerodynamic arrangement at the stage of conceptual design is considered. The directions and stages of this scientific problem are determined.

## ВЫСТРЕЛИВАЕМЫЙ ИЗ СТВОЛА АВТОНОМНЫЙ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ

Современный уровень интенсивности ведения боевых действий требует непрерывную информацию о противнике, что привело к широкому применению на тактическом и оперативно-тактическом уровне разведывательных дистанционно-управляемых беспилотных летательных аппаратов (ДУ БПЛА). Их применение выявило ряд присущих им недостатков, к которым в первую очередь относятся:

1. Возможность подавления и увода (захвата) средствами РЭП;
2. Определение средствами радиотехнической разведки координат места источника управляющих сигналов с последующим огневым воздействием по этому месту, что приводит к потере оператора и аппаратуры.

Таким образом, перечисленные недостатки ДУ БПЛА лишают их основных преимуществ этого класса техники, что, в свою очередь приводит к выводу о необходимости перехода к автоматически управляемым автономным БПЛА. Такие аппараты имеют на борту систему автоматического управления для осуществления полета по заранее задаваемому маршруту. Маршрут может задаваться по принципу «бумеранг» (то есть аппарат возвращается и может быть использован повторно) и невозвращаемый аппарат одноразового действия. Разработка и создание таких АУ БПЛА предполагает разработку аэродинамической схемы, выбор силовой установки и источника питания, определение летно-технических характеристик созданного аппарата, разработку системы автоматического управления полетом и, наконец, подготовку программистов-операторов.

Понятно, что такой комплекс работ требует больших затрат временных, материальных, финансовых и интеллектуальных ресурсов. С другой стороны, стоимость такого рода аппаратов будет довольно высока, что также не позволит в сжатые сроки осуществить насыщение войск такой техникой, потребность в которой ощущается все острее.

В этой связи своевременной и весьма актуальной представляется задача разработки автономного разведывательного ЛА с низкой себестоимостью для массового насыщения войск в сжатые сроки.

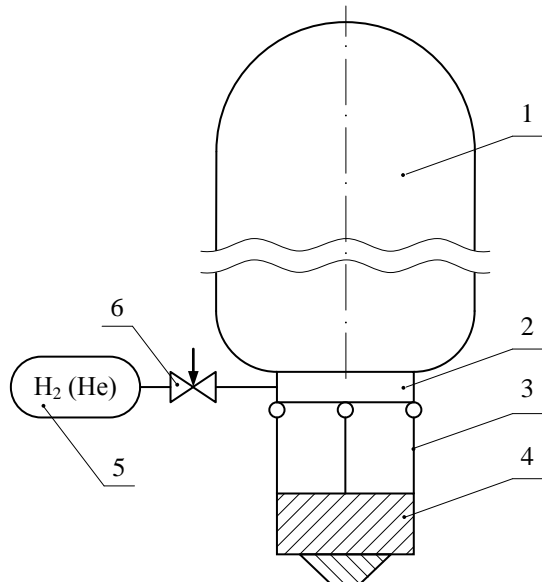


Рисунок 1 – Принципиальная схема конструкции АРЛА

- 1 – баллон аэростата; 2 – узел крепления с газовой арматурой; 3 – система подвески аппаратуры; 4 – разведывательно-передающая аппаратура; 5 – баллон; 6 – клапан

Для решения этой задачи представляется целесообразным применение автономного разведывательного летательного аппарата (АРЛА), выстреливаемого через ствол. При этом в качестве прототипа боеприпаса для транспортировки АРЛА следует рассматривать ОФ снаряды танковой пушки (ТП) (калибр 125 мм) и им подобные. Их масса составляет 29 кг, что позволяет транспортировать несущую систему и разведывательную аппаратуру. Подчеркнем, что форма снаряда и его масса должны остаться неизменными для того, чтобы остались неизменными показатели внешней баллистики, которые уже введены в элементы СУО танковой пушки (для других артсистем это положение аналогично).

Принципиально такой АРЛА представляется следующим образом. В контейнере-снаряде, выстреливаемом через ствол танковой пушки, размещается несущая система и разведывательная аппаратура. Несущая система представляет собой аэростат, баллон которого представляет собой цилиндр, в нижней части которого находится запорная арматура с автоматическим вентиляем для наполнения баллона аэростата газом ( $H_2$  или  $He$ ) из баллона, присоединенного к вентилю. В нижней части также находится узел крепления разведывательной аппаратуры к гондоле (рис. 1).

Все перечисленные элементы находятся внутри снаряда-контейнера. Причем, если их масса ниже массы снаряда, то для ее достижения устанавливается еще

и компенсатор массы.

Существенно, что применение аэростатов, как несущей системы не ново. Известны отечественные [1, 2] и зарубежные [3] разработки подобного рода. Однако, в указанных системах используется так называемый привязной аэростат, то есть фактически это тросовая штанга, на которой поднимают аппаратуру в заданной точке на определенную высоту. Разработанная авторами настоящей статьи система принципиально отличается от упомянутых тем, что является дрейфующей.

Работа АРЛА представляется следующим образом. С учетом направления ветра и требуемой разведки местности определяется место доставки снарядом-контейнером АРЛА. Для чего в корпусе имеется поворотный кран (типа О-Ф-ОФ действие), позволяющий задать дальность раскрытия контейнера в 10, 15 и 20 км (рис. 2).

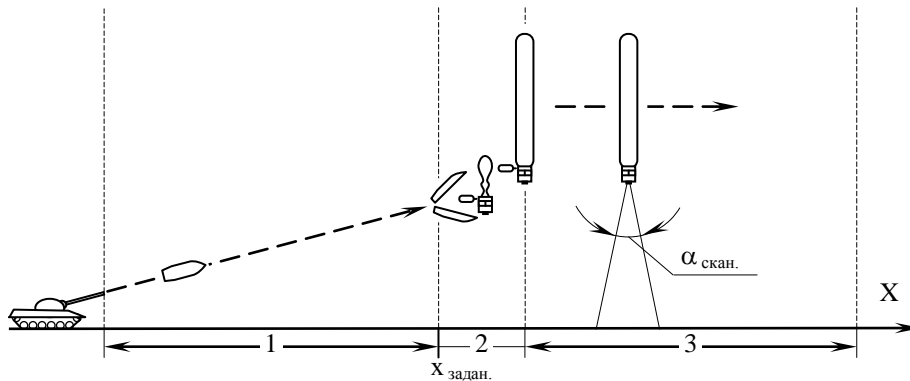


Рисунок 2 – Основные этапы работы АРЛА

1 – полет в снаряде-контейнере; 2 – раскрытие контейнера, наполнение баллона аэростата; 3 – дрейф аэростата

После установки дальности и определения курсового угла стрельбы и угла возвышения снаряд-контейнер со штатным зарядом заряжается в ТП и выстреливается. Высота траектории для ОФ снаряда от дальности показана на рис. 3. При достижении одной из трех перечисленных выше точек траектории (в соответствии с установкой) контейнер раскрывается, в этот же момент включается клапан-вентиль б (см. рис. 1) и происходит наполнение баллона аэростата 1. После выравнивания давления в баллоне 5 и баллоне 1 баллон 5 отсоединяется. Аэростат начинает дрейф по ветру с одновременным сканированием местности.

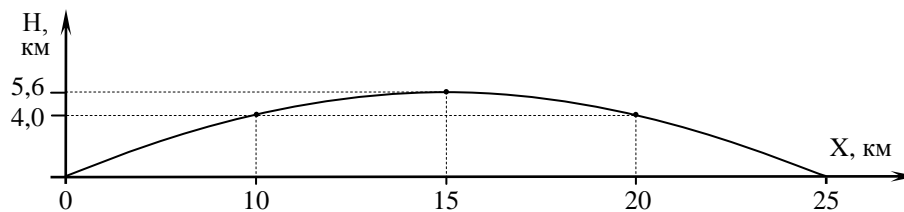


Рисунок 3 – Высоты траектории ОФ снаряда калибра 125 мм начальная скорость 870 м/с, угол возвышения 14°

В состав разведывательной аппаратуры входят: камера, передатчик, блок питания и геоинформационная система (типа GPS).

В качестве дополнительного источника питания может быть использован бортовой флюгер (рис. 4), который крепится к узлу крепления 2.

В заключении отметим, что разработанный носитель может быть использован не только для разведывательной аппаратуры, но и для ударного комплекса.

Теперь рассмотрим распределение массы по элементам АРЛА.

$$M_{\Sigma} = 29 \text{ кг} = \sum_{i=1}^n m_i$$



где  $n$  – число элементов АРЛА,  $m_i$  – их массы.

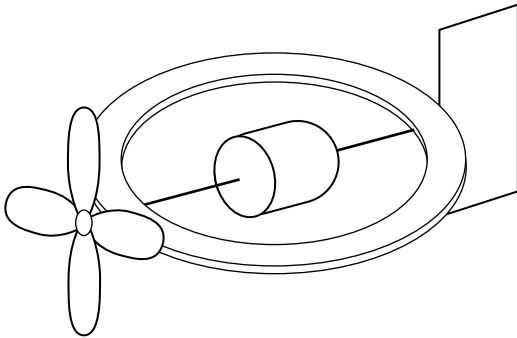


Рисунок 4 – Дополнительный источник питания

Контейнер-снаряд и баллон для газа изготавливаются из армированного пластика. Масса этих элементов оценивается величинами  $m_{бал.} = 1$  кг;  $m_{конт.} = 3-4$  кг; Автоматика с газозапорной арматурой – 2 кг; баллон аэростата – тканевой с пропиткой или из фольги – 1,4 кг, разведывательная аппаратура – 5 кг. Масса газа зависит от несущей способности, которая, в свою очередь определяется полезной нагрузкой аэростата и массой собственных элементов. Эта величина может быть оценена в 12–14 кг. Тогда объем баллона составит  $15,34$  м<sup>3</sup>. Задаваясь шириной плоско-цилиндрического или диаметром круглого баллона величиной 700 мм из условия не поражения из стрелкового оружия и снижения заметности, длина его составит  $\sim 10$  м (данные приведены для  $\rho_{возд.} = 1,27$  кг/м<sup>3</sup>

и  $\rho_{H_2} = 0,09$  кг/м<sup>3</sup>).

Отметим, что стоимость такой несущей системы соизмерима со стоимостью боеприпаса. Конструкция не содержит каких-либо оригинальных узлов и деталей. При использовании в ударном исполнении система представляет собой ВТО, причем в двух вариантах наведения: первый – по координатам цели при совпадении с координатами GPS или другой ГИС и второй – по сенсорному датчику, например движения или ИК.

#### Литература

1. Антонюк В.П., Гринькович О.С. и др. Аэростатный радиотехнический комплекс. Патент Украины 104794. 11.03.2014 Бюл. № 5.
2. Капаций А.В. Малопомітний комплекс повітряного спостереження. Патент України 99117. 25.05.2015. Бюл. № 10.
3. Шабанов А. Испытания в США аэростатной системы ПВО JLENS. //Зарубежное военное обозрение, № 6, 2010 с. 56.

#### Bibliography (transliterated)

1. Antonyuk V.P., Grinkovich O.S. i dr. Aerostatnyi radiotekhnicheskii kompleks. Patent Ukrainyi 104794. 11.03.2014 Byul. # 5.
2. Kapatsiy A.V. Malopomitniy kompleks povitryanogo sposterezhennya. Patent Ukrayini 99117. 25.05.2015. Byul. # 10.
3. Shabanov A. Ispytaniya v SShA aerostatnoy sistemyi PVO JLENS. Zarubezhnoe voennoe obozrenie, # 6, 2010 p. 56.

УДК 623.746

Аніпко О.Б., Бусяк Ю.М., Коростелев О.П., Яковенко П.О.

#### **АВТОНОМНИЙ РОЗВІДУВАЛЬНИЙ ЛЕТАЛЬНИЙ АПАРАТ, ЩО ВИСТРІЛЮЄ ЗІ СТВОЛУ**

Розроблено основні конструктивні елементи автономного повітряного дрейфуючого розвідувально-літального апарату, що вистріляється з танковою гармати.

Визначено конструктивні розміри для заданого навантаження. Несуча літальна система може використовуватися як для розвідувача так і для ударного обладнання.

Anipko O.B., Bysiyak Y.M., Korostelev O.P., Yakovenko P.O.

#### **AUTONOMOUS RECONNAISSANCE LETHAL MACHINE THAT SHOOTS OUT OF THE BARREL**

A basic design elements independent air drifting reconnaissance aircraft that shuteye tank guns.

Defined design size for a given load. Flying carrier system can be used for both search engine and Percussion equipment.

**МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ДРОБЛЕНОЇ РУДИ ВЗДОВЖ КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ ПРИ РОЗВАНТАЖЕННІ БУНКЕРІВ**

**Вступ.** В чорній металургії України більшу частину сировини отримують збагаченням бідних залізних руд, де їх подрібнення є найбільш витратним технологічним процесом, що здійснюється в барабанних млинах. Непідтримання необхідних режимів роботи млина в певних технологічних умовах завдає значних економічних збитків, що не відповідає положенням Державної науково-технічної програми «Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі». Враховуючи те, що вихідна руда сильно впливає на стан технологічного агрегату і точнісні характеристики конвеєрних вагів, дослідження розподілу дробленої руди вздовж конвеєрної стрічки, яка живить кульовий млин, є актуальним. На актуальність розв'язання цих задач звертається увага в роботі [1], де сказано, що зниження енергоємності процесів подрібнення та підвищення технологічної ефективності подрібнення необхідно розглядати як найбільш важливу складову на шляху ідентифікації рудопідготовки. Одним з основних напрямів є критичний аналіз переваг і недоліків існуючого технологічного обладнання з метою виявлення можливостей подальшого покращення його показників, у тому числі завдяки оптимізації конструкції та технологічних схем, удосконалення режимів подрібнення та автоматичного управління [2]. Зокрема, ефективність запропонованого пристрою автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням [3] значно зменшується завдяки невизначеному впливу вхідного рудного потоку, який формується в процесі розвантаження бункерів, як на конвеєрні ваги, так і на кульовий млин.

Проблему розвантаження бункерів з сипким матеріалом розв'язують давно, досягнуті вагомні результати. Увага приділяється статичі і динаміці сипких середовищ, вільному витіканню сипких тіл, фізико-механічним властивостям матеріалу, ймовірності утворення склепіння при витіканні сипкого матеріалу, розрахунки полів напруг в нерухомому шарі сипкого матеріалу, розподілу тиску матеріалу на підпірну стінку та ін. Здійснюються спроби покращення запропонованих раніше залежностей [4, 5, 6]. Удосконалюються наближені методи [7, 8] визначення розподілу тиску сипкого матеріалу в бункерах. Сама сучасна математична модель витікання сипкого матеріалу [9] передбачає, що у верхній циліндричній частині бункера швидкість і об'ємна густина матеріалу залишаються незмінними і змінюються лише на конічній ділянці в зоні розвантаження. Удосконалена математична модель [10] має обґрунтовану конструкцію конічної частини бункера. Теорія даної моделі та раніше розроблених і експериментально перевірених теоретичних положень стосуються добре сипучої речовини – це сипкий матеріал, який має невелику вологість і малий вміст тонких фракцій. Почали досліджуватись процеси витікання сипких однорідних матеріалів, наприклад, вапна, цементу, піску, гіпсу [11]. В той же час дослідженню витікання з бункерів сипкого фракційного матеріалу зі значним вмістом дрібних класів, до якого відносяться дроблені руди, уваги практично не приділялось.

Метою даної роботи є дослідження витікання з бункера сипкого матеріалу зі значним вмістом дрібних класів та розподілу його вздовж конвеєрної стрічки шляхом математичного моделювання процесу за умов різних характеристик крупності.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Живлення кульових млинів дробленою рудою здійснюють відповідно технологічному ланцюгу – бункер, живильник, стрічковий конвеєр, конвеєрні ваги, кульовий млин. У бункери подають дроблену руду, яка є кінцевим продуктом дробильної фабрики. В залежності від стану дробильного обладнання, властивостей руди цей продукт відрізняється за крупністю. Його звичайно подають як складений з окремих класів крупності з середнім розміром шматків руди з такими значеннями: 0,025; 0,04; 0,05; 0,07; 0,16; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 15; 20 мм. Конкретний матеріал відрізняється вмістом окремих класів крупності. Крупність і міцність матеріалу визначають продуктивність кульового млина по руді. Для сучасного обладнання її середнє значення може дорівнювати 50 кг/с (180 т/год). Дану продуктивність забезпечує живильник, який подає з бункера дроблений матеріал на стрічку конвеєра. Для дозування шматкового матеріалу використовують ряд конструкцій живильників. На залізрудних збагачувальних фабриках розповсюдження отримали телескопічні (труба в трубі) та віброживильники. Вони рівномірно розвантажують матеріал, не спотворюючи характеристику крупності. Тому можливо стверджувати, що характер розподілу дробленої руди вздовж конвеєрної стрічки цілком визначається особливістю її витікання з бункера. З таким розподілом він поступає на конвеєрні ваги і в кульовий млин.

Дроблений матеріал, що подається у бункери збагачувальних фабрик, характеризують насипною масою, коефіцієнтом розпушування, кутом природного схилу. Крім того, він володіє властивістю сегрегації, яка полягає в тому, що більш крупні шматки скочуються в процесі руху на периферію, а дрібні залишаються в зоні завантаження. При транспортуванні руди на стрічкових конвеєрних більш дрібні фракції розташовуються ближче до поверхні стрічки, а крупні знаходяться на поверхні потоку. Оцінюючи особливості сипкого матеріалу доцільно виділити дрібні фракції, що не відрізняються великою рухливістю. До них необхідно віднести всі малорозмірні, включаючи 3 мм. При завантаженні вони в основному заповнюють центральну частину бункера. В процесі завантаження бункера діаметром  $D_b$  сипким матеріалом створюється по його осі конус, як це показано на рис. 1,а. Матеріал розташовується під кутом природного схилу  $\alpha_{ps}$ . Більш-менш ідеалізований процес сегрегації частинок однакової крупності у різних класах формує у нормальному поперечному перерізі циліндричного бункера концентричні кільця, складені з матеріалу різної крупності, яка від найбільшого значення біля стінки зменшується до центральної частини. Границею цих кільцевих елементів виступають вказані на рис. 1,а значення діаметрів –  $D_b$ ,  $D_5$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{15}$  відповідно дрібного матеріалу та руди крупністю 5, 10 і 15 мм. Розміри вказаних діаметрів кілець визначаються вмістом різних класів крупності у складі руди. В умовах гірничо-збагачувальних комбінатів вміст класів крупності у дробленому матеріалі не однаковий, тому значення перерахованих діаметрів є випадковою величиною. Моделюванням встановлено, що для одного з типів руди, що має осереднені характеристики і переробляється магнітозбагачувальною фабрикою, середня частина перерізу, який є характерним для усієї висоти бункера, являє собою круг діаметром  $D_d = 2,76$  м з дрібним матеріалом – 0,074 мм...3,0 мм. За цим кругом розташоване кільце з більшим діаметром  $D_5$  шириною 0,52 м з матеріалу 5 мм, потім кільце шириною 0,22 м і середнім розміром шматків 10 мм. Біля стінки розташовується матеріал шириною 0,1 м з розміром шматків 20 мм. Між двома останніми кільцями розташовується кільцевий елемент шириною 0,18 м, складений з матеріалу крупністю 15 мм.

Розвантаження бункера 1 (рис. 1,б) від матеріалу 2 полягає у витіканні дробленої руди через живильник на конвеєрну стрічку. При цьому матеріал залишає здебільшого середню (осьову) частину бункера. У початковій фазі в основному видаляється дрібний матеріал в межах вершини конуса 3, який пунктиром показано на рис. 1,б. Потім слідує більш крупні фракції поки не створиться конічна воронка 4. Початкова фаза розвантаження проходить без будь-яких ускладнень, оскільки матеріал не ущільнений і володіє достатньою рухливістю. Після створення конічної воронки 4 матеріал припиняє рух, створюється пустота циліндричної форми 6 з діаметром  $d_y$ , що наближено визначається розміром випускного отвору бункера (рис. 1,б). Рух матеріалу в зоні конуса 4 припиняється тому, що  $d_y < D_d$ . Дрібний матеріал володіє меншою рухливістю і здатний ущільнюватись, що сприяє створенню циліндричного склепіння. Рахують, що матеріал руйнується лише тоді, коли степінь ентропії його частинок на межі твердої і сипкої фази перевищить певний поріг руйнування структури, який приймає значення від 0 до 1 в залежності від виду матеріалу, умов зберігання, кількості переданої йому енергії. При цьому враховують сили тертя й сили тяжіння між фрагментами частинок, а також відносне переміщення під дією ваги шарів матеріалу, що розташовані вище. Крім того, мають на увазі, що для забезпечення неперервного витoku сипкого матеріалу необхідне багаторазове збільшення розмірів розвантажувального отвору порівняно з розміром частинок [11].

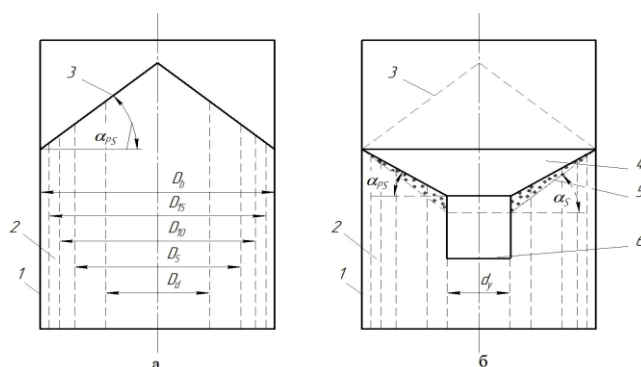


Рисунок 1 – Матеріал в бункері на кінцевому етапі завантаження (а) і початковому етапі розвантаження (б): 1 – бункер; 2 – сипкий матеріал; 3 – конус; 4 – конічна воронка; 5 – фрагмент крупного матеріалу, що долає опір дрібних фракцій; 6 – пустота, що формується при розвантаженні матеріалу;  $D_b$  – діаметр бункера;  $D_5$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{15}$  – відповідно діаметри кільцевих елементів, де закінчується матеріал певної крупності;  $d_y$  – умовний діаметр випускного каналу

Створена пустота 6 (рис. 1,б) при зростанні кута сходження  $\alpha_s$  спричиняє виникнення зовнішньої сили. Такою силою тут є фактор дії маси більш крупного матеріалу в кільцевих елементах. У дрібному ма-

теріалі також формується сила зсуву, оскільки  $\alpha_S > \alpha_{PS}$ . Для цього пустота 6 повинна поглибитись на певну величину. Під тиском розташованих вище крупних фракцій опір дрібного матеріалу долається і він пересувається у незайнятий простір 6 (рис. 1,б). Зверху над дрібним розміщується матеріал більш крупних фракцій, які скочуються по інерції. Весь цей розпушений матеріал видаляється через канал діаметром  $d_y$  до утворення нової конічної воронки 4. Далі дані цикли повторюються і висота дробленого матеріалу в бункері поступово зменшується.

Особливості формування маси матеріалу, що спричиняє руйнування утвореного циліндричного склепіння видно з рис. 2. Перш за все знаходимо об'єм сипкого матеріалу, який сходить у окремому циклі. Сипкий матеріал, що сходить в окремому циклі, у поздовжньому осьовому перерізі бункера представлений фігурами  $ACE$  і  $BDF$ . Об'єм такого матеріалу дорівнює об'єму тіла як фігури обертання  $ACE$  або  $BDF$  навколо осі бункера. Об'єм матеріалу, що сходить в окремому циклі, можливо визначити як різницю об'ємів конуса, поданого в перерізі трикутником  $ABO_4$ , і конусів, переріз яких дає трикутники  $ABO_2$ ,  $EFO_4$ , циліндра з перерізом  $CDFE$ , збільшену на об'єм конуса з перерізом  $CDO_2$ . Висоти конусів дорівнюють:  $OO_2=R_b \cdot tg\alpha_{PS}$ ;  $OO_1=(R_b-r_y)tg\alpha_{PS}$ ;  $O_1O_2=r_y \cdot tg\alpha_{PS}$ ;  $OO_4=R_b \cdot tg\alpha_S$ ;  $O_3O_4=r_y \cdot tg\alpha_S$ . Висота циліндра  $O_1O_3=OO_4-O_3O_4=OO_1=(R_b-r_y)(tg\alpha_S - tg\alpha_{PS})$ . Об'єми відповідно конусів і циліндра дорівнюють:  $V_1=\pi R_b^3 tg\alpha_S/3$ ;  $V_2=\pi R_b^3 tg\alpha_{PS}/3$ ;  $V_3=\pi r_y^3 tg\alpha_S/3$ ;  $V_4=\pi r_y^2 (R_b-r_y)(tg\alpha_S - tg\alpha_{PS})$ ;  $V_5=\pi r_y^3 tg\alpha_{PS}/3$ . З врахуванням знайдених об'ємів  $V_1, \dots, V_5$  після відповідних перетворень отримуємо залежність для визначення об'єму сипкого матеріалу, який сходить у окремому циклі розвантаження бункера

$$V_{MC} = \frac{\pi}{3} \left[ (R_b^3 - r_y^3) - 3r_y^2 (R_b - r_y) \right] (tg\alpha_S - tg\alpha_{PS}). \quad (1)$$

Подавши  $(R_b^3 - r_y^3) = (R_b - r_y)(R_b^2 + R_b r_y + r_y^2)$ , отримуємо

$$V_{MC} = \frac{\pi}{3} (R_b - r_y) (R_b^2 + R_b r_y - 2r_y^2) (tg\alpha_S - tg\alpha_{PS}). \quad (2)$$

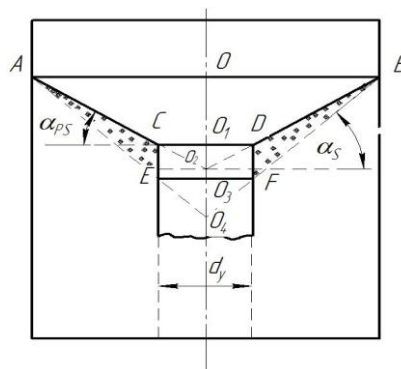


Рисунок 2 – Поздовжній осьовий переріз бункера з елементом маси, що сходить в окремому циклі

У рівнянні (2) всі параметри незмінні, крім кута  $\alpha_S$ , який залежить від технологічних особливостей процесу. Тому  $V_{MC}$  є величиною випадковою. Випадковим є і формування фракцій матеріалу у самому циклі розвантаження.

Об'єм дрібного матеріалу  $V_{dM}$ , що сходить у окремому циклі розвантаження бункера, на рис. 3 представлений фігурою  $O_2O_1O_2'O_3$  обертання навколо осі бункера. Його можливо визначити як об'єм кільцевого циліндричного тіла з прямокутником  $O_1O_1'O_3O_3$  у перерізі, зменшений на об'єми кільцевих елементів з трикутниками  $O_2O_1O_1'$  і  $O_3O_2'O_3$  у перерізі.

Відповідно рис. 3 довжина середньої лінії фігур обертання дорівнює  $l_c = \pi(R_d - r_y)$ . Площа трикутника  $O_3O_2'O_3$   $S_{T1} = (R_d - r_y)^2 tg\alpha_S/2$ . Тоді об'єм фігури обертання з трикутником  $O_3O_2'O_3$  у перерізі дорівнює

$$V_{T1} = \frac{\pi}{2} (R_d + r_y) (R_d - r_y)^2 tg\alpha_S. \quad (3)$$

Відрізок  $O_1O_2 = (R_d - r_y) tg\alpha_{PS}$ . З врахуванням цього площа трикутника  $O_2O_1O_1'$  дорівнює  $S_{T2} = (R_d - r_y)^2 tg\alpha_{PS}/2$ . Тоді об'єм фігури обертання з трикутником  $O_2O_1O_1'$  у перерізі становить

$$V_{T2} = \frac{\pi}{2} (R_d + r_y) (R_d - r_y)^2 \operatorname{tg} \alpha_{PS} \cdot \quad (4)$$

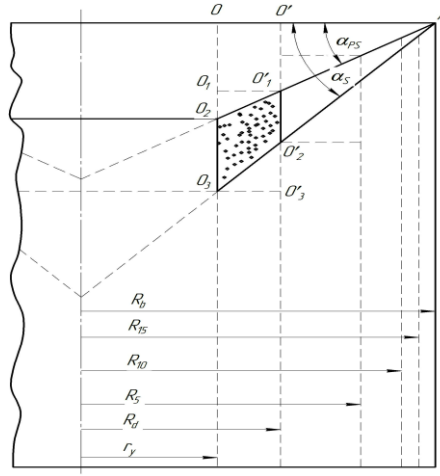


Рисунок 3 – Поздовжній осьовий переріз бункера з відокремленим фрагментом поперечного перерізу дрібного матеріалу

Довжина відрізка  $O_2O_3 = OO_3 - OO_2 = (R_b - r_y)(\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS})$ . З врахуванням значення  $O_1O_2$  висота кільцевого циліндричного тіла прийме значення  $O_1O_3 = h_{CT} = (R_b - r_y)\operatorname{tg} \alpha_S - (R_b - R_d)\operatorname{tg} \alpha_{PS}$ , а площа прямокутника  $O_1O'1O'3O_3$   $S_{T3} = (R_d - r_y)h_{CT}$ . Тоді об'єм фігури обертання з прямокутником  $O_1O'1O'3O_3$  у перерізі складає

$$V_{T3} = \pi (R_d^2 - r_y^2) \left[ (R_b - r_y) \operatorname{tg} \alpha_S - (R_b - R_d) \operatorname{tg} \alpha_{PS} \right]. \quad (5)$$

Враховуючи (3), (4) і (5) і виконавши відповідні перетворення, отримуємо залежність для визначення об'єму дрібного сипкого матеріалу у окремому циклі розвантаження бункера

$$V_{dM} = \frac{\pi}{2} (R_d^2 - r_y^2) (2R_b - R_d - r_y) (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}). \quad (6)$$

Об'єм крупних фракцій сипкого матеріалу  $V_{KM}$  у окремому циклі розвантаження бункера можливо визначити як різницю об'ємів  $V_{MC} - V_{dM}$ . Знайшовши різницю цих об'ємів і виконавши перетворення, отримуємо

$$V_{KM} = \frac{\pi}{6} \left[ 2R_b^3 + 3R_d^3 + r_y^3 + 3R_d r_y (R_d - r_y) - 6R_d^2 R_b \right] (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}). \quad (7)$$

Аналогічно виведенню рівняння (6) з побудови іншого прямокутника на рис. 3 можливо отримати залежність для визначення об'єму сипкого матеріалу крупністю 5 мм.

$$V_{M5} = \frac{\pi}{2} (R_5^2 - R_d^2) (2R_b - R_5 - R_d) (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}). \quad (8)$$

Залежність (8) аналогічна рівнянню (6), тому для інших класів крупності рівності можливо записувати по аналогії. Вони будуть мати наступний вигляд

$$V_{M10} = \frac{\pi}{2} (R_{10}^2 - R_5^2) (2R_b - R_{10} - R_5) (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}), \quad (9)$$

$$V_{M15} = \frac{\pi}{2} (R_{15}^2 - R_{10}^2) (2R_b - R_{15} - R_{10}) (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}), \quad (10)$$

$$V_{M20} = \frac{\pi}{2} (R_{20}^2 - R_{15}^2) (2R_b - R_{20} - R_{15}) (\operatorname{tg} \alpha_S - \operatorname{tg} \alpha_{PS}). \quad (11)$$

Враховуючи, що в (11)  $R_{20}=R_b$ , отримаємо

$$V_{M20} = \frac{\pi}{2} (R_b^2 - R_{15}^2) (R_b - R_{15}) (tg \alpha_S - tg \alpha_{PS}) . \quad (12)$$

В приведених залежностях параметри  $R_b, R_5, R_{10}, R_{15}$  визначаються вмістом фракцій у вихідній руді, тобто мають випадковий характер. Змінною і залежною від технологічних особливостей процесу величиною є і кут  $\alpha_S$ . Тому розглянуті об'єми є випадковими величинами. Випадковістю відзначається і процес перемішування окремих класів крупності сипкого матеріалу.

У конкретній технологічній ситуації визначені за формулами (6)–(12) величини випадковими не будуть, їх значення при різних кутах сходження  $\alpha_S$  приведені в табл. 1.

З даних табл. 1 видно, що значення об'ємів дробленої руди, які сходять в окремих циклах розвантаження бункера, дуже залежать від кута  $\alpha_S$ . При куті  $\alpha_S=60^\circ$  об'єм матеріалу у 8,32 рази більший порівняно з показником, що належить куту  $45^\circ$ . Найбільша частка матеріалу у об'ємі, що сходить в окремому циклі, належить фракції 0...3 мм. Вона складає майже 67 %. Частка найбільш крупного матеріалу розміром 20 мм становить 0,44 %, а фракції 15 мм – 2,84 %. Малий вміст двох самих крупних фракцій матеріалу, розташованих на периферії, не дозволяє їм окремо сходити в процесі розвантаження. Оскільки фракції крупністю 15 і 20 мм відрізняються найбільшою рухливістю і розташовані безпосередньо біля стінки бункера, вони змішуються з матеріалом 10 мм і частково з більш дрібним, створюючи суміш 10...20 мм.

Таблиця 1 – Значення об'ємів дробленої руди, які сходять в окремому циклі розвантаження бункера при різних кутах сходження  $\alpha_S, m^3$

Кут сходження $\alpha_S, ^\circ$	Весь матеріал	Крупні фракції 5...20 мм	Крупність шматків матеріалу, мм				
			0...3	5	10	15	20
45	1,7495	0,5831	1,1664	0,4121	0,1137	0,0496	0,0077
50	5,0982	1,6992	3,3990	1,2009	0,3313	0,1446	0,0224
55	9,2426	3,0838	6,1588	2,1760	0,6003	0,2669	0,0406
60	14,5493	4,8493	9,7000	3,4272	0,9455	0,4126	0,0640

З бункера матеріал розвантажується у послідовності – від самого дрібного до найбільш крупного. Ширина сипкого матеріалу на конвеєрній стрічці може складати 0,4 м, а середнє значення висоти насипання – 0,08 м. Тоді довжина дробленої руди на конвеєрній стрічці, що сходить за один цикл розвантаження бункера, буде залежати від кута сходження  $\alpha_S$  (табл. 2). Як видно з даних табл. 2, довжина матеріалу на конвеєрній стрічці зростає зі збільшенням кута сходження. При певному куті сходження дрібний матеріал займає наближено половину його довжини на конвеєрній стрічці. Друга половина зайнята дробленою рудою з середньою крупністю 5 мм і 10...20 мм. Зростання кута сходження приводить до збільшення в рази протяжності матеріалу на конвеєрній стрічці в межах одного циклу розвантаження бункера.

Таблиця 2 – Довжина матеріалу, розташованого на конвеєрній стрічці з висотою насипання 0,08 м, в залежності від кута сходження дробленої руди в одному циклі розвантаження бункера, м

Кут сходження $\alpha_S, ^\circ$	Крупність шматків матеріалу, мм			
	0...3	5	10...20	0...20
45	36,450	12,878	5,344	54,672
50	106,219	37,528	15,572	159,319
55	192,462	68,0	28,369	288,831
60	303,125	107,1	44,441	454,666

На характер розвантаження матеріалу на конвеєрну стрічку також значно впливає висота його насипання. Як видно з даних табл. 3, довжина розташування дробленої руди при переході з найменшого значення  $h_M=0,06$  м до найбільшого  $h_M=0,10$  м скорочується до 0,6. Те ж саме відбувається стосовно окремих класів крупності дробленої руди. Отже, на довжину потоків дробленої руди, що розташовується на конвеєрній стрічці за один цикл розвантаження бункера, сильно впливають кут сходження матеріалу і висота його насипання.

Таблиця 3 – Довжина матеріалу на конвеєрній стрічці в залежності від висоти насипання при куті сходження  $45^\circ$  в одному циклі розвантаження бункера, м

Висота насипання матеріалу $h_M$ , м	Крупність шматків матеріалу, мм			
	0...3	5	10...20	0...20
0,06	48,60	13,22	5,55	67,37
0,10	29,16	7,93	3,32	40,41

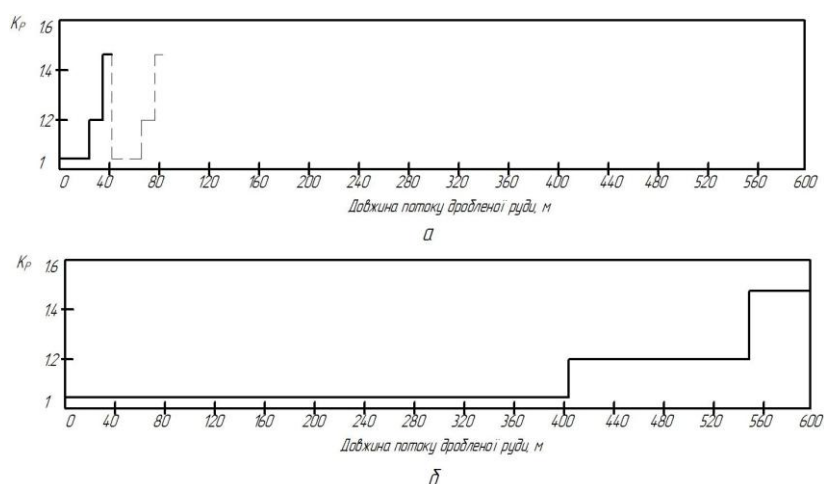


Рисунок 4 – Граничні зміни довжини потоку і коефіцієнта розпушення вихідної руди в залежності від кута сходження і висоти насипання матеріалу в одному циклі розвантаження бункера:  
 а – при  $\alpha_S=45^\circ$ ,  $h_M=0,10$  м; б – при  $\alpha_S=60^\circ$ ,  $h_M=0,06$  м

Найбільш повну і загальну характеристику формування потоків сипкого матеріалу на конвеєрній стрічці в межах одного циклу розвантаження бункера дає розгляд граничних умов, які подані на рис. 4. Ними є, з одного боку, мінімальний кут сходження  $\alpha_S=45^\circ$  і максимальна висота насипання матеріалу 0,1 м, а, з іншого боку, максимальний кут сходження  $\alpha_S=60^\circ$  і мінімальна висота насипання  $h_M=0,06$  м. Вони несуть інформацію про довжину розташування матеріалу на конвеєрній стрічці в циклах розвантаження бункера. Важливими параметрами є і якісні показники матеріалу по його довжині. Найбільш характерними з них рахують крупність дробленого матеріалу та його розпушення, яке оцінюють коефіцієнтом розпушення  $K_P$ , що дорівнює відношенню об'єму розпушеної руди до її об'єму в незруйнованому стані. Коефіцієнт розпушення завжди більший одиниці і залежить від гранулометричного складу дробленої маси, форми та взаємного розташування шматків зруйнованої руди. У бункері, крім того, на його величину впливають зовнішні фактори – тривалість знаходження у розпушеному стані (самоущільнення), тиск, вологість, ємкість і форма споруди. Сипкий матеріал, приведений в рух при розвантаженні бункера, звільняється від впливу зовнішніх факторів. Тому його коефіцієнт розпушення визначається гранулометричним складом, формою та взаємним розташуванням шматків. При подачі сипкого матеріалу на конвеєрну стрічку певним дозатором забезпечується визначене взаємне розташування шматків руди. Оскільки характер і якість розпушення руди визначаються самим процесом, а не її фізичними властивостями, форму створюваних шматків при цьому можливо рахувати цілком визначенню і практично незмінною. Тому коефіцієнт розпушення матеріалу на конвеєрній стрічці в основному залежить від гранулометричного складу, який в першому наближенні можливо оцінювати значенням середньозваженої крупності. Коефіцієнт розпушення зростає при збільшенні середньозваженого розміру шматків руди. Гранулометричний склад дробленого матеріалу розглядають для всього масиву, однак в даному випадку, враховуючи особливості технологічного процесу, він подається у перетвореному вигляді сукупністю класів 0...3 мм, 5 мм, 10...20 мм. При цьому середньозважений розмір шматків руди  $d_{CP}$  необхідно визначати для цих класів крупності. Для прийнятого матеріалу він відповідно становить 1,6 мм, 5 мм і 11,9 мм. Беручи до уваги те, що скельові породи при крупному дробленні характеризуються коефіцієнтом розпушення 1,8...2,5, а більш дрібні матеріали, наприклад пісок, мають  $K_P=1,05...1,2$ , і те, що вихідне живлення кульового млина містить вагому частку дрібного матеріалу та розмір найкрупнішого шматка 20 мм, діапазон зміни зна-

чень коефіцієнта розпушення доцільно прийняти в межах від 1,0 до 1,8. Приймавши лінійну модель зміни коефіцієнта розпушення, що відповідає рівнянню  $K_p=1+0,04 d_{CP}$ , з ростом середньозваженого діаметра шматків руди, для визначених розмірів дробленого матеріалу у класах крупності  $K_p$  відповідно становить 1,06; 1,20; 1,48. Отже, в кожному циклі розвантаження бункера на конвеєрній стрічці формуються ділянки з різними значеннями коефіцієнта розпушення матеріалу, що показано на рис. 4. Як видно з рис. 4,а, при малих кутах сходження матеріалу ці ділянки короткі. Вони набагато довші при найбільшому куті сходження  $\alpha_s=60^\circ$  і найменшій висоті насипання матеріалу  $h_M=0,06$  м, що показано на рис. 4, б. Тут перевищення довжини розташування матеріалу досягає майже 14-кратного значення. Такі ж пропорції зберігаються і в окремих класах крупності. Всі інші реалізації процесів розподілу сипкого матеріалу на конвеєрній стрічці, що відповідають кутам сходження  $45^\circ < \alpha_s < 60^\circ$  і висотам  $0,06 \text{ м} < h_M < 0,1$  м, займають проміжні значення між графіками, наведеними на рис. 4.

Графіки на рис. 4 відповідають ідеалізованому процесу розподілу матеріалу. В реальних умовах переходи між значеннями  $K_p$  будуть більш плавними, оскільки на стиках матеріал змішується. Достатньо велика різниця між значеннями  $K_p$  на окремих ділянках потоку свідчить про те, що на конвеєрні ваги і в кульовий млин сипкий матеріал надходить зі значними циклічними змінами. Такі зміни в рамках циклів розвантаження бункера можуть відбуватися достатньо швидко і занадто повільно, коли довжина порівняно однорідного матеріалу на конвеєрній стрічці досягає до 400 м. Це при  $h_M=const$  потребує зміни руху конвеєрної стрічки в процесі автоматичного завантаження кульового млина.

Приведені на рис. 4 граничні процеси розподілу матеріалу на конвеєрній стрічці малоймовірні. На практиці більш характерними є осереднені процеси, а це означає, що на конвеєрній стрічці в основному розташовуються ділянки достатньої протяжності з середньою крупністю руди 1,6 мм, 5 мм і 11,9 мм та відповідно коефіцієнтом розпушення 1,06; 1,20; 1,48. Збільшення  $K_p$  означає зменшення маси твердого в зайнятому розпушеним матеріалом об'ємі. Такі ділянки потоку послідовно проходять через конвеєрні ваги, впливаючи на їх опорний ролик [12]. Сила, що діє на опорний ролик, є випадковим процесом, оскільки сипкий матеріал на конвеєрній стрічці розташований нерівномірно. Ця нерівномірність збільшується завдяки тому, що матеріал фактично складається не з однакових частинок руди, поданих  $d_{CP}$  у кожному класі крупності, а з різнорозмірних складових, які змінюються в діапазоні від  $d_{min}$  до  $d_{max}$ . Ділянки потоку з дрібним матеріалом викликають на опорному ролику випадковий процес з малою амплітудою і порівняно великою коливальністю. Для більш крупного матеріалу характерним є зростання амплітуди і зменшення коливальності випадкового процесу. Зміна швидкості руху конвеєрної стрічки на амплітуду випадкового процесу не впливає, а коливальність змінює.

**Висновки.** Розвантаження бункерів на збагачувальних фабриках здійснюється циклічно. В кожному циклі в залежності від кута сходження виділяється різна кількість матеріалу, який живильником подається на конвеєрну стрічку, де спочатку розташовуються дрібні фракції, потім середні, а в кінці самі крупні. Протяжність матеріалу на конвеєрній стрічці за один цикл розвантаження бункера значна і визначається кутом сходження і висотою насипання. Ділянки з трьома класами крупності мають різну довжину і відрізняються коефіцієнтами розпушення. Такий характер розташування матеріалу вздовж конвеєрної стрічки вимагає регулювання її швидкості при автоматичному керуванні завантаженням кульового млина і збуджує змінну складову навантаження опорного ролика конвеєрних вагів у вигляді випадкового процесу з різними на окремих ділянках амплітудами і коливальностями, що викликає додаткову похибку вимірювання.

Перспективою подальших досліджень є удосконалення конвеєрних вагів і системи автоматичного управління завантаженням та розрідженням пульпи у кульових млинах з циркулюючим навантаженням.

### Література

1. Маляров П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки: [монографія] / Маляров П.В.— Ростов-на-Дону: ООО “Ростиздат”, 2004.— 320 с.
2. Измельчение. Энергетика и технология: [учебное пособие для вузов] / [Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др.]— М.: Изд. дом “Руда и металлы”, 2007.— 296 с.



3. Пат. 40465 Україна, МПК В 03 В 11/00, В 02 С 25/00. Пристрій автоматичної стабілізації розрізання пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням / Кондратець В.О., Сербул О.М.; заявник і патентовласник Кіровоградський нац. техн. ун-т.– №U200813005; заявл. 10.11.08; опубл. 10.04.09, Бюл.№7.
4. Каталимов А.В. Дозирование сыпучих и вязких материалов / А.В. Каталимов, В.А. Любартович.– Л.: Химия, 1990.– 240 с.
5. Walters J.K. A Theoretical Analysis of Stresses in Silos with Vertical Walls // Chemical Engineering Science.– 1973.– V.28.– P. 13–21.
6. Бушманова О.П. Исследование задачи Янсена / О.П. Бушманова, А.Ф. Ревуженко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.– 1981.– №3.– С. 3–15.
7. Cowin S.C. The Theory of Static Loads in Bins // Journal of Applied Mechanics.– 1977.– V.44.– №9.– P. 409–412.
8. Takami A., Syoten O. A Theory of the Pressure Distribution in Powder in Equilibrium in a Cylindrical Vessel // Powder Technology.– 1974.– V.10.– P. 295–301.
9. Прошунин Ю.Е. Математическая модель истечения сыпучих материалов / Ю.Е. Прошунин // Горный журнал.– 2004.– №10.– С. 82–83.
10. Прошунин Ю.Е. О совершенствовании математической модели выпуска сыпучих материалов / Ю.Е. Прошунин // Известия Томского политехнического университета.– 2007.– Т. 310.– №3.– С. 44–49.
11. Минько Р.Н. Исследование динамики истечения сыпучих однородных материалов для повышения эффективности разгрузки отпусковых бункеров в условиях длительного хранения: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» / Р.Н. Минько.– Рыбинск, 2013.– 16с.
12. Кондратець В.О. Дослідження випадкового процесу навантаження опорного ролика конвеєра в умовах осередненого потоку руди / В.О. Кондратець // 36. наук. праць Національного гірничого університету.– Дніпропетровськ: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2013.– №43.– С. 79–88.

Bibliography (transliterated)

1. Malyarov P.V. Osnovy intensifikatsii protsessov rudopodgotovki: [monografiya]. Malyarov P.V.– Rostov-na-Donu: ООО “Rostizdat”, 2004.– 320 p.
2. Izmelchenie. Energetika i tehnologiya: [uchebnoe posobie dlya vuzov]. [Pivnyak G.G., Vaysberg L.A., Kirichenko V.I. i dr.]– M.: Izd. dom “Ruda i metally”, 2007.– 296 p.
3. Pat. 40465 Ukrayina, MPK B 03 B 11/00, V 02 S 25/00. Pristriy avtomatichnoyi stabilizatsiyi rozridzheniya pulpi v mlinah z tsirkulyuyuchim navantazhennyam. Kondratets V.O., Serbul O.M.; zayavnik i patentovlasnik Kirovogradskiy nats. tehn. un-t.– #U200813005; zayavl. 10.11.08; opubl. 10.04.09, Byul.#7.
4. Katalyimov A.V. Dozirovanie syipuchih i vyazkih materialov. A.V. Katalyimov, V.A. Lyubartovich.– L.: Himiya, 1990.– 240 p.
5. Walters J.K. A Theoretical Analysis of Stresses in Silos with Vertical Walls. Chemical Engineering Science.– 1973.– V.28.– P. 13–21.
6. Bushmanova O.P. Issledovanie zadachi Yansena. O.P. Bushmanova, A.F. Revuzhenko. Fiziko-tehnicheskie problemyi razrabotki poleznyih iskopaemyih.– 1981.– #3.– P. 3–15.
7. Cowin S.C. The Theory of Static Loads in Bins. Journal of Applied Mechanics.– 1977.– V.44.– #9.– P. 409–412.
8. Takami A., Syoten O. A Theory of the Pressure Distribution in Powder in Equilibrium in a Cylindrical Vessel. Powder Technology.– 1974.– V.10.– P. 295–301.
9. Proshunin Yu.E. Matematicheskaya model istecheniya syipuchih materialov. Yu.E. Proshunin. Gorniy zhurnal.– 2004.– #10.– P. 82–83.
10. Proshunin Yu.E. O sovershenstvovanii matematicheskoy modeli vyipuska syipuchih materialov. Yu.E. Proshunin. Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta.– 2007.– Т. 310.– #3.– P. 44–49.
11. Minko R.N. Issledovanie dinamiki istecheniya syipuchih odnorodnyih materialov dlya povyisheniya effektivnosti razgruzki otpusknyih bunkerov v usloviyah dlitel'nogo hraneniya: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tehn. nauk: spets. 01.02.06 «Dinamika, prochnost mashin, priborov i apparatury». R.N. Minko.– Rybinsk, 2013.– 16 p.

12. Kondratets V.O. Doslidzhennya vipadkovogo protsesu navantazhennya opornogo rolіka konveera v umovah oserednenogo potoku rudi. V.O. Kondratets. Zb. nauk. prats Natsionalnogo girnichogo universitetu.– Dnipropetrovsk: Derzhavniy vischiy navchalniy zaklad «Natsionalniy girnichiy universitet», 2013.– #43.– P. 79–88.

УДК 681.5.015

Кондратец В.А., Мацуй А.Н.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДРОБЛЕНОЙ РУДЫ ВДОЛЬ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ ПРИ РАЗГРУЗКЕ БУНКЕРОВ**

Показано, что разгрузка бункеров на обогатительных фабриках осуществляется циклично. В каждом цикле в зависимости от угла схождения, определяемого свойством и состоянием кусковой смеси, выделяется разное количество материала, который через определенное время с помощью питателя поступает на конвейерную ленту. Независимо от выделенного в цикле разгрузки объема сыпучего материала благодаря сегрегации он на конвейерной ленте распределяется в строгой последовательности – наиболее мелкий, средней крупности и самый крупный. Общая протяженность материала на конвейерной ленте за цикл разгрузки будет различной, различными будут и коэффициенты разрыхления на участках с отличающейся средневзвешенной крупностью кусков. Такой характер расположения материала вдоль конвейерной ленты сильно влияет на работу конвейерных весов и шаровой мельницы, качественную автоматическую загрузку которой возможно осуществить только с учетом отмеченных особенностей и изменения скорости движения рудного потока. Создаваемый при разгрузке бункера рудный поток возбуждает переменную составляющую нагрузки опорного ролика конвейерных весов в виде случайного процесса с различными на отдельных участках потока амплитудами и колебательностями, что вызывает дополнительную погрешность измерения.

Kondratets V.A., Matsui A.N.

**MODELING OF DISTRIBUTED CRUSHED ORE ALONG THE CONVEYING BELT IN OFFLOADING HOPPERS**

It is shown that the discharge hoppers at concentrators performed cyclically. In each cycle, depending on the angle of convergence, defines the properties and state of lumpy mixture allocated different amounts of material, which after a certain time with a runner arrives on a conveyor belt. Regardless of the selected cycle unloading volume of bulk material due to the segregation of it on the conveyor belt is distributed in strict sequence – most small, medium size and the largest. The total length of material on the conveyor belt for discharge cycle will be different, different factors will loosen in areas with different average particle size pieces. Such nature of the arrangement of the material along the conveyor belt strongly affects the weighing conveyor and ball mill, high-quality automatic downloading of which can only be done in view of the marked change in the features and speed of the ore stream. Created when unloading hopper ore flow excites variable component load bearing roller conveyor scales in the form of a random process with different on different segments and vibrational amplitudes flow, causing additional measurement error.

УДК 66.092.147.542

Пономаренко А.В., Ведь В.Е., Петар Варбанов, Сатаев М.И.

### КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ГЕТЕРОГЕННО-КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

Современный подход к разработке инженерного оформления гетерогенно-каталитических процессов очистки газов основывается на разработке кинетической модели исследуемой реакции с учетом влияния входных параметров. [1,2]. Определение таких параметров и степени их влияния на процесс является важной задачей. Решение поставленной задачи основано на детальном изучении гетерогенно-каталитического процесса нейтрализации вредных газовых выбросов и определении закономерностей, которые описывают кинетическую область протекания процесса и дают возможность подбора оптимального состава катализатора [3].

После стадии переноса вещества из газового потока на поверхность носителя с нанесенными на него каталитически активными элементами скорость гетерогенно-каталитического процесса обуславливается скоростью химической реакции [4];

$$w_i = -\frac{dn_i}{dt} \cdot \frac{1}{F}, \quad (1)$$

где  $w_i$  – скорость химической реакции  $i$ -го газообразного вещества, г/с;  $n_i$  – количество вещества  $i$ -го газообразного компонента, моль;  $dt$  – времена контакта взаимодействующих фаз, с;  $F$  – площадь контакта фаз, м<sup>2</sup>.

Учитывая, что:

$$n_i = C_i \cdot V_p, \quad (2)$$

где  $V_p$  – объем реактора, м<sup>3</sup>;  $C_i$  – концентрация  $i$ -го газообразного компонента, г/м<sup>3</sup>;

а также связь площади контакта фаз с поверхностной концентрацией каталитически активного соединения на носителе:

$$F = S_k \cdot C_{kat}^m, \quad (3)$$

где  $S_k$  – площадь, занятая катализатором, м<sup>2</sup>;  $C_{kat}$  – концентрация каталитически активного соединения, г/м<sup>2</sup>;  $m$  – показатель степени;

на основе закона действующих масс [5] описание химической реакции в кинетической области протекания гетерогенно-каталитического процесса имеет вид:

$$-\frac{dC_i}{dt_k} = k \cdot C_i \cdot \frac{S_k}{V_p} \cdot C_{kat}^m, \quad (4)$$

где  $k$  – константа скорости химической реакции, с<sup>-1</sup>.

Температурная зависимость константы скорости реакции по уравнению Аррениуса [4]:

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (5)$$

где  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $E$  – энергия активации, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура в зоне реакции, К.

Исследования проводились на лабораторном стенде с использованием реактора РИС-П [6] при изучении протекания гетерогенно-каталитической нейтрализации газовой смеси, состоящей из углеводородов и кислорода, на керамическом носителе с нанесенным на его поверхность катализатором  $Co_3O_4$ . Подаваемая в реактор газовая смесь содержит кислород в значительном избытке по отношению к органическим примесям. При условии, что адсорбция реагентов на поверхности каталитического преобразователя

соответствует изотерме Ленгмюра [7] и его поверхность является однородной, то протекающую реакцию можно рассматривать как реакцию первого порядка по углеводородам.

В результате интегрирования выражения (1) от  $C_k$  до  $C_0$  и от  $0$  до  $t_k$  получена зависимость степени превращения углеводородов в кинетической области от параметров процесса:

$$x_k = 1 - \exp\left(-t_k \cdot \frac{273}{T} \cdot k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot C_k^n \cdot \frac{S_k}{V_p}\right). \quad (6)$$

где  $C_0^{C_6H_6}$  – концентрация газообразного вещества в начальный момент времени, г/м<sup>3</sup>;  $C_k^{C_6H_6}$  – концентрация газообразного вещества в конце реакции, г/м<sup>3</sup>;  $t_k$  – время контакта газового потока с катализатором, с.

На основании полученной зависимости (6) проведен ряд экспериментов, в которых исследовались температурные зависимости каталитической конверсии углеводородов от управляющих параметров процесса: начальной концентрации углеводородов, поверхностной концентрации каталитически активных элементов на носителе, времени контакта фаз и площади носителя, занятой каталитически активными центрами.

Для нахождения таких параметров выражения (26), как предэкспоненциальный множитель  $k_0$ , энергия активации  $E$  и значение степени  $n$ , зависимость (4) с учетом (5) логарифмирована и линейризована:

$$\ln\left(\ln \frac{C_0^{C_6H_6}}{C_k^{C_6H_6}}\right) = \ln(k_0) - \frac{E}{RT} + n \cdot \ln C_k + \ln \frac{S_k}{V_p} + \ln t_k. \quad (7)$$

По данным проведенных экспериментов составлен массив значений, входящих в зависимость (6), в количестве 48 точек. В результате вычислений выражения (7) найдены значения энергии активации  $E=1,331 \cdot 10^5$  Дж/моль; предэкспоненциального множителя  $k_0=3,358 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup> и показателя степени  $n=0,547$ .

По полученному выражению (6) рассчитаны значения степеней превращения углеводородов в кинетической области при различных значениях поверхностной концентрации катализатора на носителе, начальной концентрации углеводородов в газовом потоке, времени контакта фаз и площади носителя, занятой каталитически активными центрами.

Результаты расчетов и сравнение их со значениями степеней конверсии углеводородов, полученными на основании экспериментальных данных, графически представлены на рис. 1–4.

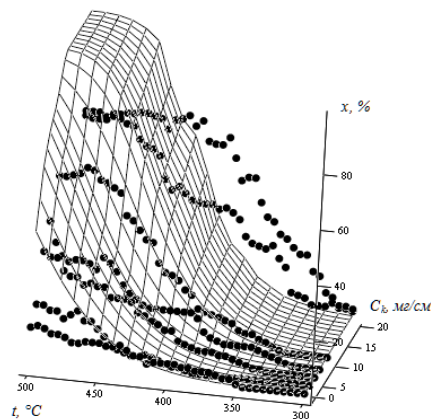


Рисунок 1 – Температурные зависимости степеней каталитической деструкции углеводородов (%) по экспериментальным данным (точки) и по модели протекания процесса в кинетической области (кривые) для каталитических нейтрализаторов с различной поверхностной концентрацией катализатора  $Co_3O_4$  (мг/см<sup>2</sup>)

Как показано на рис. 1, экспериментальные данные достаточно хорошо аппроксимируются кривой, полученной по выражению (6), до температуры перехода кинетической области протекания исследуемого процесса в диффузионную. Значения этой температуры варьируются в пределах 420–430 °С. Степень термокаталитической конверсии бензола возрастает с увеличением поверхностного содержания каталитически активных центров на носителе до концентрации насыщения.

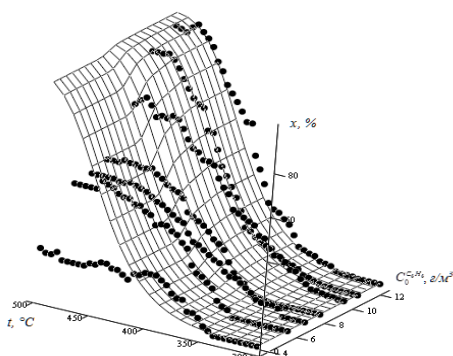


Рисунок 2 – Температурные зависимости степеней каталитической деструкции паров углеводородов (%) по экспериментальным данным (точки) и по модели протекания процесса в кинетической области (кривые) при различной начальной концентрации паров углеводородов в газовом потоке ( $\text{г/м}^3$ )

При изменении начальной концентрации углеводородов в газовом потоке от  $3,608$  до  $8,095 \text{ г/м}^3$  (рис. 2) экспериментальные данные хорошо описываются полученной зависимостью (6) до температуры перехода кинетической области протекания процесса в диффузионную, которая во всех представленных случаях находится в пределах  $415\text{--}430 \text{ }^\circ\text{C}$ . С увеличением начальной концентрации углеводородов в потоке газа с  $9,814$  по  $12,41 \text{ г/м}^3$  температура перехода кинетической области в диффузионную отмечена  $430 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $480 \text{ }^\circ\text{C}$ .

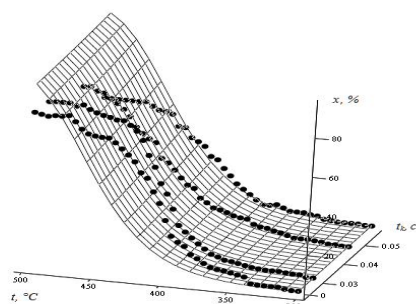


Рисунок 3 – Температурные зависимости степеней каталитической деструкции паров углеводородов по экспериментальным данным (точки) и по модели протекания процесса в кинетической области (кривые) при различном времени контакта фаз (с)

Температура перехода кинетической области протекания изучаемого процесса в диффузионную возрастает от  $440$  до  $475 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3) при уменьшении времени контакта взаимодействующих фаз, т.е. при увеличении скорости газового потока.

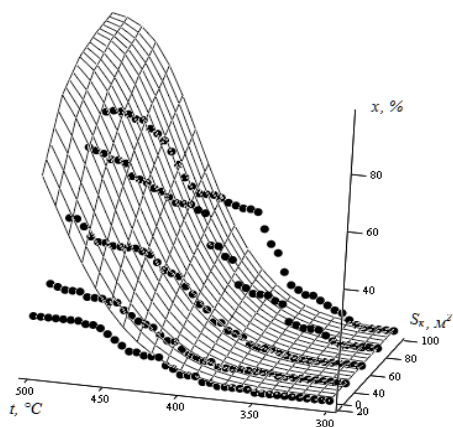


Рисунок 4 – Температурные зависимости степеней каталитической деструкции паров углеводородов (%) по экспериментальным данным (точки) и по модели протекания процесса в кинетической области (кривые) для оксиднокобальтового каталитического нейтрализатора при различных значениях площади, занятой каталитически активными центрами, по отношению к общей площади носителя (%)

Температура перехода кинетической области исследуемого процесса в диффузионную область при всех изучаемых значениях площадях носителя, занятых каталитически активными центрами, отмечается в пределах значений 425–430 С (рис. 4).

Совместное использование полученной зависимости (6) с зависимостью степени превращения углеводов во внешнедиффузионной области протекания гетерогенно-каталитического процесса, описанной в работе [8], позволили получить общую модель протекания гетерогенно-каталитического процесса деструкции углеводов с учетом влияния всех входных параметров:

$$\begin{cases} x_k = 1 - \exp\left(-t_k \cdot \frac{273}{T} \cdot k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot C_k^n \cdot \frac{S_k}{V_p}\right); \\ x_d = 1 - \exp\left(-\beta \cdot t_k \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{S}{V_p}\right). \end{cases} \quad (8)$$

Целесообразность и эффективность использования предложенной модели (8) для описания термокаталитической деструкции углеводов в кинетической и диффузионной областях протекания гетерогенно-каталитического процесса подтверждена экспериментально. Результаты экспериментов и расчетов графически представлены на рис. 5.

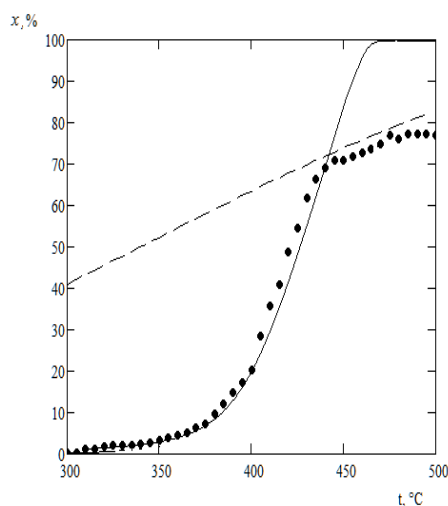


Рисунок 6 – Температурные зависимости степени каталитической конверсии паров углеводов (%), полученные для кинетической области  $x_k$  (сплошная кривая), внешнедиффузионной области  $x_d$  (пунктирная кривая) и по экспериментальным данным (точки)

Проведенные исследования дают возможность использовать полученные данные по кинетике для моделирования протекания процесса в промышленных аппаратах. Предложенная модель расчетов (8) послужила основой для проектирования и изготовления эффективного каталитического преобразователя газовых выбросов от мусороперерабатывающей установки для морского торгового порта г. Херсона [9].

**Благодарность.** Работа выполнена при поддержке Европейской комиссии, проект DISKNET PIRSES-GA-2011-294933.

#### Литература

1. Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering / Octave Levenspiel – New York: John: Wiley & Sons, Inc., 1999. – 684 p.
2. Махлин В.А. Разработка и анализ гетерогенно-каталитических процессов и реакторов / В.А. Махлин // Теоретические основы химической технологии – 2009. – Т. 43. – № 3. – С. 261–275.
3. Ахназаров С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии / Ахназаров С.Л., Кафаров В.В. – М.: Высш. шк. – 1985. – 327 с.
4. Царева З.М. Теоретические основы химической технологии / Царева З.М., Орлова Е. И. – Киев: Вища шк., 1986. – 271 с.
5. Крылов О.В. Гетерогенный катализ / Крылов О.В. – М.: "Академкнига", 2004. – 679 с.

6. Пономаренко А.В. Стенд для изучения кинетических и газодинамических параметров каталитических процессов очистки газов / А.В. Пономаренко, Е.В. Краснокутский, В.Е. Ведь, В.А. Коший // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – Харків: НТУ «ХПІ» – № 2. – 2013. – С. 82–86.
7. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / Касаткин А.Г. – М.: ООО ТИД "Альянс", 2004. – 753 с.
8. Пономаренко А.В. Определение коэффициента массоотдачи в оформлении гетерогенно-каталитических процессов / А.В. Пономаренко, В.Е. Ведь // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – Харків: «Технологічний центр». – 2014. – №2/6(68). – С. 42–46.
9. Пономаренко А.В. Создание каталитического блока очистки газовых выбросов мусороперерабатывающей установки производительностью 100 гк/ч / В.Е. Ведь, А.В. Пономаренко, Е.В. Краснокутский // *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. – Одеса: ОНАХТ. – 2014. – Вип. 45. – Т. 3.– С. 180–185.

Bibliography (transliterated)

1. Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering. Octave Levenspiel – New York: John: Wiley & Sons, Inc., 1999. – 684 p.
2. Mahlin V.A. Razrabotka i analiz geterogenno-kataliticheskikh protsessov i reaktorov. V.A. Mahlin. Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii – 2009. – Т. 43. – # 3. – P. 261–275.
3. Ahnazarov S.L., Kafarov V.V. Metody optimizatsii v himicheskoy tehnologii. Ahnazarov S.L., Kafarov V.V. – М.: Vyssh. shk. – 1985.– 327 p.
4. Tsareva Z.M. Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii. Tsareva Z.M., Orlova E.I. – Kiev: Vischa shk.,1986. – 271 p.
5. Kryilov O.V. Geterogenyiy kataliz. Kryilov O.V. – М.: "Akademkniga", 2004. – 679 p.
6. Ponomarenko A.V. Stend dlya izucheniya kineticheskikh i gazodinamicheskikh parametrov kataliticheskikh protsessov ochistki gazov. A.V. Ponomarenko, E.V. Krasnokutsky, V.E. Ved, V.A. Koschiiy. Integrovani tehnologii ta energozberezhennya. – Harkov: NTU «ХПІ» – # 2. – 2013. – P. 82–86.
7. Kasatkin A.G. Osnovnyie protsessy i apparaty himicheskoy tehnologii. Kasatkin A.G. – М.: ООО ТИД "Альянс", 2004. – 753 p.
8. Ponomarenko A.V. Opredelenie koeffitsienta massootdachi v oformlenii geterogenno-kataliticheskikh protsessov. A.V. Ponomarenko, V.E. Ved. Shidno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologii. – Harkiv: «Tehnologichnyi tsentr». – 2014. – #2/6(68). – P. 42–46.
9. Ponomarenko A.V. Sozdanie kataliticheskogo bloka ochistki gazovyih vyibrosov musoropererabatyivayushey ustanovki proizvoditelnostyu 100 gk/ch / V.E. Ved, A.V. Ponomarenko, E.V. Krasnokutsky. Naukovi pratsi Odeskoyi natsionalnoyi akademiyi harchovih tehnologiy. – Odesa: ONAHT. – 2014. – Vip. 45. – Т. 3.– P. 180–185.

УДК 66.092.147.542

Пономаренко Г.В., Ведь В.Є., Петар Варбанов, Сатаєв М.І.

**КІНЕТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПЕРЕБІГУ ГЕТЕРОГЕННО-КАТАЛІТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ**

Запропоновано залежність перебігу гетерогенно-каталітичного процесу окиснення газових викидів у кінетичній області на каталізаторі –  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , нанесеному на керамічний носій, з урахуванням впливу керуючих параметрів процесу: поверхневої концентрації каталізатору на носії, концентрації забруднюючих речовин у газовому потоці, швидкості газового потоку, зайнятої каталітичними сполуками площі носія.

Ponomarenko A.V., Ved` V.E., Petar Varbanov, Sataev M.I.

**KINETIC REGULARITIES OF HETEROGENEOUS CATALYTIC PROCESSES  
OF GAS EMISSIONS PURIFICATION**

A mathematical model of the heterogeneous catalytic process gas emissions oxidation course in the kinetic and external diffusion areas on the catalyst –  $\text{Co}_3\text{O}_4$  deposited on a ceramic carrier is suggested. The model contains parameters: surface catalyst concentration on the carrier, pollutants concentration in the gas flow, gas flow rate, the carrier area by catalytic compounds occupied.

УДК 665.63:66.045.126

Товажнянский Л.Л., Арсеньева О.П., Петар Варбанов, Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Лидия Чучек

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ПОДОГРЕВА ОТОПИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ**

**Введение.** Проблема реконструкции нефтеперерабатывающих заводов, в том числе увеличение степени рекуперация тепла и совершенствование теплопередающего оборудования, по-прежнему является одной из важнейших задач общей модернизации технологии переработки нефти, энергосбережения и экологической безопасности. С другой стороны различная конфигурация заводов, многообразие видов сырья по качественному составу и конечной продукции производства, не позволяют выработать однозначные подходы к решению этой задачи. Многообразие процессов нагрева и охлаждения в процессе технологии как неглубокой, так и глубокой переработки нефти, позволяют применять рекуперацию тепла различных стадий обработки сырья. Кроме того, высокотемпературные технологические процессы делают возможным осуществлять подогрев воды централизованного отопления для коммунальной сферы. Все это делает задачу тепловой реконструкции технологической схемы, а также замену или модернизацию теплового оборудования для повышения уровня энергосбережения, актуальной задачей, имеющей научную и практическую ценность.

**Анализ исследований и публикаций.** Проблеме тепловой реконструкции нефтехимических заводов посвящено огромное количество теоретических и экспериментальных исследований. В настоящее время наиболее эффективным методом в многочисленных исследованиях принято считать «пинч-анализ» [1,2]. Метод «пинч-анализа» позволяет на стадии проектирования и при модернизации снизить энергопотребления за счет более высокой доли регенерации тепла, которое достигается повышением тепловой интеграции технологического процесса, что и есть главное приложение «пинч-анализа». При этом достижения «пинч-анализа» не могут быть реализованы без внедрения нового современного теплопередающего оборудования и правильного его расчета.

Усовершенствование регенерации тепла является одним из наиболее эффективных методов снижения энергопотребления. Усовершенствование регенерации тепла напрямую связано с оптимизацией и реконструкцией теплообменных систем. Выбор оптимального варианта (то есть связанного с наименьшими затратами на дополнительную площадь поверхности теплообмена и на структурные изменения сети) из множества альтернатив является важной составной частью проектирования.

Существующие методы реконструкции теплообменных систем применяют либо «пинч-анализ», либо методы математического программирования. При использовании «пинч-анализа» процедура проектирования состоит из двух этапов: этапа определения целевых значений и этапа проектирования. Основное преимущество использования этого метода заключается в интерактивном характере процедуры проектирования. К недостаткам следует отнести длительные процедуры ручного расчета, а также возможность генерирования слишком сложных вариантов проекта из-за неявного учета стоимостных критериев при расчете.

С применением методов математического программирования задача проектирования оптимальной теплообменной системы формулируется как задача нелинейного математического программирования, состоящая из набора уравнений и ограничений. К преимуществам подобных методов следует отнести возможность автоматизации расчетов, а к недостаткам – ограниченные возможности для активного участия проектировщика и необходимость в ряде существенных упрощений при оценке стоимости.

Среди последних публикаций необходимо отметить работу [3], посвященную общей проблеме утилизации отработанного тепла при различных расходах теплоносителей. Улучшение технологии, применение нового оборудования требуют внесения изменений в топологию установки теплообменников даже, когда теплообменная сеть была запроектирована с использованием «пинч-анализа». С этой точки зрения рассмотрена задача снижения затрат утилит при модернизации теплообменных сетей (HEN), а также их использование в коммунальном теплоснабжении.

Новый графический метод для приложений «пинч-анализа», в частности представления теплообменной сети, предложен в [4]. Графики, разработанные в этой работе, могут быть использованы для анализа энергетической эффективности существующих сетей. Они также могут быть применены для того, чтобы изменить основную конструкцию сети или уже существующую сеть для улучшения интеграции энергии и минимизации расхода топлива.

В работе [5] рассмотрена реконструкция отделения предварительного нагрева сырой нефти перед блоком перегонки. Используя программное обеспечение, авторам удалось промоделировать теплообменную сеть с лучшими показателями по сравнению с существующей сетью. Проведенный анализ показал



не только возможность повышения выходной температуры сырой нефти, но и экономии тепла для достижения этой цели.

Для процесса перегонки сырой нефти операционные переменные процесса дистилляции оказывают критическое влияние на стоимость продукции и потребление энергии. Однако существует противоречие между минимальным потреблением энергии и максимальным выходом продукции, которое не позволяет добиться максимального экономического эффекта. В статье [6] сформулирован системный подход оптимизации годового экономического эффекта, учитывающий одновременно стоимость продукта и стоимость потребления энергии. Для описания процесса перегонки нефти используется Aspen Plus пакет, адаптированный для целей рекуперации тепла.

В работе [7] представлен двухуровневый подход для модификации теплообменных сетей, с целью максимизировать производительность и минимизировать эксплуатационные расходы существующих тепловых интегрированных систем дистилляции сырой нефти. На первом уровне допускается изменение топологии существующей сети: добавление, удаление, перестановка и перемещение теплообменников, изменение тепловой нагрузки, разветвление потоков, а также изменение разделения потоковых фракций. На втором уровне происходит проверка нарушения ограничений и устранение ошибок, которое производится нелинейным методом наименьших квадратов.

Разработке математических моделей и практическому проектированию пластинчатых теплообменных аппаратов для различных промышленных приложений посвящены работы [8,9], где рассмотрены не только вопросы прямого использования теплообменников, но и их оптимальный расчет, включая применение аппаратов различного типа.

Ключевой проблемой при эксплуатации теплообменных аппаратов всех типов является прогнозирование их работоспособности во времени. Несмотря на достигнутые успехи при моделировании появления и прогнозирования загрязнений вор времени [10,11] этот вопрос для многих отраслей промышленности остается недостаточно изученным.

**Цель работы и постановка задачи.** Целью настоящего исследования является выбор и расчет рекуперативных теплообменных аппаратов для различных схем подогрева сырой нефти, полученных в результате тепловой реконструкции нефтеперегонного завода. Предусмотрена установка дополнительных аппаратов на позициях подогрева сырой нефти и подогрева воды на нужды коммунального теплоснабжения. Также необходимо провести анализ работоспособности различных тепловых схем и прогнозировать работу теплообменников в процессе эксплуатации. В рамках работы предусмотрено обоснование выбора той или иной схемы рекуперации тепла с точки зрения возможностей установки пластинчатого теплообменного оборудования, как наиболее эффективного с экономической точки зрения.

В результате «пинч-анализа» существующего отделения технологии подготовки сырой нефти и частично дистилляции было предложено две схемы установки теплообменников для подогрева воды центрального теплоснабжения: последовательная, рис. 1 и параллельная, рис. 2.

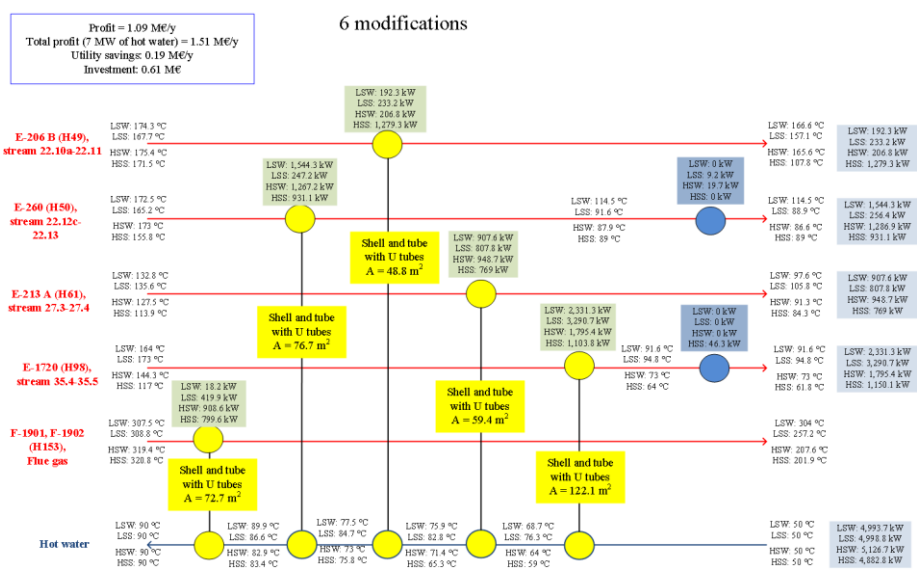


Рисунок 1 – Последовательная схема установки теплообменников подогрева воды центрального теплоснабжения

Для каждого из теплообменников в качестве греющего теплоносителя могут использоваться среды: легкий и тяжелый вакуумный газойль (LVGO и HVGO) и обычный газойль (GO). Эти среды в процессе эксплуатации завода могут использоваться в четырех модификациях – LWS; LSS; HWS; HSS, в зависимости от времени года и содержания серы в составе теплоносителя. Для каждой из сред и их модификаций, в результате расчетов получена отдельная тепловая нагрузка и значения входящей и выходящей температуры. Например, для первого теплообменника E206B из последовательной схемы подогрева воды, эти данные представлены в табл. 1. В параллельной схеме при расчете всех теплообменников принималась, что вода нагревается от температуры 50 °С до 90 °С.

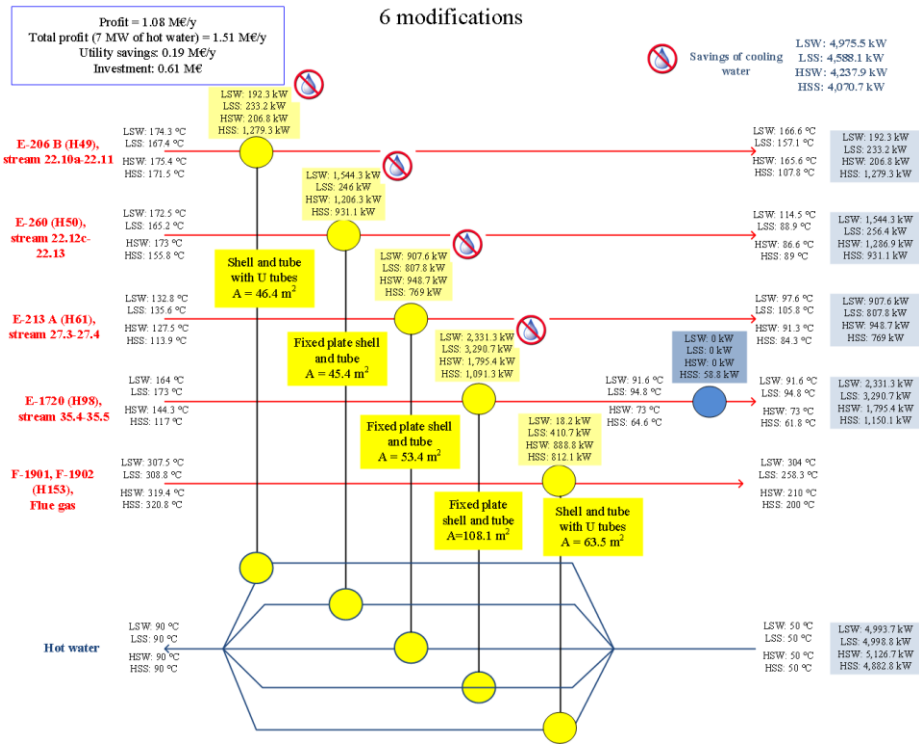


Рисунок 2 – Параллельная схема установки теплообменников подогрева воды центрального теплоснабжения

Таблица 1 – Входные данные для расчета теплообменника E206B последовательной схемы подогрева воды

Позиция	Поток	Тепловая нагрузка, кВт	Температура тяжелого газойля, °С		Температура воды, °С	
			Вход	Выход	Вход	Выход
1	LSW	192,3	174,3	166,6	75,9	77,5
2	LSS	233,2	167,7	157,1	82,8	84,7
3	HSW	206,8	175,4	165,6	71,4	73,0
4	HSS	1279,3	171,5	107,8	65,3	75,8

Для других теплообменников входные данные по средам изменяются примерно также, что можно видеть из рис. 1,2. Давление теплоносителей не превышает 15 бар. Потери давления по горячей и холодной стороне на каждом теплообменнике не должны превышать 50 кПа.

**Результаты решения.** В результате анализа схем установки теплообменников, давления и температурных режимов работы было принято решения принять к установке сварные теплообменники перекрестного тока типа Comrabloc с пластинами из нержавеющей стали AISI 316L, толщиной 0,8 мм (для теплообменников марки CPL50 и выше толщина пластины – 1 мм). Теплообменники типа Comrabloc предназначены для работы с температурами до 350 °С и давлением до 40 бар. Расчеты проводились с запасом коэффициента теплопередачи 10 %.

Согласно техническому заданию предполагается спроектировать 5 пластинчатых теплообменных аппаратов E206B, E260, E213A, E1720 и F1901/F1902 для потоков, представленных на рис. 1,2.

Для позиции F1901/F1902 расчет не проводился, так как здесь предусмотрен нагрев воды потоком газа. Пластинчатые теплообменники для работы с охлаждением газа не используются, в связи с низкой эффективностью теплообмена.

Данные по расчету теплообменника E206B для последовательной и параллельной схемы нагрева воды (рис. 1,2) представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Расчет нагрева сетевой воды для теплообменника E206B по последовательной и параллельной схеме присоединения

Позиция / Поток	Марка	Компоновка	Площадь теплообмена, м <sup>2</sup>	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Запас, %	Касательное напряжение (горячая /холодная), Па
Последовательная схема						
1/LWS	CP20	1×20M /1×21M	2,562	840,6	20	41,10 / 142,4
2/LSS	CP20	1×20M /1×21M	2,562	1219	10	107,9 / 147,4
3/HWS	CP20	1×20M /1×21M	2,562	861,8	43	99,29 / 164,3
4/HSS	CPL50	3×12M+3×13M /4×19M	42,41	465,2	17	35,67 / 42,75
Параллельная схема						
1/LWS	CP20	2×10M /3×7M	2,562	791,5	53	130,7 / 2,45
2/LSS	CP20	2×10M /3×5M+ 1×6M	2,562	1041	12	108,7 / 6,30
3/HWS	CP20	2×10M /3×7M	2,562	848,8	32	96,21 / 2,83
4/HSS	CPL50	2×16M+4×17M /1×16M +5×17M	56,36	382,5	25	26,05 / 4,18

Заданные условия подогрева воды тяжелым вакуумным газойлем в последовательной схеме для теплообменника E206B могут быть выполнены установкой аппарата CP20 для позиций 1–3. При работе со средой HSS необходимо устанавливать отдельный аппарат CPL50, табл. 2.

В случае параллельной схемы подогрева воды отличие в расходах теплоносителей по горячей и холодной стороне (примерно до 7 раз) приводит к тому, что при выполнении условий теплопередачи по горячей стороне, по стороне воды резко падает скорость теплоносителя в каналах аппарата, табл. 2. В результате по стороне воды имеет место очень низкое значение касательного напряжения, что недопустимо. Величина касательного напряжения на стенке пластины в пластинчатом теплообменном аппарате является основной косвенной характеристикой отвечающей за загрязнение теплопередающей поверхности. Чем эта величина больше, тем прогнозируемое загрязнение меньше. Для аппарата на 4-й позиции тепловая нагрузка аппарата почти в 6 раз больше, чем на позициях 1–3. Как следствие, выбрана другая марка аппарата, другая компоновка и большая площадь теплопередающей поверхности. Заданные условия утилизации тепла тяжелого вакуумного газойля для подогрева воды в параллельной схеме для E206B могут быть выполнены только для позиций 1–3, установкой аппарата CP20. При работе со средой HSS необходимо устанавливать отдельный аппарат. При этом в случае параллельной схемы по стороне воды реализуются слишком малые значения касательного напряжения, что является недопустимым при эксплуатации.

Данные по расчету теплообменника E260 для последовательной и параллельной схемы нагрева воды (рис. 1,2) представлены в табл. 3. В случае реализации последовательной схемы присоединения теплообменников необходима установка аппаратов различных типоразмеров, табл. 3. Различие в тепловой нагрузке по потокам и нежелательных условий теплообмена приводит к выбору теплообменников с крайне низким коэффициентом теплопередачи. При этом имеются невысокие значения касательного напряжения по стороне тяжелого вакуумного газойля и по стороне воды. Теплообменники могут быть установлены на этих позициях, но их работа буде крайне неэффективна и они будут быстро загрязняться.

У аппарата на 2-й позиции (табл. 3) тепловая нагрузка почти в 4–6 раз меньше, чем на позициях 1,3–4. Как следствие, выбрана другая марка аппарата, другая компоновка и меньшая площадь теплопередающей поверхности. Установка такого аппарата нежелательна, так как по результатам расчетов у него низкий коэффициент теплопередачи и малое значение касательное напряжения. Устанавливать такой аппарат нельзя.

При параллельной схеме присоединения наблюдается примерно такая же картина, как и при последовательной. Причем условия работы будут даже хуже, чем для последовательной схемы.

Таблица 3 – Расчет нагрева сетевой воды для теплообменника E260 по последовательной и параллельной схеме присоединения

Позиция / Поток	Марка	Компоновка	Площадь теплообменника, м <sup>2</sup>	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Запас, %	Касательное напряжение (горячая /холодная), Па
Последовательная схема						
1/LWS	CPL50	2×16M+4×17M /3×25M +1×26M	56,36	486,4	26	30,47 / 25,60
2/LSS	CPK40	2×5M+15×6M /3×25M +1×26M	33,13	254,8	15	13,49 / 44,93
3/HWS	CPL75	5×14M+2×15M /4×20M +1×21M	133,1	230,9	16	13,54 / 16,62
4/HSS	CPL75	2×10M+5×11M /4×19M	100,2	270,5	17	18,83 / 17,11
Параллельная схема						
1/LWS	CPL50	4×15M+1×15M /4×15M +1×16M	42,41	503,7	17	38,32 / 7,28
2/LSS	CPL30	4×5M+10×6M /3×5M +11×6M	18,14	249,5	11	23,84 / 3,60
3/HWS	CPL50	3×16M+6×17M /2×16M +7×17M	84,26	253,5	15	23,20 / 3,77
4/HSS	CPL50	3×15M+5×16M /2×15M +6×16M	70,81	259,6	15	24,60 / 2,59

Данные по расчету теплообменника E213A для последовательной и параллельной схемы нагрева воды (рис. 1,2) представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Расчет нагрева сетевой воды для теплообменника E213A по последовательной и параллельной схеме присоединения

Позиция / Поток	Марка	Компоновка	Площадь теплообменника, м <sup>2</sup>	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Запас, %	Касательное напряжение (горячая /холодная), Па
Последовательная схема						
1/LWS	CPL30	5×16M /3×27M	18,14	1228	13	43,40 / 58,62
2/LSS	CPL30	4×20M /3×27M	18,14	1121	15	30,48 / 56,64
3/HWS	CPK40	4×15M /2×20M +1×21M	20,01	1209	10	32,60 / 67,18
4/HSS	CPL30	5×16M / 3×27M	18,14	1201	12	47,71 / 55,72
Параллельная схема						
1/LWS	CPL30	4×16M+1×16M /4×16M +1×17M	18,14	1126	12	43,39 / 5,94
2/LSS	CPL30	2×12M+2×13M /3×8M +3×9M	11,42	1426	10	74,28 / 16,39
3/HWS	CPK40	4×12M+1×12M /4×12M +1×13M	20,01	1221	13	49,62 / 7,05
4/HSS	CPK40	5×16M / 3×11M + 4×12M	26,57	1015	12	29,47 / 5,23

Заданные условия нагрева сетевой воды за счет утилизации тепла легкого вакуумного газойля для теплообменника E213A для последовательной схемы присоединения, могут быть выполнены для всех позиций, установкой аппаратов CPL30 и CPK40, табл. 4. В случае параллельной схемы по стороне воды можно видеть слишком низкие значения касательного напряжения, что приведет в процессе эксплуатации к быстрому загрязнению поверхности теплообмена со стороны холодного теплоносителя и невыполнению аппаратом своих функций.

Данные по расчету теплообменника E1720 для последовательной и параллельной схемы нагрева воды (рис. 1,2) представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Расчет нагрева сетевой воды для теплообменника E1720 по последовательной и параллельной схеме присоединения

Позиция / Поток	Марка	Компоновка	Площадь теплообмена, м <sup>2</sup>	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Запас, %	Касательное напряжение (горячая /холодная), Па
Последовательная схема						
1/LWS	CPK40	4×20M /3×27M	26,57	1370	18	28,76 / 37,23
2/LSS	CPK40	3×25M+1×25M /3×25M +1×26M	33,13	1485	18	29,99 / 42,52
3/HWS	CPK40	4×13M+2×14M /3×27M	26,57	1489	20	42,77 / 39,40
4/HSS	CPK40	4×13M+2×14M /3×27M	26,57	1359	20	31,33 / 36,26
Параллельная схема						
1/LWS	CPK40	4×16M+1×16M /4×16M +1×17M	26,57	1579	14	44,00 / 22,92
2/LSS	CPK40	4×20M+1×20M /4×20M +1×21M	33,13	1625	15	45,89 / 29,05
3/HWS	CPK40	5×14M+2×15M /4×14M +3×15M	33,13	1507	11	37,45 / 17,40
4/HSS	CPL50	2×16M+4×17M /1×16M +5×17M	56,36	967,6	20	12,63 / 3,08

Анализ рассчитанных теплообменников по параллельной схеме позволил сделать следующие выводы. Для аппаратов на 1–3 позиции хорошим решением является выбор теплообменников марки CPK40. Обеспечивается высокий коэффициент теплопередачи и вполне удовлетворительные значения величины касательного напряжения, как по стороне газойля, так и по стороне воды. Для аппарата на 4-й позиции не совсем удачные условия работы приводят к снижению коэффициента теплопередачи, росту теплопередающей поверхности и выбору аппарата CPL50 большего типоразмера. Касательные напряжения на стенке пластин также не удовлетворяют условиям хорошей работы, особенно по стороне воды.

**Вывод.** Из проведенных расчетов и их анализа можно сделать следующие основные выводы. Для нагрева централизованной сетевой воды последовательная схема присоединения теплообменников предпочтительней, чем параллельная. Это объясняется двумя причинами, во-первых, при последовательном подключении теплообменников скорость холодного теплоносителя (воды) в каналах намного выше, чем при параллельном подключении, что обеспечивает высокое значение касательного напряжения на стенке, а значит меньшее загрязнение поверхности теплообмена в процессе эксплуатации. Во-вторых, при последовательном подключении в целом коэффициент теплопередачи выше, что дает снижение площади теплообмена, и, как следствие, уменьшение стоимости устанавливаемых аппаратов.

Для обеспечения максимальной работоспособности теплообменников могла бы послужить установка двух аппаратов с меньшей площадью теплообмена параллельно. В случае малой нагрузки работает только один аппарат, второй находится на обслуживании. В случае большой нагрузки работают два аппарата.

В итоге на все позиции, представленные в техническом задании, предложены пластинчатые теплообменные аппараты перекрестного тока типа «Сомпроблос», которые полностью удовлетворяют заданным рабочим условиям и обеспечивают достаточно высокую работоспособность при длительной эксплуатации.

### Литература

1. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, И. Клемеш, Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев // Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – 458 с.
2. Smith R., Jobson M., Chen L. Recent development in the retrofit of heat exchanger networks // Applied Thermal Engineering, 2010. – V.30, 16. – P. 2281–2291.
3. Heat exchanger network modification for waste heat utilisation under varying feed conditions / J.Y Yong., A. Nemet, P.S. Varbanov, J.J. Klemes, L. Cucek, Z. Kravanja, V. Mantelli // Chemical Engineering Transactions, 2015.– 43.–P. 1279–1284.
4. Gadalla M.A. A new graphical method for Pinch Analysis applications: Heat exchanger network retrofit and energy integration // Energy, 2015.– 81, N3. – P. 159–174.
5. A step toward saving energy using thermal modification of crude oil preheat network: A case / A. Shamseddini, M. Heravi, S.M. Jokar, M.R. Rahimpour // Energy Management and Efficiency for the Process Industries, 2015. – 51, N6. – P. 79–87.
6. Simultaneous optimization of heat-integrated crude oil distillation systems / Luo Y., Wang L., Wang H., Yuan X. // Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015.– in press.
7. Optimization of Heat-Integrated Crude Oil Distillation Systems. Part II: Heat Exchanger Network Retrofit Model / L.M Ochoa-Estopier, M. Jobson, L. Chen, C.A. Rodriguez-Forero, R. Smith // Ind. Eng. Chem. Res., 2015. – 54 (18). – P. 5001–5017.
8. Optimal design of plate-and-frame heat exchangers for efficient heat recovery in process industries / O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyansky, P.O. Kapustenko, G.L. Khavin // Energy. – 2011. – 36(8). – P. 4588–4598.
9. Shell-and-Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery under the Industrial Application / O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, G. Khavin, A. Yuzbashyan // Chemical Engineering Transactions. – 2011. – 45. – P. 1231–1236.
10. The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production / P. Kapustenko, S. Boldyryev, O. Arsenyeva, G. Khavin // Journal of Cleaner Production. – 2009. – 17(10). – P. 951–958.
11. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers / O.P. Arsenyeva, B. Crittenden, M. Yang, P.O. Kapustenko // Applied Thermal Engineering. – 2013. – 61(1). – P. 53–59.

### Bibliography (transliterated)

1. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov. R. Smit, I. Klemesh, L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev. Harkov: NTU “HPI”, 2000. – 458 p.
2. Smith R., Jobson M., Chen L. Recent development in the retrofit of heat exchanger networks. Applied Thermal Engineering, 2010. – V.30, 16. – P. 2281–2291.
3. Heat exchanger network modification for waste heat utilisation under varying feed conditions. J.Y Yong, A. Nemet, P.S. Varbanov, J.J. Klemes, L. Cucek, Z. Kravanja, V. Mantelli. Chemical Engineering Transactions, 2015.– 43.–P. 1279–1284.
4. Gadalla M.A. A new graphical method for Pinch Analysis applications: Heat exchanger network retrofit and energy integration. Energy, 2015.– 81, N3. – P. 159–174.
5. A step toward saving energy using thermal modification of crude oil preheat network: A case. A. Shamseddini, M. Heravi, S.M. Jokar, M.R. Rahimpour. Energy Management and Efficiency for the Process Industries, 2015. – 51, N6. – P. 79–87.
6. Simultaneous optimization of heat-integrated crude oil distillation systems. Luo Y., Wang L., Wang H., Yuan X. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015.– in press.
7. Optimization of Heat-Integrated Crude Oil Distillation Systems. Part II: Heat Exchanger Network Retrofit Model. L.M Ochoa-Estopier, M. Jobson, L. Chen, C.A. Rodriguez-Forero, R. Smith. Ind. Eng. Chem. Res., 2015. – 54 (18). – P. 5001–5017.

8. Optimal design of plate-and-frame heat exchangers for efficient heat recovery in process industries. O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnianskyu, P.O. Kapustenko, G.L. Khavin. *Energy*. – 2011. – 36(8). – P. 4588–4598.
9. Shell-and-Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery under the Industrial Application. O. Arsenyeva, L. Tovazhnyanskyu, P. Kapustenko, G. Khavin, A. Yuzbashyan. *Chemical Engineering Transactions*. – 2011. – 45. – P. 1231–1236.
10. The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. P. Kapustenko, S. Boldyryev, O. Arsenyeva, G. Khavin. *Journal of Cleaner Production*. – 2009. – 17(10). – P. 951–958.
11. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. O.P. Arsenyeva, B. Crittenden, M. Yang, P.O. Kapustenko. *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – 61(1). – P. 53–59.

Автори благодарят за финансову підтримку EC FP7 project “Distributed Knowledge-Based Energy Saving Networks” – DISKNET, Grant Agreement No: PIRSES-GA-2011-294933 and EC project “Efficient Energy Integrated Solutions for Manufacturing Industries” – EFENIS, Grant Agreement No. ENER/FP7/296003/EFENIS.

УДК 665.63:66.045.126

Товажнянський Л.Л., Арсенєва О.П., Петар Варбанов, Капустенко П.О., Хавін Г.Л., Лідія Чучек

#### **ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОБМІННИКІВ ПІДГРІВУ ВОДИ НЕФТЕПЕРЕРОБНОГО ЗАВОДУ**

Розглянуто задачу проектування теплообмінників для підгріву сільової води централізованого теплостачання на нафтопереробному заводі. Для кожної позиції вибору теплообмінника, що розрахована на основі «пінч-аналізу», проводився розрахунок 4-ох технологічних потоків. Було розглянуто послідовна та паралельна схеми приєднання теплообмінників. Запропоновано у якості рекуперативних теплообмінників підгріву води використовувати сварні апарати перехресного току типу «Compobloc». Зроблено вивід, що послідовна схема приєднання більш якісна для усіх позицій установки апаратів.

Tovazhnianskyu L.L., Arsenieva O.P., Petar Varbanov, Kapustenko P.A., Khavin G.L., Lidija Čuček

#### **DESIGNING OF HEAT EXCHANGERS NETWORK TO HEATING OF HEATING WATER OF OIL REFINERY FACTORY**

The problem of the design of heat exchangers for heating of the district water on the oil refinery factory is considered. For each positions was selected the heat exchanger, which was calculated on the basis of "pinch-analysis" calculations for 4 process streams. The serial and parallel connections of system heat exchangers are considered. As a recuperative heat exchanger for heating water was propose to use welding cross-flow type «Compobloc». Was made the conclusion is that the series connection is better than parallel for all positions of installation aids.

**К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СУДНА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНЫХ СООТНОШЕНИЙ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ**

Обеспечение судну заданных пропульсивных качеств является важнейшей проблемной комплексной задачей при проектировании судна вообще, и особенно корабля. Процесс решения этой задачи предполагает определение главных размерений и формы обводов корпуса, определение потребной мощности и выбор силовой установки и движителя на основе чего прогнозируется скорость хода для различных значений мощности СУ.

Следует отметить, что не смотря на применяемый на современном этапе подход к решению задачи пропульсивных качеств на этапе проектирования базируется на результатах модельных гидродинамических испытаний, методика модельных испытаний и пересчета его результатов на полномасштабный объект не являются совершенными, что в свою очередь на практике приводит к завышению расчетной мощности СУ, длительному этапу доводки проектируемого объекта до заданных показателей. В том числе этими обстоятельствами обусловлена необходимость головного судна в серии [1].

Кроме этого модельный эксперимент характеризуется следующими особенностями:

- неидентичность условий проведения модельного эксперимента и испытаний полномасштабного судна;
- частичного моделирования (не полное) при проведении экспериментов в бассейне;
- применением гипотезы о возможности раздельного определения составляющих сопротивления у судна;
- различием условий и режимов обтекания моделей полномасштабного корпуса;
- невозможность обеспечения идентичности состояния поверхности корпусов модели и судна;
- принципиальной невозможностью моделирования в бассейне внешних условий, таких как ветер, волнение, течение, глубина, осадка кормой и носом.

Экспериментальное подтверждение скорости в ламинарном пограничном слое (кривая Блазиуса) приведено Шлихтингом [5] для диапазона чисел  $Re = 10^5 \dots 7 \cdot 10^5$ .

При числах  $Re > 2 \cdot 10^5$ , но  $Re < 3 \cdot 10^6$  течение в зависимости от степени шероховатости, турбулентности набегающего момента может быть либо ламинарным, либо турбулентным. Для турбулентного течения решение Блазиуса (1908 г.) [6] теряет пригодность и должно быть заменено решением, основанным на анализе турбулентных пограничных слоев [7].

Эти и другие особенности приводят к проблеме всестороннего (полного) учета масштабного эффекта и корреляции показателей различных факторов с искомыми показателями пропульсивных качеств судна.

Основным этапом, при проектировании судна, для обеспечения его пропульсивных свойств является определение гидравлического сопротивления корпуса. Применяемые в настоящее время методики [1.2] как расчетов, так и испытаний мореходных качеств судов [3] не учитывают возможный диапазон изменения температуры морской воды, которая может принимать значения от +4 °С до 32 °С.

Для оценки влияния температуры воды на точность определения гидравлического сопротивления расчетным путем проанализируем эффекты, на которые влияет  $t_w$ .

В работе [2] отмечается, что в зарубежной практике расчетов при модельных испытаниях корпусов  $\xi_t$  – коэффициент сопротивления трения – вычисляют при температуре морской воды 15 °С, а в отечественной практике температура воды, в которой плавает натуральный корабль принимается 4 °С.

Используя определенный диапазон числа  $Re$  в зависимости от температуры, определяющий вязкость ( $\Delta Re = 3,3 \cdot 10^5$ ), используя формулу для сопротивления трения принятую на Международной конференции по опытовым бассейнам в 1957 году.

$$\xi_t = \frac{0,075}{(\lg Re - 2)^2}.$$

Оценим возможную погрешность для  $Re = 10^6$ . Величина этой погрешности определяемой  $\Delta Re$  может достигать 13–14 %, и по абсолютному значению составлять  $0,63 \cdot 10^{-3} = 0,00063$ . Чтобы оценить значимость этой величины проанализируем значения коэффициентов трения, принимаемых при расчетах.

Так, при отсутствии данных натурных испытаний корабля надбавка к коэффициенту сопротивления на шероховатость поверхности корпуса составляет  $\xi_{ш} = 0,0004$  для всех скоростей. Для корабля типа

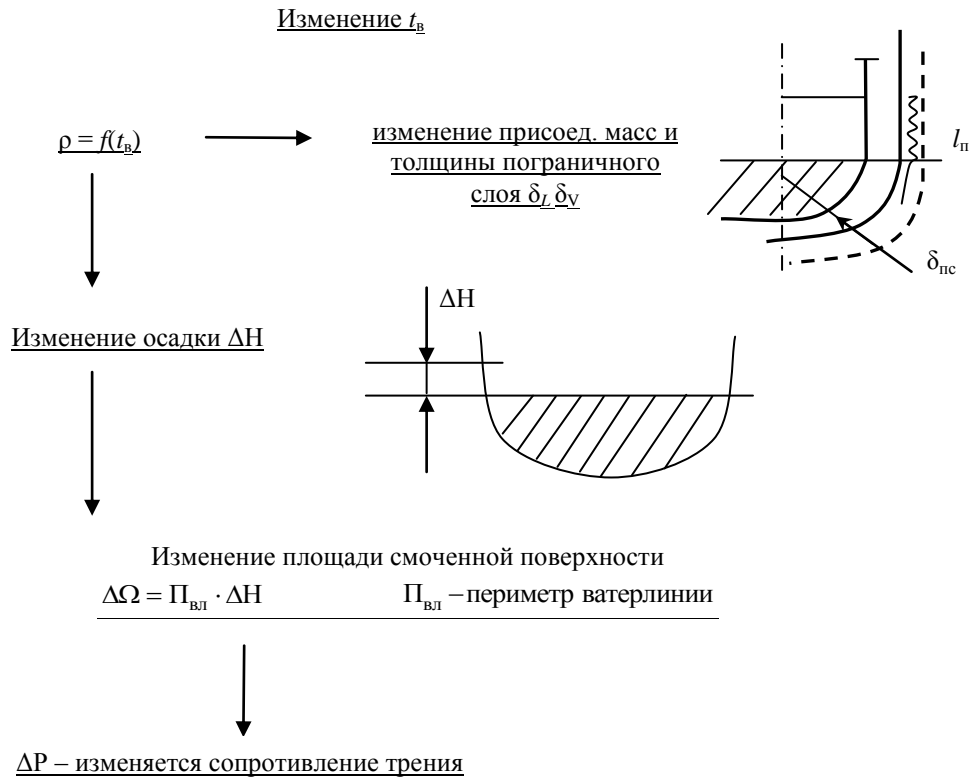


авианосец значения коэффициентов сопротивления составляют  $\xi = 0,0035$ ,  $\xi_o = 0,0016$  и  $\xi_\tau = 0,0013$ . При этом действительные значения надбавки на шероховатость колеблется в пределах от 0,00001 до 0,001. С учетом того, что коэффициент полного сопротивления корабля представляет собой аддитивную величину

$$\xi = \xi_\tau + \xi_o + \xi_{ш},$$

то и величина погрешности определения  $\xi_\tau$  с учетом точности определения числа Re при соответствующих значениях вязкости температуре воды, будет определять точность  $\xi$  в целом. Отметим, что величина надбавки на шероховатость корпуса по абсолютной величине соизмерима с погрешностью вычисления числа Re по соответствующей температуре воды. В свою очередь, такая погрешность будет приводить и к аналогичной погрешности при определении эффективной мощности (ЕНР) и в частности той ее части, которая затрачивается на преодоление трения [2],

$$ЕНР_\tau = \frac{\rho V^2}{2} \cdot \frac{(\xi_{\tauн} + \xi_{ш}) \Omega_n}{75}.$$



$\Delta N$  – изменение требуемой мощности на обеспечение заданной скорости

Рисунок 1 – Влияние температуры воды на показатели судна

Это может привести к недостижению контрактной скорости при заниженных значениях коэффициента сопротивления и выбору более чем требуется мощных СЭУ (и даже более сложных комбинированных схем установок) при его завышенных значениях, что кроме всего приведет к увеличению массы и габаритов двигателя, минимизация которых особенно важна для военного корабля.

#### Литература

1. Gtrittsma I. Ship speed at sea// Schip of werf. 1971. V. 38, № 3., biz 56-66.

2. Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф., Штумиф В.М. Пропульсивные качества морских судов. Л. Судостроение, 1972. 512 с.
3. Гирс И.В. и др. Испытания мореходных качеств судов. Л.: Судостроение, 1977.
4. Джиммер Т.С. Проектирование современного корабля. Л.: Судостроение. 1974, 280 с.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Наука, 1969.
6. Биркгоф Г. Гидродинамика, М. ИИЛ. 1963.
7. Ньюмен Дж. Морская гидродинамика. Л.: Судостроение. 1985 г.

Bibliography (transliterated)

1. Gtritsma I. Ship speed at sea. Schip of werf. 1971. V. 38, # 3., biz 56--66.
2. Katsman F.M., Pustoshnyiy A.F., Shtumif V.M. Propulsivnyie kachestva morskikh sudov. L. Sudostroenie, 1972. 512 p.
3. Girs I.V. i dr. Ispytaniya morehodnyih kachestv sudov. L.: Sudostroenie, 1977.
4. Dzhimmer T.S. Proektirovanie sovremennogo korablya. L.: Sudostroenie. 1974, 280 p.
5. Shlihting G. Teoriya pogramichnogo sloya. M., Nauka, 1969.
6. Birkhof G. Hidrodinamika, M. IIL. 1963.
7. Nyumen Dzh. Morskaya gidrodinamika. L.: Sudostroenie. 1985 g.

УДК 629.12.03

Аніпко О.Б., Шаблій Г.Ф.

**ДО ПИТАННЯ АНАЛІЗУ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ СУДНА  
НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКОВИХ СПІВВІДНОШЕНЬ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ ВОДИ**

Наведено результати впливу конструктивних розмірів та навігаційних чинників на характеристики суден для забезпечення безпеки від потенційно небезпечних суден з використанням системи безпеки судноплавства.

Аніпко О.Б., Shabliy G.F.

**TO THE QUESTION OF ANALYSIS OF THE ACCURACY OF THE RESISTANCE OF THE VESSEL  
BASED ON THE CALCULATED RATIOS, TAKING INTO ACCOUNT WATER TEMPERATURE**

The results of the influence of structural dimensions and navigational factors on the characteristics of ships to ensure safety from potentially dangerous ships with use of system of safety of navigation.

УДК 665.63:66.045.126

Арсеньєва О.П., Петар Варбанов, Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Лидия Чучек,  
Юзбашьян А.П., Бочарников И.А.**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА И ПРОГНОЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ  
ПОДОГРЕВА ОТОПИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ**

**Введение.** Реконструкция нефтеперерабатывающих заводов является одной из важнейших задач общей модернизации технологии переработки нефти, энергосбережения и экологической безопасности. Процесс нефтеперегонки включает в себя множественные этапы нагрева и охлаждения, что позволяет применять рекуперацию тепла различных стадий обработки сырья. Все это делает весьма привлекательным использование излишков тепла в коммунальном теплоснабжении, а именно для приготовления централизованной сетевой воды. Такая реконструкция технологической схемы, а также замена или модернизация теплового оборудования для повышения уровня энергосбережения, является актуальной задачей, имеющей научную и практическую ценность.

**Анализ исследований и публикаций.** Настоящая публикация является продолжением исследования, представленного в статье Л.Л. Товажнянского, О.П. Арсеньевой, Петара Варбанова (Венгрия), П.А. Капустенко, Г.Л. Хавина и Лидии Чучек (Словения) «Проектирование системы теплообменников подогрева отопительной воды на нефтеперерабатывающем заводе» [1], опубликованной в настоящем сборнике.

Среди недавних работ, посвященных реконструкции отделения предварительной подготовки сырой нефти можно отметить работу [2], где авторам удалось промоделировать теплообменную сеть с лучшими показателями по сравнению с существующей сетью. Проведенный анализ показал не только возможность повышения выходной температуры сырой нефти, но и экономии тепла для достижения этой цели.

Приложению пластинчатых теплообменных аппаратов в промышленных приложениях посвящены работы [3,4], где рассмотрены проблемы математического моделирования при проектировании и практического приложения пластинчатых теплообменников в различных отраслях промышленности.

В статье [5] сформулирован системный подход оптимизации годового экономического эффекта, учитывающий одновременно стоимость продукта и стоимость потребления энергии. Для процесса перегонки сырой нефти операционные переменные процесса дистилляции оказывают критическое влияние на стоимость продукции и потребление энергии. Однако существует противоречие между минимальным потреблением энергии и максимальным выходом продукции, которое не позволяет добиться максимального экономического эффекта.

В работе [6] представлен двухуровневый подход для модификации теплообменных сетей, с целью максимизировать производительность и минимизировать эксплуатационные расходы существующих тепловых интегрированных систем дистилляции сырой нефти. На первом уровне допускается изменение топологии существующей сети: добавление, удаление, перестановка и перемещение теплообменников, изменение тепловой нагрузки, разветвление потоков, а также изменение разделения потоковых фракций. На втором уровне происходит проверка нарушения ограничений и устранение ошибок, которое производится нелинейным методом наименьших квадратов.

Особенно важную задачу представляет проектирование в условиях загрязнения теплообменной поверхности в процессе эксплуатации. Эта задача актуальна не только как финансовая проблема функционирования оборудования, но и, прежде всего, это задача корректного проектирования теплообменных аппаратов. В работах [7,8] предложен полуэмпирический универсальный подход к учету фактора загрязнения при проектировании пластинчатых теплообменных аппаратов для различных отраслей промышленности и для различных теплоносителей.

**Цель работы и постановка задачи.** Целью настоящего исследования является обоснование выбора рационального теплообменника из уже рассчитанных в [1] и прогнозирование его работоспособности на каждой конкретной позиции. Расчет рекуперативных теплообменных аппаратов для последовательной и параллельной схем подогрева отопительной сетевой воды, [1, рис. 1,2]. Анализируются позиции E206B, E260, E213A и E1720 для потоков, представленных на рис. 1,2 в работе [1].

Для каждого из теплообменников в качестве греющего теплоносителя могут использоваться среды: легкий и тяжелый вакуумный газойль (LVGO и HVGO) и обычный газойль (GO). Эти среды в процессе эксплуатации завода могут использоваться в четырех модификациях – LWS; LSS; HWS; HSS, в зависимости от времени года и содержания серы составе теплоносителя. Для каждой из сред и их модификаций, в результате расчетов получена отдельная тепловая нагрузка и значения входящей и выходящей температуры.

**Результаты решения.** В результате анализа схем установки теплообменников, давления и температурных режимов работы к установке были приняты сварные теплообменники перекрестного тока типа Comrabloc с пластинами из нержавеющей стали AISI 316L, толщиной 0,8 мм (для теплообменников марки CPL50 и выше толщина пластины – 1 мм). Теплообменники типа Comrabloc предназначены для работы с температурами до 350 °С и давлением до 40 бар. Расчеты проводились с запасом коэффициента теплопередачи 10 %.

В первую очередь обеспечение рекуперации должно быть достигнуто с минимальными капитальными затратами. Для этого на всех упомянутых выше позициях необходимо подобрать один теплообменный аппарат или обосновать установку двух или более теплообменников. Поставленная задача требует не только корректного расчета теплообменников, но и учета их работоспособности во времени, когда появляются значительные отклонения от проектных характеристик из-за загрязнения теплопередающей поверхности.

В качестве одного аппарата на позиции E206B в последовательной схеме рекомендуется к установке CPL50 с компоновкой 3×12М+3×13М /4×19М и площадью теплопередающей поверхности 42,41 м<sup>2</sup>, табл. 1. Несмотря на то, что он работает на позициях 1–3 с очень низким коэффициентом теплопередачи и огромным запасом, но все-таки он выполняет условия теплопередачи и обеспечивает приемлемое значение касательного напряжения на стенке. Установка такого аппарата возможна, но его поверхность теплообмена слишком велика для работы на позициях 1–3. В качестве одного аппарата в параллельной схеме, для обеспечения работы по потоку HSS, необходимо установить теплообменник CPL50 с компоновкой 2×16М+4×17М / 1×16М+5×17М и площадью поверхности теплообмена 56,36 м<sup>2</sup>. В этом случае для других позиций такой аппарат слишком велик (табл. 1), имеет крайне низкий коэффициент теплопередачи и практически нулевые значения касательного напряжения по стороне воды. Установка такого аппарата не допускается.

Таблица 1 – Главные показатели работы одного теплообменника на все потоки для теплообменника E206B

Поток	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Запас, %	Касательное напряжение на стенке (горячая /холодная), Ра	Потери давления по горячей стороне, кПа
Последовательная: CPL50 с компоновкой 3×12М+3×13М /4×19М				
LWS	49,03	1590	39,37/41,32	41,28
LSS	70,94	1020	38,06/42,80	36,30
HWS	50,29	1340	32,97/47,68	33,10
HSS	465,2	17	35,67 / 42,75	49,62
Параллельная: CPL50 с компоновкой 2×16М+4×17М / 1×16М+5×17М				
LWS	34,62	1480	15,81 / 0,11	25,13
LSS	45,63	974	14,67 / 0,16	23,15
HWS	37,16	1210	12,61 / 0,13	20,03
HSS	382,5	25	26,05 / 4,18	34,58

Данные по расчету одного теплообменника E260 для последовательной и параллельной схемы нагрева воды (рис. 1,2 [1]) представлены в табл. 2.

Для заданных условий в последовательной схеме может быть установлен один аппарат марки CPL75 с компоновкой 5×14М+2×15М /4×20М +1×21М и площадью теплопередающей поверхности 133,1 м<sup>2</sup>, табл. 2. При этом для потока LSW потери давления будут превышать заданные в техническом задании, и

его работа будет осуществляться с большим запасом. Для потока LSS аппарат слишком большой и будет работать в крайне не выгодных условиях с низким коэффициентом теплопередачи и малыми значениями касательных напряжений на стенке.

Для заданных условий в параллельной схеме может быть установлен один аппарат марки CPL50 с компоновкой  $3 \times 16M + 6 \times 17M / 2 \times 16M + 7 \times 17M$  и площадью теплопередающей поверхности  $84,26 \text{ м}^2$ , табл. 2. При этом для потока LSW потери давления будут превышать заданные в техническом задании и его работа буде осуществляться с большим запасом. Для потока LSS аппарат слишком большой и будет работать в крайне не выгодных условиях с низким коэффициентом теплопередачи и предельно малыми значениями касательных напряжений на стенке.

Данные по расчету одного теплообменника E213A для последовательной и параллельной схемы нагрета воды (рис. 1,2 [1]) представлены в табл. 3.

Таблица 2 – Главные показатели работы одного теплообменника на все потоки для теплообменника E260

Поток	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Запас, %	Касательное напряжение на стенке (горячая / холодная), Па	Потери давления по горячей стороне, кПа
Последовательная: CPL75 с компоновкой $5 \times 14M + 2 \times 15M / 4 \times 20M + 1 \times 21M$				
LWS	206,3	125	25,30/15,66	51,25
LSS	63,65	105	1,71/16,90	3,61
HWS	230,9	16	13,54 / 16,62	33,25
HSS	202,9	28	12,82/15,27	30,88
Параллельная: CPL50 с компоновкой $3 \times 16M + 6 \times 17M / 2 \times 16M + 7 \times 17M$				
LWS	252,5	115	43,13 / 6,03	69,13
LSS	53,24	112	6,25 / 0,17	6,27
HWS	253,5	15	23,20 / 3,77	46,28
HSS	217,8	32	24,12 / 2,30	45,80

Таблица 3 – Главные показатели работы одного теплообменника на все потоки для теплообменника E213A

Поток	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Запас, %	Касательное напряжение на стенке (горячая / холодная), Па	Потери давления по горячей стороне, кПа
Последовательная: СРК40 с компоновкой $4 \times 15M / 2 \times 20M + 1 \times 21M$				
LWS	1115	22	30,78/64,78	23,09
LSS	1023	40	32,95/62,64	24,68
HWS	1209	10	32,60/67,18	24,48
HSS	1098	20	38,54/61,45	25,17
Параллельная: СРК40 с компоновкой $5 \times 16M / 3 \times 11M + 4 \times 12M$				
LWS	765	58	27,13 / 7,18	25,41
LSS	610,4	104	29,06 / 5,73	27,20
HWS	915,4	30	28,71 / 7,82	26,91
HSS	1015	12	29,47 / 5,23	27,62

Установка теплообменника СРК40 с компоновкой  $4 \times 15M / 2 \times 20M + 1 \times 21M$  и площадью теплообмена  $20,01 \text{ м}^2$  на всех позициях в последовательной схеме возможна, табл. 3. Для всех потоков это приводит к небольшому падению коэффициента теплопередачи, но аппарат работает в достаточно благоприятных условиях. Эксплуатация такого аппарата на всех позициях допускается.

Установка теплообменника СРК40 с компоновкой  $5 \times 16M / 3 \times 11M + 4 \times 12M$  и площадью теплопередающей поверхности  $26,57 \text{ м}^2$  на всех позициях в параллельной схеме возможна, табл. 3. Для потоков LSW и LSS это приводит к падению коэффициента теплопередачи, и аппарат будет работать в не совсем благоприятных условиях. Частично такая ситуация наблюдается и для потока HSW. Кроме того, имеются

низкие значения касательного напряжения по стороне воды. В целом эксплуатация такого аппарата на всех позициях не рекомендуется.

Данные по расчету одного теплообменника E1720 для последовательной и параллельной схемы нагрева воды (рис. 1,2 [1]) представлены в табл. 4.

В качестве одного аппарата в случае последовательной схемы принимается теплообменник марки СРК40 с компоновкой  $3 \times 25M + 1 \times 25M / 3 \times 25M + 1 \times 26M$  и площадью теплопередающей поверхности  $33,13 \text{ м}^2$ , табл. 4. Установка такого теплообменника для потоков LSW, HSS и HSW приводит к завышению площади поверхности теплопередачи, что сильно уменьшает значение касательного напряжения на стенке по стороне газойля, и поэтому установка такого аппарата не желательна.

Если в качестве одного аппарата выбрать теплообменник марки СРК40 с компоновкой  $4 \times 13M + 2 \times 14M / 3 \times 27M$  и площадью теплопередающей поверхности  $26,57 \text{ м}^2$ , табл. 4, то его установка на позиции 2 (LSS) обеспечивает коэффициент теплопередачи  $1852 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , касательное напряжение на стенке по горячей и холодной стороне соответственно  $45,92$  и  $37,37 \text{ Па}$ , что улучшает показатели работы аппарата. Однако установка такого аппарата приводит к недогреву воды не более  $1 \%$ , что, в принципе, является невыполнением технических условий расчета.

Таблица 4 – Главные показатели работы одного теплообменника на все потоки для теплообменника E1720

Поток	Коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Запас, %	Касательное напряжение на стенке (горячая / холодная), Па	Потери давления по горячей стороне, кПа
Последовательная: СРК40 с компоновкой $3 \times 25M + 1 \times 25M / 3 \times 25M + 1 \times 26M$				
LWS	1101	39	18,77 / 42,36	14,37
LSS	1485	18	29,99 / 42,52	22,99
HWS	1198	13	12,83 / 44,84	9,80
HSS	1089	13	9,40 / 41,26	7,16
Параллельная: CPL50 с компоновкой $2 \times 16M + 4 \times 17M / 1 \times 16M + 5 \times 17M$				
LWS	742,7	111	25,18 / 13,16	36,99
LSS	951,3	93	40,28 / 25,46	59,10
HWS	885,0	53	17,22 / 8,00	25,27
HSS	1015	12	29,47 / 5,23	27,62

В качестве одного аппарата в случае параллельной схемы предлагается принять теплообменник марки CPL50 с компоновкой  $2 \times 16M + 4 \times 17M / 1 \times 16M + 5 \times 17M$  и площадью теплопередающей поверхности  $56,36 \text{ м}^2$ . Установка аппаратов с меньшей теплопередающей поверхностью приводит к недогреву для потока HSS. Главные показатели работы такого аппарата на всех позициях представлены в табл. 4.

Установка такого теплообменника для потоков LSW, LSS и HSW приводит к завышению площади поверхности теплопередачи. Это, в свою очередь, снижает коэффициент теплопередачи, увеличивает запас поверхности и уменьшает значение касательного напряжения на стенке. Кроме того для потока LSS имеет место небольшое превышение потерь давления по сравнению с допустимым значением. Установка такого аппарата возможна, но не желательна так, как имеет место крайне низкое значение касательного напряжения, что приведет к катастрофически быстрому загрязнению поверхности теплообмена и потере работоспособности аппарата.

**Заключение.** Из проведенных расчетов одного теплообменного аппарата на все позиции и их анализа можно сделать следующие основные выводы. На все позиции, представленные в техническом задании, предложены пластинчатые теплообменные аппараты перекрестного тока типа «Сomplobloc», которые полностью удовлетворяют заданным рабочим условиям и обеспечивают достаточно высокую работоспособность при длительной эксплуатации.

Попытки подобрать к установке единый аппарат на 4-е потока – LSW, LSS, HSW и HSS для нагрева воды натолкнулись на значительные трудности. При примерно близких теплофизических свойствах теплоносителей (кроме воды), примерно одинаковых входных и выходных температурах зачастую имеется резкое отличие в заданной тепловой нагрузке. Последнее обстоятельство приводит к тому, что для потока с высокой тепловой нагрузкой выбирается аппарат с большой площадью теплообмена. При установке такого аппарата для других потоков происходит уменьшение скорости теплоносителей в каналах, существенное снижение коэффициента теплопередачи и касательного напряжения. Аппарат работает с большим запасом и имеет склонность к интенсивному загрязнению поверхности теплообмена. Такая ситуация нежелательна как с экономической точки зрения, так и с эксплуатационной.

#### Литература

1. Проектирование системы теплообменников подогрева отопительной воды на нефтеперерабатывающем заводе / Л.Л. Товажнянский, О.П. Арсеньева, Петар Варбанов, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, Лидия Чучек // Статья в настоящем сборнике.
2. A step toward saving energy using thermal modification of crude oil preheat network: A case / Shamseddini A., Heravi M., Jokar S.M., Rahimpour M.R. // *Energy Management and Efficiency for the Process Industries*, 2015. – 51, N6. – P. 79–87.
3. Optimal design of plate-and-frame heat exchangers for efficient heat recovery in process industries / O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyansky, P.O. Kapustenko, G.L. Khavin // *Energy*. – 2011. – 36(8). – P. 4588–4598.
4. Shell-and-Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery under the Industrial Application / O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, G. Khavin, A. Yuzbashyan // *Chemical Engineering Transactions*. – 2011. – 45. – P. 1231–1236.
5. Simultaneous optimization of heat-integrated crude oil distillation systems / Luo Y., Wang L., Wang H., Yuan X. // *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015.– in press.
6. Optimization of Heat-Integrated Crude Oil Distillation Systems. Part II: Heat Exchanger Network Retrofit Model / Ochoa-Estopier L.M., Jobson M., Chen L., Rodriguez-Forero C.A., Smith R. // *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2015. – 54 (18). – P. 5001–5017.
7. The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production / P. Kapustenko., S. Boldyryev, O. Arsenyeva, G. Khavin // *Journal of Cleaner Production*. – 2009. – 17(10). – P. 951–958.
8. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers / O.P. Arsenyeva, B. Crittenden, M. Yang, P.O. Kapustenko // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – 61(1). – P. 53–59.

#### Bibliography (transliterated)

1. Proektirovanie sistemyi teploobmennikov podogreva otopitel'noy vodyi na neftepererabatyivayuschem zavode. L.L. Tovazhnyansky, O.P. Arsenyeva, Petar Varbanov, P.A. Kapustenko, G.L. Khavin, Lidiya Chuchek. Statya v nastoyaschem sbornike.
2. A step toward saving energy using thermal modification of crude oil preheat network: A case. Shamseddini A., Heravi M., Jokar S.M., Rahimpour M.R. *Energy Management and Efficiency for the Process Industries*, 2015. – 51, N6. – P. 79–87.
3. Optimal design of plate-and-frame heat exchangers for efficient heat recovery in process industries. O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyansky, P.O. Kapustenko, G.L. Khavin. *Energy*. – 2011. – 36(8). – P. 4588–4598.
4. Shell-and-Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery under the Industrial Application. O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, G. Khavin, A. Uzbashian. *Chemical Engineering Transactions*. – 2011. – 45. – P. 1231–1236.
5. Simultaneous optimization of heat-integrated crude oil distillation systems. Luo Y., Wang L., Wang H., Yuan X. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015.– in press.
6. Optimization of Heat-Integrated Crude Oil Distillation Systems. Part II: Heat Exchanger Network Retrofit Model. Ochoa-Estopier L.M., Jobson M., Chen L., Rodriguez-Forero C.A., Smith R. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2015. – 54 (18). – P. 5001–5017.
7. The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. P. Kapustenko, S. Boldyryev, O. Arsenyeva, G. Khavin. *Journal of Cleaner Production*. – 2009. – 17(10). – P. 951–958.

8. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. O.P. Arsenieva, B. Crittenden, M. Yang, P.O. Kapustenko. Applied Thermal Engineering. – 2013. – 61(1). – P. 53–59.

Автори благодарят за финансовую поддержку ЕС FP7 проект “Distributed Knowledge-Based Energy Saving Networks” – DISKNET, Grant Agreement No: PIRSES-GA-2011-294933.

УДК 665.63:66.045.126

Арсеньева О.П., Петар Варбанов, Капустенко П.О., Хавін Г.Л., Лідія Чучек, Юзбашьян Г.П.,  
Бочарніков І.О.

**ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ І ПРОГНОЗ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТЕПЛООБМІННИКІВ  
ПІДГРІВУ ОПАЛЮВАЛЬНОЇ ВОДИ НА НАФТОПЕРЕРОБНОМУ ЗАВОДІ**

Розглянуто задачу проектування теплообмінників для підігріву сітьової води централізованого теплопостачання на нафтопереробному заводі. Для кожної позиції вибору теплообмінника проводився розрахунок 4-ох технологічних потоків. Було розглянуто послідовна та паралельна схеми приєднання теплообмінників. Запропоновано у якості рекуперативних теплообмінників підігріву води використовувати сварні апарати перехресного току типу «Comprobloc». Зроблено висновок, що як для послідовної схеми приєднання, так і для паралельної, установка одного апарату (для 4-ох потоків) на усіх позиціях неможлива.

Arsenyeva O.P., Petar Varbanov, Kapustenko P.A., Khavin G.L., Lidija Čuček, Uzbashian A.P.,  
Bocharnikov I.A.

**GROUND OF CHOICE AND PREDICTION OF OPERABILITY HEAT EXCHANGERS  
FOR HEATER OF HEATING WATER ON THE OIL REFINERY FACTORY**

The problem of the design of heat exchangers for heating of the district water on the oil refinery factory is considered. For each positions was selected the heat exchanger calculations for 4 process streams. The serial and parallel connections of system heat exchangers are considered. As a recuperative heat exchanger for heating water was propose to use welding cross-flow type «Comprobloc». Was concluded that both the series circuit connection, and for the parallel installation of the devices (for 4 threads) for all items recovery is not possible.



УДК 045.01:664.1

Демирский А.В., Георгиадис М.С., Товажн्यानский Л.Л., Арсеньева О.П., Капустенко П.А., Бабак Т.Г.,  
Хавин Г.Л.

## МОНИТОРИНГ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ПЛАСТИНЧАТЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ САХАРНОГО СОКА В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ

**Вступление.** В процессе работы подогревателей сахарного сока перед выпариванием имеет место интенсивное загрязнение поверхности различного вида солями и частицами переработки сырья. Это приводит к остановке аппаратов на чистку в непрерывном технологическом процессе. Остановка работы подогревателей вызывает частичное изменение технологического процесса подогрева и влечет за собой дополнительные финансовые затраты на обслуживание. Поэтому задача анализа процессов образования отложений в пластинчатых подогревателях сахарной промышленности и их математическое моделирование является актуальной и имеет практическую ценность.

**Состояние проблемы и формулировка задачи.** Основу отложений на поверхности нагрева подогревателей сатурационного сока и подогревателей перед выпарной станцией составляют кристаллические образования карбоната кальция, гипс, кремнезем и органические вещества [1]. Специфика образования кристаллических отложений на теплопередающей поверхности пластинчатых теплообменников состоит в том, что сложный характер потока, обеспечивающий высокую степень турбулизации, приводит к существованию зон с высокой и низкой скоростью. Зоны пониженной скорости имеют место у точек контакта смежных пластин или у краев пластины, и являются центрами кристаллизации [2]. Кроме того, для чистых поверхностей пластин характерно наличие отрицательного коэффициента сопротивления загрязнению [3], который проявляется в начальный период работы чистого теплообменника и объясняется увеличением турбулентности в пристенном слое за счет появления шероховатости на поверхности пластины.

Основу состава отложений в подогревателях соков в сахарной промышленности составляют соли кальция (окись кальция, карбонаты и сульфаты) [4]. С одной стороны имеется опыт эксплуатации трубчатых подогревателей очищенного сока перед выпариванием [5–8]. Были проведены экспериментальные исследования и разработаны математические модели прогнозирования роста загрязнений на теплопередающей поверхности [9–12]. Несмотря на практически полную замену трубчатых теплообменников на пластинчатые подогреватели для нагрева чистого сока перед выпариванием, исследованиям работы установленных аппаратов на этих позициях уделялось не достаточно внимания. Отчасти вопросы оптимального проектирования теплообменников и прогнозирования их работы нашли свое отражение в работах [13–16].

**Цель работы.** Целью настоящей работы является анализ и математическая обработка результатов натурных экспериментов, полученных из наблюдения работы подогревателей очищенного сока на сахарном заводе в г. Валуйки (Россия), и разработка теоретической модели предсказания роста отложений на теплопередающей поверхности пластинчатых теплообменников, работающих на подогреве сахарного сока перед выпариванием. На основе полученных результатов предложен анализ работы одного из пластинчатых аппаратов, построена математическая модель, прогнозирующая его работу во времени между остановками на чистку.

**Постановка задачи.** Общая схема установки пластинчатых подогревателей сахарного сока перед выпариванием представлена на рис. 1. Особенностью является то, что второй по ходу подогрева сока теплообменник использует в качестве греющего теплоносителя конденсат, а подогрев сока непосредственно перед подачей на выпарной аппарат 1-го корпуса осуществляется в трубчатом высокоскоростном подогревателе ретурным паром.

Сок поступает на теплообменник производства GEA (первый по ходу), где подогревается паром 4-го корпуса, далее установлен теплообменник марки M15M производства фирмы «Альфа Лаваль» [17] обогреваемый конденсатом. После этого дальнейший догрев сока осуществляется в аппаратах M15M паром 2-го и 1-го корпусов.

Мониторинг производился в течение 130 дней. Первое измерение было проведено после пусковых работ, которые заняли продолжительный период и сопровождались остановками в работе аппарата. Было принято, что устойчивый режим функционирования теплообменников наступает примерно по достижению 96 ч эксплуатации.

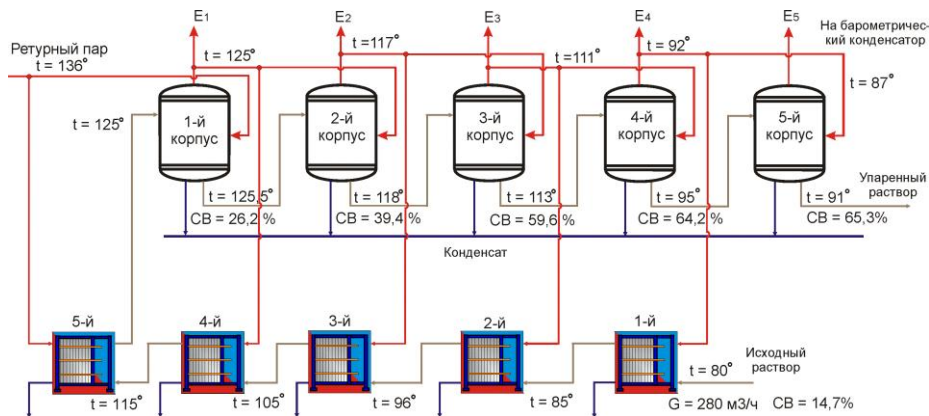


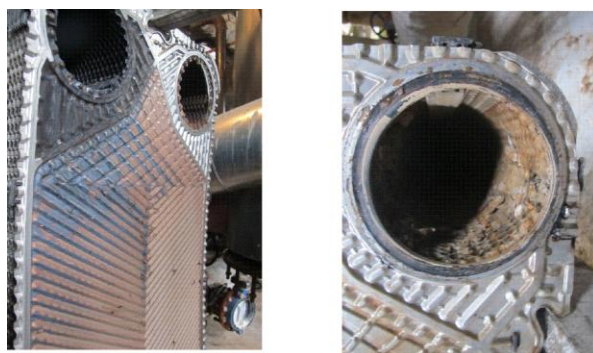
Рисунок 1 – Схема установки подогревателей сахарного сока перед выпаркой

В результате наблюдений и измерений были получены следующие результаты. Подогреватель сока перед выпаркой GEA стоит первым по продукту и берет на себя основную массу находящегося в соке загрязнений. Он забивается по продукту достаточно интенсивно и в результате его приходилось останавливать и чистить 3 раза за сезон (130 дней) – на 10-й, 50-й и 80-й день эксплуатации. Подогреватель конденсатом останавливался на очистку два раза: на 15-й день, когда потери давления выросли до 120 кПа при расчетном исходном значении 50 кПа и на 90-й день по этой же причине. Теплообменники 3-й и 4-й ступени подогрева за время работы не чистились, потери давления, и снижение коэффициента теплопередачи были удовлетворительными, но в конце периода эксплуатации приблизились к критическим значениям.

Анализ осмотра аппаратов во время остановки на чистку и в конце эксплуатационного сезона позволили сделать следующие выводы. Наиболее сильно отложения выпадают на распределительных участках и в коллекторах, рис. 2. Отложения представляют собой механические примеси по продукту, волокна, кристаллизационные отложения солей, но не накипь. Отложения имеют смешанную структуру и легко очищаются с поверхности пластин, особенно у подогревателей 3-й и 4-й ступеней, рис. 3.



а) б)  
Рисунок 2 – Загрязнение теплообменников 1-й и 2-й ступеней:  
а – распределительного участка; б – коллектора



а) б)  
Рисунок 3 – Загрязнение теплообменников 3-й и 4-й ступеней:  
а – распределительного участка и поверхности пластины; б – коллектора

Также в течение 14 дней с момента пуска был проведен мониторинг работы 2-го теплообменного аппарата работающего на конденсате. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерений технологических параметров работы 2-го теплообменника

Параметры	Время, ч				
	96	144	216	264	312
Расход сока, м <sup>3</sup> /ч	265	260	270	277	265
Входная температура сока, °С	103	101	100,5	102	101,7
Выходная температура сока, °С	108	105	106	107	106
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	65	63	61	66	64
Входная температура воды, °С	123,5	123,5	123,5	123,5	123,5
Выходная температура воды, °С	105	102,8	104,8	106,1	104,8

Фактически это были наблюдения за работой теплообменника перед его остановкой на чистку, которая была вызвана ростом потерь давления в аппарате по стороне продукта, вызванное интенсивным загрязнением теплопередающей поверхности.

**Заключение.** Рассмотрена работоспособность системы пластинчатых подогревателей сахарного сока перед выпаркой, в условиях реальной эксплуатации на работающем сахарном заводе позволила сделать ряд выводов:

- остановка теплообменников на очистку производится по достижению потерь давления в аппарате критического значения;
- наиболее загрязняется первой по ходу нагрева сока аппарат (3 раза за 130 дней работы), далее 2-й – одна чистка;
- подогреватели 3-й и 4-ой ступеней в течение всего периода эксплуатации не чистились;
- загрязнения, главным образом, образуются на распределительной части пластин и в коллекторах;
- отложения состоят из остатков продуктов переработки и частично солей, имеют рыхлую структуру, легко удаляются при чистке с разборкой аппарата;
- для уменьшения числа чисток с остановкой аппарата 1-й ступени можно рекомендовать либо установку ширококанального пластинчатого аппарата, либо установку дублирующего теплообменника, дающего возможность переключения подогрева потока без остановки теплообменника на чистку.

Приведенные оценки позволяют заранее на стадии проектирования или модернизации спрогнозировать примерное время критического загрязнения аппаратов. Дальнейшее развитие заключается в создании математической модели для расчета системы пластинчатых подогревателей сахарного сока перед выпариванием, а также теплообменников на других позициях сахарного производства и в различных отраслях промышленности.

### Поддержка

Авторы благодарят за финансовую поддержку ЕС FP7 проект “Distributed Knowledge-Based Energy Saving Networks” – DISKNET, Grant Agreement No: PIRSES-GA-2011-294933.

### Литература

1. Пластинчатые теплообменники в промышленности /Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, О.П. Арсеньева. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004.– 232 с.
2. Модернизация системы последовательно установленных подогревателей сахарного сока / О.П. Арсеньева, Т.Г. Бабак, А.В. Демирский, Г.Л. Хавин // Наукові праці ОНАХТ.– Одеса: 2011, Вип. 39.– Том. 2.– С. 151–155.
3. Арсеньева О.П., Демирский А.В., Хавин Г.Л. Оптимизация пластинчатого теплообменника // Пробл. машиностроения.– 2011.– т. 14, №1.– С. 23–31.
4. Сагань И.И., Разладин Ю.С. Борьба с накипеобразованием в теплообменниках.– Киев: Техника, 1986.– 133 с.
5. Накипеобразование и пути его снижения в сахарной промышленности / А.Т. Богорош, И.М. Федоткин, И.С. Гулый. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983.– 192 с.
6. Богорош А.Т. Возможности управления свойствами кристаллических отложений.– К.: Вища школа, 1987.– 247 с.

7. Богорош А.Т. Вопросы накипеобразования.– К.: Вища школа, 1987.– 179 с.
8. Исследование влияния скорости движения сока на коэффициент накипеобразования в подогревателях сахарной промышленности / Тобилевич Н.Ю., Сагань И.И., Гаряжа В.Т., Князев А.А. // Пищевая промышленность. – Киев, 1965. – С. 132–135.
9. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers / O.P. Arsenyeva, B. Crittenden, M. Yang, P. O. Kapustenko // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Т. 61, № 1. – С. 53–59.
10. Accounting for thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers / O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyanskyu, P.O. Kapustenko, O. V. Demirskiy // PRESS 2012: 15th Conference on Process Integration, Modelling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction. – Т. 29 – Prague, CZ: Chemical Engineering Transactions, 2012. – С. 1327–1332.
- 11 Crystallization fouling with enhanced heat transfer surfaces / B. Crittenden, M.Yang, L. Dong., R. Hanson, J. Jones, R. Kundu, J. Harris, O. Klochok, O. Arsenyeva., P. Kapustenko // International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning – 2013 / Под ред. Malayeri M. R. и др. – Budapest, Hungary, 2013. – С. 379–385.
12. Mitigation of Fouling in Plate Heat Exchangers for Process Industries / L. Tovazhnyanskyu, P. Kapustenko, O. Arsenyeva, A. Yuzbashyan // PRESS 2012: 15th Conference on Process Integration, Modelling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction. – Т. 29 – Prague, CZ: Chemical Engineering Transactions, 2012. – С. 1441–1446.
13. Практическая реконструкция системы подогревателей сахарного сока перед выпариванием / Л.Л. Товажнянский, О.П. Арсеньева, А.В. Демирский, Г.Л. Хавин // Інтегровані технології та енергозбереження //Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012, №2.– С. 99–102.
14. Анализ работы пластинчатого подогревателя сахарного сока с учетом отложений / Арсеньева О.П., Бабак Т.Г., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. // Наукові праці ОНАХТ.– Одеса: 2012, Вип. 41.– Том. 2.– С. 173–177.
15. Товажнянский Л.Л., Демирский А.В., Хавин Г.Л. К определению величины загрязнения теплопередающей поверхности пластинчатых теплообменников // Інтегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012, №4. – С. 99–104.
16. 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 // Інтегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013, №2.– С. 14–17.
17. Демирский А.В. Анализ процесса образования отложений в пластинчатых подогревателях сахарной промышленности // Інтегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2014, №4. – С. 74–78.

**Bibliography (transliterated)**

1. Platinchatyie teploobmenniki v promyishlennosti. L.L. Tovazhnyanskyu, P.A. Kapustenko, G.L. Khavin, O.P. Arsenyeva. – Harkov: NTU «HPI», 2004.– 232 p.
2. Modernizatsiya sistem posledovatelno ustanovlennyih podogrevatelyeh saharного soka. O.P. Arsenyeva, T.G. Babak, A.V. Demirskiy, G.L. Khavin. Naukovi pratsi ONAHT.– Odesa: 2011, Vip. 39.– Tom. 2.– P. 151–155.
3. Arsenyeva O.P., Demirskiy A.V., Khavin G.L. Optimizatsiya platinchatogo teploobmennika. Probl. mashinostroeniya.– 2011.– t. 14, #1.– P. 23–31.
4. Sagan I.I., Razladin Yu.S. Borba s nakipeobrazovaniem v teploobmennikah.– Kiev: Tehnika, 1986.– 133 p.
5. Nakipeobrazovanie i puti ego snizheniya v saharной promyishlennosti. A.T. Bogorosh, I.M. Fedotkin, I.S. Gulyiy. – M.: Legkaya i pischevaya prom-st, 1983.– 192 p.
6. Bogorosh A.T. Vozmozhnosti upravleniya svoystvami kristallicheskih otlozheniy.– K.: Vischa shkola, 1987.– 247 p.
7. Bogorosh A.T. Voprosyi nakipeobrazovaniya.– K.: Vischa shkola, 1987.– 179 p.
8. Issledovanie vliyaniya skorosti dvizheniya soka na koeffitsient nakipeobrazovaniya v podogrevatelyah saharной promyishlennosti. Tobilevich N.Yu., Sagan I.I., Garyazha V.T., Knyazev A.A. Pischevaya promyishlennost. – Kiev, 1965. – P. 132–135.
9. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. O.P. Arsenyeva, B. Crittenden, M. Yang, P.O. Kapustenko. Applied Thermal Engineering.– 2013.– Т. 61, # 1. – P. 53–59.
10. Accounting for thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyanskyu, P.O. Kapustenko, O.V. Demirskiy. PRESS 2012: 15th Conference on Process Integra-

tion, Modelling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction.– Т. 29.– Prague, CZ: Chemical Engineering Transactions, 2012.– С. 1327–1332.

11 Crystallization fouling with enhanced heat transfer surfaces. B. Crittenden, M. Yang, L. Dong., R. Hanson, J. Jones, R. Kundu, J. Harris, O. Klochok, O. Arsenyeva, P. Kapustenko. International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning – 2013 / Pod red. Malayeri M. R. i dr.– Budapest, Hungary, 2013.– P. 379–385.

12. Mitigation of Fouling in Plate Heat Exchangers for Process Industries. L. Tovazhnyanskyy, P. Kapustenko, O. Arsenyeva, A. Yuzbashyan. PRESS 2012: 15th Conference on Process Integration, Modelling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction.– Т. 29 – Prague, CZ: Chemical Engineering Transactions, 2012.– С. 1441–1446.

13. Prakticheskaya rekonstruktsiya systemy podogrevatelya sahnogo soka pered vyiparivaniem / L.L. Tovazhnyanskyy, O.P. Arsenyeva, A.V. Demirskiy, G.L. Khavin. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovopraktichniy zhurnal.– Kharkiv: NTU "HPI".– 2012, #2.– P. 99–102.

14. Analiz roboty plastinchatogo podogrevatelya sahnogo soka s uchetom otlozheniy. Arsenyeva O.P., Babak T.G., Kapustenko P.A., Havin G.L. Naukovi pratsi ONAHT.– Odesa: 2012, Vip. 41.– Tom. 2.– P. 173–177.

15. Tovazhnyanskyy L.L., Demirskiy A.V., Khavin G.L. K opredeleniyu velichiny zagryazneniya teploperedayushey poverhnosti plastinchatykh teploobmennikov. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovopraktichniy zhurnal. – Harkiv: NTU "HPI". – 2012, #4. – P. 99–104.

16. Analiz roboty sistem podogrevatelya sahnogo soka s uchetom zagryazneniy teploobmennoy poverhnosti. A.V. Demirskiy, L.L. Tovazhnyanskyy, O.P. Arsenyeva, P.A. Kapustenko, G.L. Khavin. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovopraktichniy zhurnal. – Harkiv: NTU "HPI". – 2013, #2.– P. 14–17.

17. Demirskiy A.V. Analiz protsessa obrazovaniya otlozheniy v plastinchatykh podogrevatelyakh sahnogo promyshlennosti. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovopraktichniy zhurnal. – Harkiv: NTU "HPI". – 2014, #4. – P. 74–78.

УДК 045.01:664.1

Демірський О.В., Георгіадіс М.С., ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., АРСЕНЬЄВА О.П., КАПУСТЕНКО П.О., БАБАК Т.Г., ХАВІН Г.Л.

### МОНІТОРИНГ ДИНАМІКИ РОБОТИ ПЛАСТИНЧАСТИХ ПІДГРІВАЧІВ ЦУКРОВОГО СОКА В РОБОЧИХ УМОВАХ

Розглянуто роботу пластинчатих підігрівачів цукрового соку у реальних умовах експлуатації на цукровому заводі. Була визначена степінь забруднення усіх апаратів і встановлені строки виходу на чищення за критерієм збільшення втрат тиску у підігрівачі. Вивчена структура і склад відкладень, та їх розподіл у теплообміннику. Представлені висновки і рекомендації для раціонального проектування теплообмінних апаратів.

Demirskyy A.V., Geogiadis M., Tovazhnianskyy L.L., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.A., Babak T.G., Khavin G.L.

### MONITORING THE DYNAMICS OF THE WORK PLATE HEAT EXCHANGERS OF SUGAR JUICE IN OPERATING CONDITIONS

The work of the plate heaters sugar juice in actual use in a sugar factory is considered. It was determined the degree of fouling of all installed devices and time-to-clean under the criterion of increasing pressure drop in the unit. The structure and composition of the deposits and their distribution in the heat exchanger are studied. The conclusions and recommendations for the rational design of heat exchangers are presented.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАМЕТНОСТИ ОБЪЕКТОВ БТТ

В современных условиях повышения скрытности типовых целей бронетанковой техники (БТТ) необходимо применение комплексных систем разведки наземных целей, основанных на использовании различных физических принципов для обнаружения необходимых демаскирующих факторов [1–3].

В ходе решения этой актуальной научной проблемы, одним из путей решения которой является усовершенствование комплекса приборов наблюдения и обнаружения наземных целей, на основе дополнительной оптико-акустической системы разведки (ДОАСР) наземных целей с использованием контрастирования их цифровых изображений на местности и акустических возмущений, генерируемых объектами БТТ, был проведен ряд экспериментальных исследований в области оптики и акустики [4,5].

Для оценки результатов экспериментального исследования по определению оптической заметности объектов БТТ использовались два метода определения теоретических и экспериментальных погрешностей.

Первый метод заключается в определении характера изменения разрешающей способности (РС) оптической системы (ОС) фотоаппарата Nikon D3200 при амплитудной фильтрации информационного сигнала. В качестве амплитудного фильтра (АФ) использовалась плоско-параллельная пластина из оптического стекла, дающая минимальные искажения оптического сигнала, с непрозрачной маской прямоугольной формы. Фильтр размещали непосредственно перед объективом ОС. Длина маски (ДМ) АФ равна диаметру входного отверстия объектива, а ширина изменяется в определенных пределах, указанных в таблице 1.

Экспериментальная установка (рисунок 1) для определения РС ОС при наблюдении эталонного изображения (миры) с учётом всех элементов данной установки состоит из: микроскопа для визуального наблюдения (1); исследуемой оптической системы с АФ (2); контрольной миры (3) и подсветки (4).

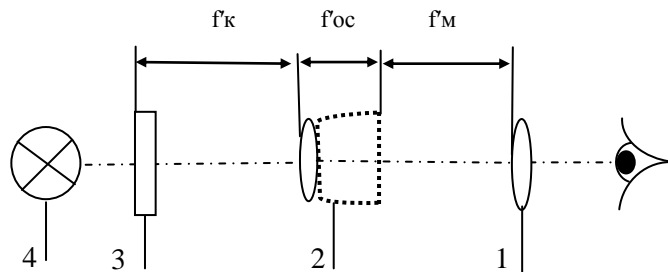


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

$f_m'$  – фокусное расстояние микроскопа;  $f_{oc}'$  – фокусное расстояние оптической системы фотоаппарата;  
 $f_k'$  – фокусное расстояние до контрольной миры

В экспериментальной установке используется штриховая мира. Тогда РС ОС находим путём определения наибольшего номера элемента миры, который разрешается глазом, и вычисляем как [6]

$$R_N = \frac{60}{B} \cdot K_N, \quad (1)$$

где  $B$ ,  $N$  – база и номер элемента миры;  $K_N$  – коэффициент ( $K_N = 1,06^{N-1}$ ).

При этом суммарная РС зависит от РС составляющих, которые определяются согласно соотношения [7]

$$\frac{1}{R_N} = \frac{1}{R_{mo}} + \frac{1}{R_{ocп}} + \frac{1}{R_k}, \quad (2)$$

где  $R_{mo}$  – разрешающая способность системы "микроскоп – глаз наблюдателя";  $R_{ocп}$  – разрешающая способность оптической системы в плоскости предметов с использованием амплитудного фильтра,

$$R_{ocп} = \frac{R_{п} \cdot R_{oc}}{R_{oc} + R_{п}}; R_{oc} - \text{разрешающая способность оптической системы.}$$

При заранее известных значениях  $R_{mo}$ ,  $R_k$  и определенному по (1)  $R_N$ , вычисляем значение РС ОС ( $R_{oc}$ ) с использованием АФ по соотношению (2).

Установлено, что РС данной ОС уменьшается при увеличении ширины маски АФ. Согласно приведенным данным (таблица 1) фильтрация информационного сигнала осуществляется в горизонтальной и вертикальной плоскостях. На рисунке 2 приведены зависимости нормированной РС от ширины и длины миры для расчетных и экспериментальных данных. В первом случае разрешение, постепенно уменьшаясь, исчезает при ширине маски АФ  $l = 7$  мм (кривая 1, рисунок 2,б), при этом осуществляется фильтрация изображения горизонтально расположенных штрихов миры.

Таблица 1 – Экспериментальные данные испытаний Nikon D3200 ( $f = 200$  мм; мира № 4;  $B = 8,8$  мм;  $R_{mo} = 220,851$  мм<sup>-1</sup>;  $R_k = 1860$  мм<sup>-1</sup>;  $R_{oc} = 20,243$  мм<sup>-1</sup>)

Маска АФ размещена горизонтально										
L	N			R <sub>N</sub>			Rafo			R <sub>п</sub>
	верт	гор	общ	верт	гор	общ	верт	гор	общ	общ
3	17	17	17	17,5	17,5	17,5	19,3	19,3	19,3	0
5	17	17	17	17,5	17,5	17,5	19,3	19,3	19,3	0,85
7	16	16	12,5	16,3	16,3	13,5	17,8	17,8	14,5	3,54
7,5	13	15	–	13,5	15,42	–	14,5	16,8	–	–
8	13	–	–	13,5	–	–	14,7	–	–	–
8,5	13	–	–	13,5	–	–	14,7	–	–	–
9	13	–	–	13,5	–	–	14,7	–	–	–
11	10,5	–	–	11,2	–	–	12,1	–	–	–
12	10,5	–	–	11,2	–	–	12,1	–	–	–
13	10,5	–	–	11,2	–	–	12,1	–	–	–
Маска АФ размещена вертикально										
3	17	17	17	17,5	17,5	17,5	19,3	19,3	19,3	0
5	17	16	16	17,5	16,1	16,1	19,3	17,7	17,7	0,85
7	13	16	13	13,5	16,1	13,5	14,7	17,7	14,5	3,44
7,5	6	16	6	8,7	16,3	8,7	9,7	17,8	9,1	9,03
8	–	14	–	–	14,5	–	–	15,7	–	–
8,5	–	13	–	–	13,5	–	–	14,7	–	–
9	–	13	–	–	13,5	–	–	14,7	–	–
11	–	13	–	–	13,5	–	–	14,7	–	–
12	–	12	–	–	12,7	–	–	13,5	–	–
13	–	12	–	–	12,7	–	–	13,5	–	–

Аналогичные преобразования осуществлялись при вертикальном расположении маски АФ, однако граничное значение ширины маски АФ равно  $l = 7,5$  мм (кривая 2, рисунок 2,б); производится фильтрация изображения вертикально расположенных штрихов миры. Из графиков, приведенных на рисунке 2,б, видно, что при горизонтальном расположении маски спад кривой разрешения происходит менее интенсивно (кривая 1), чем при вертикальном расположении маски (кривая 2), что указывает на асимметричность АФ в данных плоскостях. Таким образом, изменяя плоскость расположения маски АФ, можно осуществлять управление РС исследуемой ОС в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а изменяя ширину маски АФ, получить диапазон управляемых значений РС данной ОС фотоаппарата.

Передаточная характеристика для безаберрационного объектива определяется функцией передачи модуляции (ФПМ), которая учитывает явление дифракции.

ФПМ определяется [6,7] как автокорреляционная функция распределения амплитуды информационного сигнала в пределах выходного зрачка ОС

$$r(\tau) = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} y(x) y(x - \tau) dx}{\iint_{-\infty}^{\infty} y^2(x) dx} . \quad (3)$$

Подставив в (3) функцию, описывающую распределение амплитуд информационного сигнала  $y(x)$  на выходе ОС и задавшись величиной смещения апертуры  $\tau$ , определяли ФПМ, учитывая явление дифракции.

Используя величину порогового контраста глаза, определяли значения РС и построили графики зависимости (рисунок 2,а) относительного значения РС от ширины горизонтальной либо вертикальной маски, вычисленные аналитически. Необходимо отметить, что зависимости на рисунке 2,а имеют существенные различия по форме, однако видно, что степень уменьшения РС при горизонтальной и вертикальной фильтрации различна.

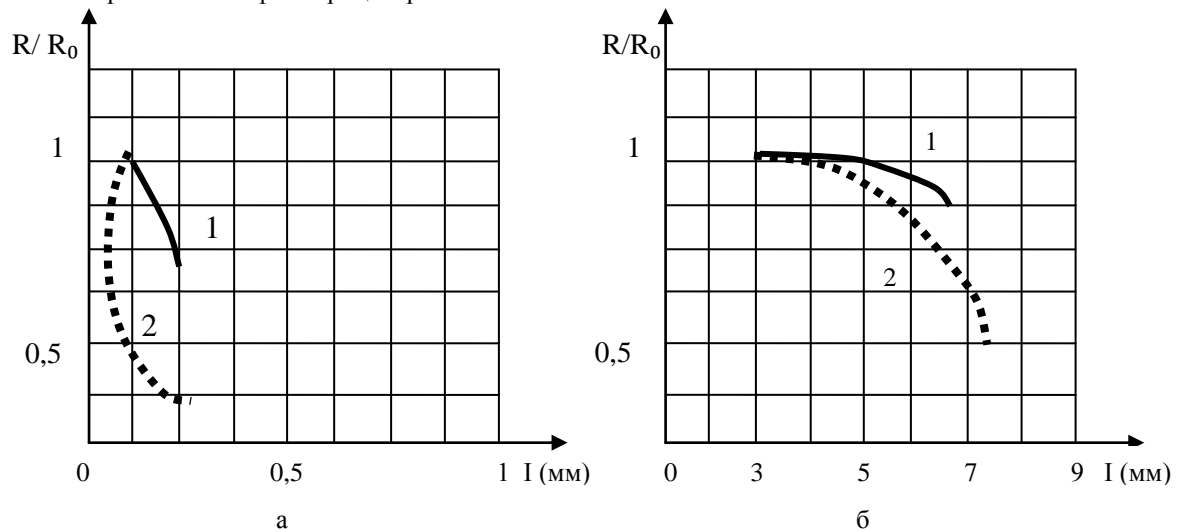


Рисунок 2 – Зависимость нормированной РС от ширины ДМ  
(а – расчетная при нормированной апертуре; б – экспериментальная)

Полученные данные показывают возможность раздельного изменения значения РС в различных плоскостях оптической системы и то, что данные результаты могут быть использованы для коррекции (выравнивания) значения РС по полю кадра цифрового фотоаппарата Nikon D3200, что существенно будет влиять на качество цифровых изображений объектов БТТ для их последующей обработки и оконтуривания.

**Второй метод.** Для определения аберраций объектива типа дисторсия применен метод астрометрической редукции, используемый при фотографических, координатных наблюдениях звезд по известному критерию отбора надежных наблюдений Греббса [8]. Для этого на исследуемом фотоаппарате, в точке проведения фотографирования объекта БТТ (БТР-60ПБ) на тактическом поле учебного центра НА НГУ г. Харькова [9], получили 20 кадров звездных площадок в зените. Фотографирование звездных площадок проводилось в ночное время (с 23.00 до 24.00) по всем сторонам света пять раз от горизонта до зенита по соответствующим углам для построения звездного неба в целом над точкой.

Программой Astrometrica [10] были вычислены экваториальные координаты звезд и разница (поправки) между обнаруженными (О) и идеальными (С) по каталогу положений и собственных движений звезд (ХРМ) с применением линейной модели редукции (О-С).

Astrometrica является интерактивным программным обеспечением для астрометрической и фотометрической обработки прибора зарядовой связи (ПЗС) – изображений звезд и малых тел Солнечной системы (астероидов, комет и карликовых планет). Текущая версия разработана для 32-битной операционной системы Windows.

Используя результаты вычислений по каждому кадру, строились трехмерные графики распределения (О-С) в зависимости от прямоугольных координат в системе ПЗС-матрицы. Изображение в пикселах ПЗС-матрицы разбивалось на ячейки усреднения 16x16 пиксел для камеры Nikon D5100 и 11x11 пиксел для камеры Nikon D3200. В каждой ячейке проводилось усреднение невязок [11].



Для исследования неравномерности поля фотоаппаратов Nikon D5100 с фокусным расстоянием 105 мм и Nikon D3200 с фокусным расстоянием 300 мм использовалось 20 кадров с экспозицией 5 с. В среднем использовалось около 200 звезд для одного кадра. Для линейной редукций не выявлено систематической неравномерности распределения (O-C) по полю ПЗС-матрицы (рисунок 3 и рисунок 4).

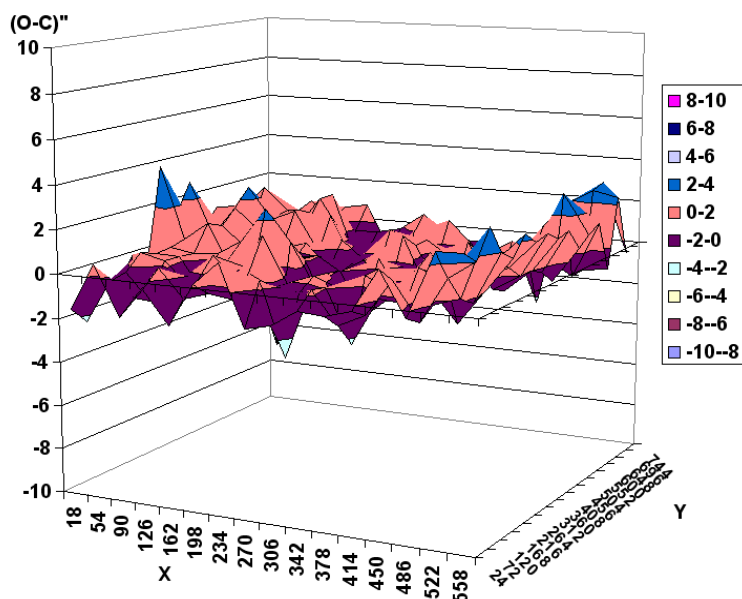


Рисунок 3 – Распределение (O-C) по полю ПЗС-матрицы для объектива Nikon D5100: X,Y - номера средней пиксели ячейки усреднения

Применение усредненных значений поправок за дисторсию позволяет убрать влияние искажений оптической системы до уровня случайной ошибки в  $\pm 0.12$ , что соответствует 1 мм в изображении объектива находящегося на расстоянии 1000 м от объекта БТТ и 1 см непосредственно в плоскости фотографируемого объекта БТТ находящегося на расстоянии 1000 м.

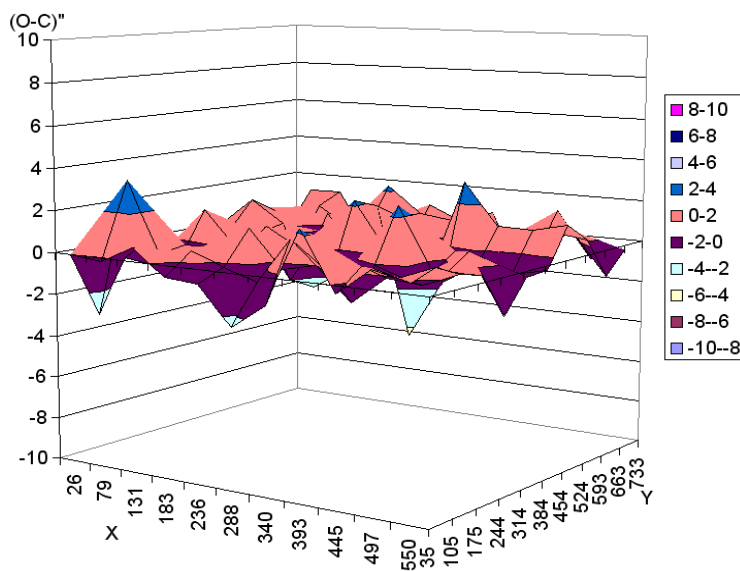


Рисунок 4 – Распределение (O-C) по полю ПЗС-матрицы для объектива Nikon D3200: X,Y - номера средней пиксели ячейки усреднения

Таким образом, анализ качества оптико-цифровой аппаратуры (Nikon D5100, D3200) примененной в ходе эксперимента показывает, что 1 см погрешности в непосредственном изображении объекта БТТ на

расстоянии 1000 м в его изображении оптико-цифровой аппаратуре соответствует 1 мм, соответственно 5 см на расстоянии 5000 м, 10 см на расстоянии 10000 м и далее, что не приводит к искажению образца фотографируемого объекта БТТ.

В связи с этим, для необходимых дальностей обнаружения ДОАСР наземных целей до 5–7 км и более [12] такие погрешности можно считать приемлемыми для практического применения. Кроме того, в вычислительный модуль ДОАСР наземных целей может быть помещена функция, вычисляющая погрешности от дальности объекта и, таким образом, выдавать целеуказания с учетом вычисленной погрешности курсового угла на цель.

### Литература

1. Анипко О.Б. Комплексная проблема поиска и обнаружения наземных целей для поражения вооружением, установленным на объектах бронетехники / О.Б. Анипко, Ю.М. Бусяк, И.Ю. Бирюков // Зб. наук. праць Акад. ВВ МВС України. – 2011. – № 2 (18). – С. 43–47.
2. Бирюков И.Ю. Рациональный синтез оптической и акустической разведки для системы управления огнем объекта бронетанковой техники / И.Ю. Бирюков / Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – №1(17) – С. 12–15.
3. Бирюков И.Ю. Интеграция дополнительной оптико-акустической системы разведки в систему управления огнем танка / И.Ю. Бирюков, С.Н. Сиренко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2015. – № 1. – С. 119–123.
4. Анипко О.Б. Звуковые портреты объектов БТТ для обнаружения и распознавания целей – О.Б. Анипко, И.Ю. Бирюков, Ю.М. Бусяк // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2011. – № 3. – С. 31–36.
5. Бирюков И.Ю. Обработка цифровых изображений при распознавании наземных целей дополнительной оптико-акустической системой разведки объектов БТТ / И.Ю. Бирюков // Системи озброєння і військова техніка. – 2013. – №3 (35). – С. 52–58.
6. Применение методов Фурье – оптики / Под. ред. Г. Старка; пер. с англ. А.А. Васильева, А.В. Парфенова. – М.: Радио и связь, 1988. – 535 с.
7. Черный С.В. Методика определения разрешающей способности оптических систем при визуальном наблюдении с использованием амплитудной фильтрации оптического сигнала / С.В. Черный, А.А. Жевтюк // Системи обробки інформації. – 2002. – №4(20). – С. 247–250.
8. Подобед В.В. Фундаментальная астрометрия. – М.: Наука. – 1968. – 452 с.
9. Бирюков И.Ю. Маскировочная окраска наземных объектов и методы их распознавания / И.Ю. Бирюков // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2013. – № 2. – С. 101–109.
10. Shareware for research grade CCD Astrometry [Электронный ресурс]. Режим доступа к документу: <http://www.astrometrica.at/>. Название с экрана.
11. Федоров П.Н. Опорные системы координат в современной астрометрии / П.Н. Федоров, В.С. Ахметов, А.В. Шульга // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т.16, № 6. – С. 68–74.
12. Анипко О.Б. Комплексный метод обнаружения и распознавания наземных целей на основе анализа цифровых изображений и регистрации акустических возмущений / О.Б. Анипко, И.Ю. Бирюков // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2014. – № 4. – С. 51–57.

### Bibliography (transliterated)

1. Anipko O.B. Kompleksnaya problema poiska i obnaruzheniya nazemnyih tseley dlya porazheniya vooruzheniem, ustanovlennym na ob'ektah bronetehniki. O.B. Anipko, Yu.M. Busyak, I.Yu. Biryukov. Zb. nauk. prats Akad. VV MVS Ukrayini. – 2011. – # 2 (18). – P. 43–47.
2. Biryukov I.Yu. Ratsionalnyiy sintez opticheskoy i akusticheskoy razvedki dlya sistemy upravleniya ognem ob'ekta bronetankovoy tehniky. I.Yu. Biryukov. Sistemi ozbroennya i viyskova tehniky. – 2015. – #1(17) – P. 12–15.
3. Biryukov I.Yu. Integratsiya dopolnitelnoy optiko-akusticheskoy sistemy razvedki v sistemu upravleniya ognem tanka. I.Yu. Biryukov, S.N. Sirenko. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – 2015. – # 1. – P. 119–123.
4. Anipko O.B. Zvukovyye portrety ob'ektov BTT dlya obnaruzheniya i raspoznavaniya tseley – O.B. Anipko, I.Yu. Biryukov, Yu.M. Busyak. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – 2011. – # 3. – P. 31–36.
5. Biryukov I.Yu. Obrabotka tsifrovyyih izobrazheniy pri raspoznanii nazemnyih tseley dopolnitelnoy optiko-akusticheskoy sistemoй razvedki ob'ektov BTT. I.Yu. Biryukov. Sistemi ozbroennya i viyskova tehniky. – 2013. – #3 (35). – P. 52–58.

6. Primenenie metodov Fure-optiki. Pod. red. G. Starka; per. s angl. A.A. Vasileva, A.V. Parfenova. – M.: Radio i svyaz, 1988. – 535 p.
7. Cherniy S.V. Metodika opredeleniya razreshayushey sposobnosti opticheskikh sistem pri vizualnom nablyudenii s ispolzovaniem amplitudnoy filtratsii opticheskogo signala. S.V. Cherniy, A.A. Zhevtyuk. *Sistemi obrobki informatsiyi*. – 2002. – #4(20). – P. 247–250.
8. Podobed V.V. *Fundamentalnaya astrometriya*. – M.: Nauka. – 1968. – 452 p.
9. Biryukov I.Yu. Maskirovochnaya okraska nazemnykh ob'ektov i metody ih raspoznavaniya. I.Yu. Biryukov. *Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya*. – 2013. – # 2. – P. 101–109.
10. Shareware for research grade CCD Astrometry [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa k dokumentu: <http://www.astrometrica.at/>. Nazvanie s ekrana.
11. Fedorov P.N. Opornyye sistemyi koordinat v sovremennoy astrometrii. P.N. Fedorov, V.S. Ahmetov, A.V. Shulga. *Kosmichna nauka i tehnologiya*. – 2010. – T.16, # 6. – P. 68–74.
12. Anipko O.B. Kompleksnyy metod obnaruzheniya i raspoznavaniya nazemnykh tseley na osnove analiza tsi-frovyykh izobrazheniy i registratsii akusticheskikh vozmuscheniy. O.B. Anipko, I.Yu. Biryukov. *Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya*. – 2014. – # 4. – P. 51–57.

УДК 355.4; 522.3; 623.4

Аніпко О.Б., Бірюков І.Ю., Шульга О.В., Сіренко С.М.

#### **АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПО ЗНАХОДЖЕННЮ ОПТИЧНОЇ ПОМІТНОСТІ ОБ'ЄКТІВ БТТ**

На основі використання методу знаходження характеру зміни дозволяючої здібності оптико-цифрової апаратури при амплітудній фільтрації інформаційного сигналу та методу астрометричної редукції, що використовується під час фотографічних, координатних спостереженнях зірок по критерію Греббса дана оцінка результатів експериментальних досліджень щодо знаходження оптичної примітності об'єктів БТТ.

Anipko O.B., Biryukov I.Yu., Shulga A.V., Sirenko S.N.

#### **ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL RESEARCH FINDING VISIBILITY IN OPTICAL OBJECTS BTT**

On the basis of the method of the character changes enabling capabilities opto-digital equipment in filtering the information signal amplitude and reduction astrometric method used during fotohrafychnykh, coordinate observations of stars on the criterion Hrebbsa assess the results of experimental research on optical prymitnosti objects bronetehnika purposes.