

ИТЭ №4, 2014

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<i>Ульєв Л. М., Васильєв. М. А.</i> Пинч-интеграция процессов переработки продуктов коксования на коксохимическом заводе	3
<i>Перевертайленко О. Ю., Товажнянський Л. Л., Ніколаїдіс Г. Н., Капустенко П. О., Арсеньєва О. П.</i> Проблеми та перспективи інтенсифікації процесу короткоциклової адсорбції із змінним тиском у виробництві біометану	10
<i>Ульєв Л. М., Нечипоренко Д. Д.</i> Пинч-интеграция блоков гидроочистки сырья и деэтанализации и стабилизации катализата на установке Л-35-11/600	14
<i>Гарев А. О., Товажнянский Л. Л., Капустенко П. А., Арсеньєва О. П., Клемеш Й, Кусаков С. К., Анохин П., Чучек Л.</i> Разработка системы утилизации тепла вторичного пара отделения сушки табака с использованием энергоэффективного пластинчатого теплообменного оборудования	20
<i>Сахненко М. Д., Ведь М. В., Каракуркчі Г. В., Єрмоленко І. Ю.</i> Ресурсозаощаджувальна технологія формування багатоконпонентних покриттів на основі заліза для зміцнення деталей	25
<i>Бухкало С. І.</i> Деякі властивості полімерних відходів у якості сировини для енерго- і ресурсозберігаючих процесів	29
<i>Ведь В. Є., Миронов А. М., Ровенський О. І.</i> Оцінка енерговитрат процесу сушки деревинної сировини	34
<i>Гапон Ю. К., Ведь М. В., Сахненко Н. Д., Ненастина Т. А., Долженко Ю. І.</i> Ресурсосберегающая технология электрохимического осаждения тернарных сплавов кобальта с тугоплавкими компонентами	38

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

<i>Анипко О. Б., Приймак А. В.</i> Комплексирование показателей совершенства транспортных самолетов	43
<i>Анипко О. Б., Бирюков И. Ю.</i> Комплексный метод обнаружения и распознавания наземных целей на основе анализа цифровых изображений и регистрации акустических возмущений	51
<i>Анипко О. Б., Щепцов О. В.</i> Геронтологические изменения серебряно-цинковых аккумуляторных батарей торпеды СЭТ-65 в процессе длительного хранения	58
<i>Кононов Б. Т.</i> Визначення залишкової ємності свинцево-кислотних акумуляторів	64

<i>Борисюк М. Д., Александров Е. Е., Александрова Т. Е.</i> К задаче построения инвариантного стабилизатора канала вертикального наведения основного вооружения танка	67
<i>Демирский А. В.</i> Анализ процесса образования отложений в пластинчатых подогревателях сахарной промышленности	74
<i>Бурдо О. Г., Бандура В. Н., Ружицкая Н. В.</i> Принципы адресного подвода энергии при переработке пищевого сырья	79
<i>Коломієць О. В., Козлов Я. М., Сухий К. М., Сухий М. П., Беляновська О. А.</i> Дослідження роботи сонячного адсорбційного холодильника на основі композитного сорбенту «силікагель/Na ₂ SO ₄ »	86
<i>Склябінський В. І., Ляпоценко О. О., Настенко О. В.</i> Методика та стратегія оптимізаційних досліджень при динамічному моделюванні процесів інерційно-фільтруючої сепарації у високоефективному енергозберігаючому газосепараційному обладнанні з застосуванням інтегрованих scada програмно-апаратних комплексів	89
<i>Анипко О. Б., Фененко О. А.</i> Дефекты стыковочной ленты узла крепления кия к подкилевой надстройке и физико-химические процессы, приводящие к ним	96
<i>Кононов Б. Т.</i> Термодинамічні процеси в хімічних джерелах струму	103

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>Ульєв Л. М., Яценко О. А.</i> Анализ и выбор теплообменного оборудования для процесса производства карбамида на агрегате АК-70	108
<i>Билец Д. Ю.</i> Исследования по утилизации жидких органических отходов путем окислительного пиролиза	113
<i>Братута Э. Г., Кошлак А. В.</i> Особенности теплопроводности пористого материала	116
<i>Илюнин О. О., Перевертайленко А. Ю., Селяков А. М., Шамраев А. А.</i> Нечеткая процедура оценивания предельно допустимой концентрации сульфата железа в травильных растворах	120
<i>Братута Э. Г., Сизоненко А. В.</i> Производство топливных эмульсий	125
<i>Каневец Г. Е., Алтухова О. В.</i> Синтезатор алгоритмов и программ ОКПТО – 2014. Структура, область применения, дальнейшие пути совершенствования	130
<i>Микитюк П. Д.</i> Почвенные термоэлектрические генераторы: характеристики и применение	134

Терзиев С. Г., Ружицкая Н. В., Борщ А. А.

Этапы внедрения инновационных теплотехнологий в производство пищевых концентратов

138

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Товажнянский Л. Л., Шапоров В. П., Шестопалов А. В., Питак И. В.

Некоторые свойства пластиков, армированных нитевидными кристаллами TiO₂, AlN и SiC

143

УДК 66.045.1

Ульєв Л.М., Васильєв М.А.

ПИНЧ-ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПРОДУКТОВ КОКСОВАНИЯ НА КОКСОХИМИЧЕСКОМ ЗАВОДЕ

Введение. Рост цен на энергоресурсы заставляет энергозависимые страны диверсифицировать поставки энергоносителей и ускоренными темпами реализовывать программы увеличения энергоэффективности промышленного производства. По итогам 2006 года энергоемкость ВВП в Украине составила 0,89 кг условного топлива на 1 долл. США. Этот показатель является сегодня самым высоким среди стран Европы. В частности, в Польше энергоемкость ВВП составляет 0,34 кг у.т / долл. США, Германии – 0,26, Великобритании – 0,23 [1]. Особенно важным является уменьшение энергопотребления в химической и металлургической промышленности, где цена на топливо составляет основную часть себестоимости продукции.

В работе исследуются технологические процессы дистилляции бензола и дистилляции каменноугольной смолы, типичные для стран СНГ. Сырой бензол извлекается из прямого коксового газа абсорбцией органическими поглотителями и представляет собой сложную смесь химических (ароматических) соединений, главными из которых являются бензолные углеводороды (бензол и его гомологи), их содержание составляет (80–90)%.[2]. Экстракция данных исследуемых процессов выполнена ранее, были построены составные кривые для существующего ΔT_{min} (36 °С, 20 °С и 302 °С), определена мощность рекуперации 17,44 МВт и мощность горячих (34,78 МВт) и холодных (33,5 МВт) утилит [3]. В данной статье описывается процесс реконструкции двух отделений дистилляции бензола и цеха дистилляции каменноугольной смолы.

Теплоэнергетическая интеграция. Для выполнения проекта реконструкции был выбран метод пинч-анализа, который показал свою эффективность в исследованиях, проводившихся ранее в химической [5–6], нефтехимической [6–9] и коксохимической [10–13] 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 ΔT_{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 «Hint» [14], представлены на (рис. 1). 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 коксовый газ, стоимость, которого составляет – 107,5 долл. США за 1000 м³ [15], соответственно цена горячих утилит, с учетом того, что в году 8000 рабочих часов, составит – 172 долл. США за 1 кВт год. Цена холодных утилит составит – 24,5 долл. США за 1 кВт год. Для определения минимальных приведенных затрат примем следующие стоимостные характеристики теплообменного оборудования. Стоимость теплообменных аппаратов определяется выражением (1):

$$\text{Кап. стоимость} = A_T + B_T (S)^c, \tag{1}$$

где $A = 5000$ долл. США; $B = 500$ долл. США; S – площадь поверхности теплообмена, м²; для пластинчатых теплообменников, как правило, $c = 0,87$ [16].

Построение стоимостных кривых для каждого из рассматриваемых процессов (рис. 1) позволило определить значение $\Delta T_{min,opt}$, которое составило: 10 °С для процессов дистилляции бензола (рис. 1а–1б) и 12 °С для процесса дистилляции каменноугольной смолы (рис. 1с). Построение составных кривых для системы потоков каждого технологического процесса с учетом найденных значений $\Delta T_{min,opt}$ (рис. 2) позволяет определить целевые энергетические значения для проекта реконструкции. Суммарное потребление горячих утилит тремя процессами – 28,23 МВт, потребление холодных утилит – 27 МВт. Снижение потребления горячих и холодных утилит – 18,8 % и 19,4 % соответственно, при этом увеличилась мощность рекуперации теплоты на 37,4 %.

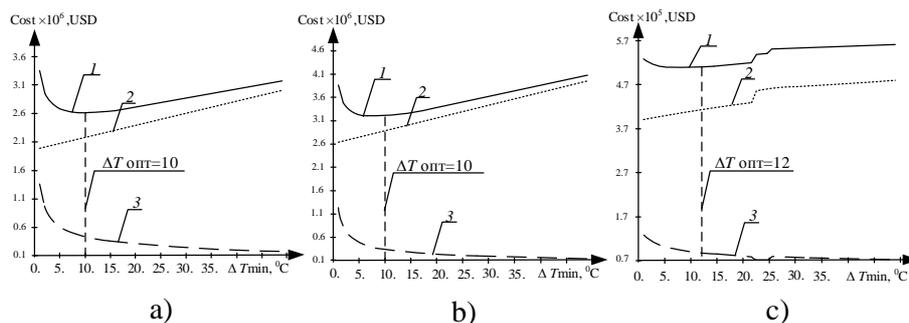


Рисунок 1 – Стоимостные зависимости приведенных величин от минимальной разности температур для системы потоков с (табл. 1–3)

1 – приведенная общая стоимость, 2 – приведенная стоимость энергии, 3 – приведенные капитальные затраты
 а) – для таблицы 1; б) – для таблицы 2; с) – для таблицы 3

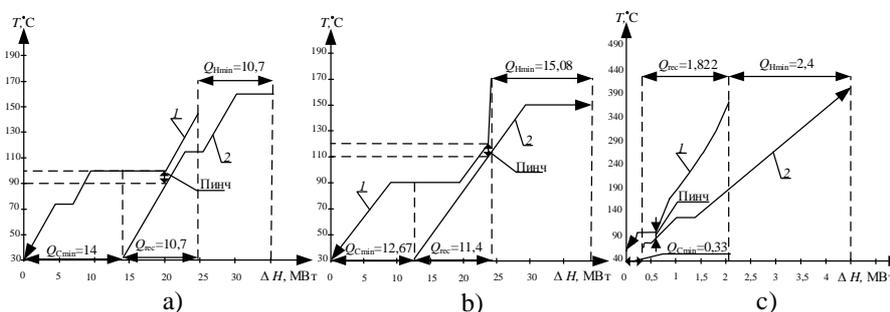


Рисунок 2 – Составные кривые после реконструкции для найденного значения ΔT_{opt} в соответствии с (рис. 5)

1, 2 – горячая и холодная составная кривая; Q_{Hmin} , Q_{Cmin} – нагрузка горячих и холодных утилит;
 Q_{REC} – мощность рекуперации

В соответствии с принципами пинч-анализа [4], для полученных значений $\Delta T_{\text{min, opt}}$, спроектированы новые сеточные диаграммы и рассчитана мощность теплообменного оборудования для процессов дистилляции бензола и дистилляции каменноугольной смолы (рис. 3–5).

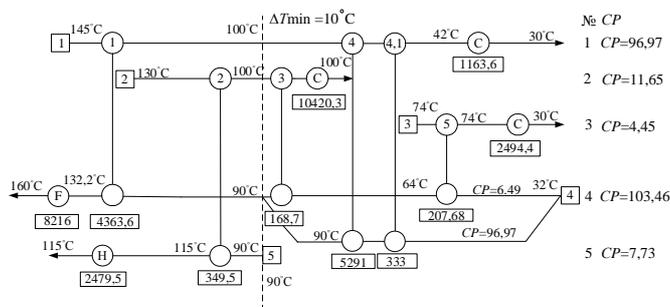


Рисунок 3 – Сеточная диаграмма оптимизированного проекта реконструкции теплообменной сети процесса дистилляции бензола на двухколонном агрегате; количество горячих утилит 10695,7 кВт; количество холодных утилит 14078 кВт

Нагрузка на теплообменных аппаратах Т-1 и Т-2 [3] позволяет использовать их при проектировании новой сеточной диаграммы (рис. 3). На новой сеточной диаграмме теплообменник Т-1 используется на старой позиции, теплообменник Т-2 перенесен на новую позицию и переименован в Т-4. На позиции Т-2; Т-3; Т-4,1; Т-5 были установлены новые пластинчатые теплообменники типа «Компаблок» фирмы «Альфа Лаваль» [16]. Использование существующей поверхности теплообмена позволяет сократить капитальные затраты, что в свою очередь ведет к уменьшению срока окупаемости проекта.

При проектировании сеточной диаграммы (рис. 4), для уменьшения капитальных затрат было принято решение использовать действующие трубчатые теплообменники под номерами Т-1, Т-2 [3] и перенести их на новую сеточную диаграмму с номером 2.1 (рис. 4). На позиции 1–3 были установлены новые пластинчатые теплообменники фирмы «Альфа Лаваль» [16].

Путь упрощения теплообменной системы процесса переработки каменноугольной смолы был опубликован ранее [11–13]. В данной работе используется сеточная диаграмма оптимизированного проекта реконструкции теплообменной сети (рис. 5) для оценки возможности интеграции процесса в пределах общего производственного комплекса.

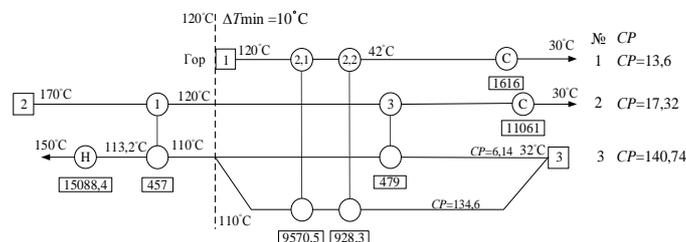


Рисунок 4 – Сеточная диаграмма оптимизированного проекта реконструкции теплообменной сети процесса дистилляции бензола на одноколонном агрегате; горячие утилиты 15088,4 кВт; холодные утилиты 12677 кВт

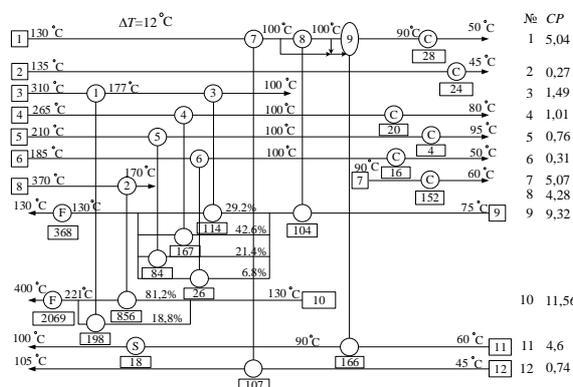


Рисунок 5 – Сеточная диаграмма оптимизированного проекта реконструкции теплообменной сети для таблицы 3; S – нагрев парами среднего давления; количество горячих утилит 2455 кВт; количество холодных утилит 244 кВт

В пинч-анализе наиболее подходящим инструментом понимания взаимодействия утилит с процессом является «большая составная кривая» [4]. Для сеточных диаграмм с оптимальным значением ΔT_{\min} (рис. 3–5), были построены большие составные кривые (БСК) (рис. 6).

На БСК процесса дистилляции бензола на двух колонном агрегате показана возможность установки теплового насоса (рис. 6а) [4]. Интеграция теплового насоса с процессом при размещении насоса поперек пинча обеспечивает энергосбережение за счет сокращения потребления внешних энергоносителей. Тепловой насос отбирает теплоту $Q_{\text{ТН}}$ от процесса ниже пинча, т.е. из общего источника энергии, тем самым уменьшая значение холодной утилиты на $Q_{\text{ТН}}$. Совершая работу W , тепловой насос передает теплоту в подсистему, находящуюся выше пинча, т.е. в общий энергетический сток, а это означает, что горячая утилита уменьшается на величину $Q_{\text{ТН}} + W$ [19].

С помощью программы «Aspen Hysys» [20] была рассчитана мощность теплового насоса, которая составила 700 кВт. Коэффициент преобразования теплового насоса рассчитывается по формуле (2) [19].

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

$$\varepsilon = \frac{1779,5 + 700}{700} = 3,54,$$

где $Q_{\text{ТН}}$ – 1779,5 кВт; W – 700 кВт.

Использование общих температурных профилей производственного комплекса сделало возможным определение целевых энергетических значений для нескольких процессов [21]. Строятся эти профили из БСК отдельных процессов, которые входят в производственный комплекс [4]. На (рис. 7) показан температурный профиль комплекса трех процессов. Создание профиля процесса начинается с построения индивидуальных БСК. Затем эти БСК модифицируются. Немонотонные части БСК, так называемые «карманы», закрываются вертикальными линиями и обрезаются. После чего профили источника и стока БСК

сдвигаются на $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$. При этом температуры элементов профиля источника уменьшаются на $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$, а профиля стока увеличиваются на $\frac{1}{2} \Delta T_{\min}$. Очевидно, что для приведения температурных профилей к реальным температурам в каждом из процессов используется свое собственное ΔT_{\min} [4].

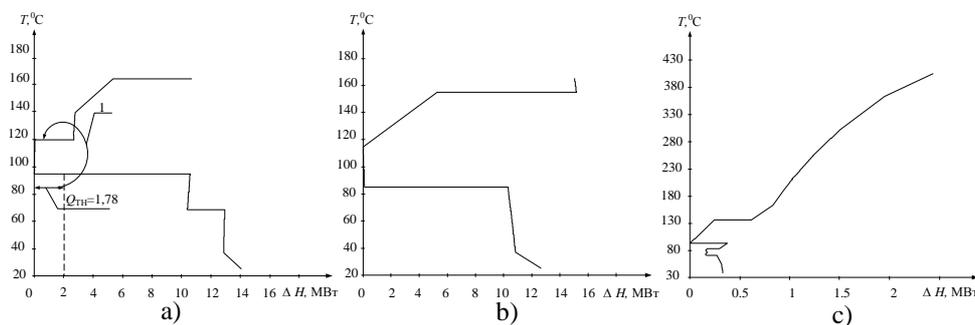


Рисунок 6 – Большие составные кривые; а) большая составная кривая для (рис. 3); б) большая составная кривая для (рис. 4); с) большая составная кривая для (рис. 5); *I* – показывает возможность интеграции теплового насоса

Общий температурный профиль (рис. 7) позволяет рассмотреть возможность интеграции теплового насоса в пределах общего производственного комплекса. С помощью программы «Aspen Hysys» [20] рассчитаны нагрузки теплового насоса. Расчеты показали, что для достижения целевых значений мощность компрессора должна быть увеличена на 54 кВт; $Q_{\text{ТН}}$ для процесса интеграции теплового насоса в пределах общего производственного комплекса составит – 314 кВт (рис. 8). Общий коэффициент преобразования теплового насоса ($\epsilon_{\text{общ}}$) рассчитывается по формуле (2) и составляет 3,77.

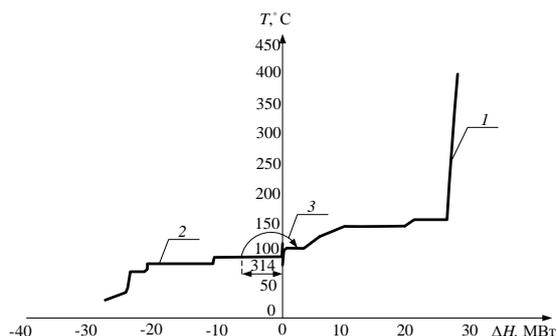


Рисунок 7 – Общий профиль комплекса; *I* – сток; 2 – источник; 3 – показывает возможность интеграции теплового насоса

Простой срок окупаемости теплового насоса (*P*) рассчитывается по формуле (3) [22], как отношение капитальных затрат к годовой экономии от сокращения потребления внешних энергоносителей, и составляет 0,64 года.

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

где $A_{\text{ТН}}$ – 20000 долл. США; K – 86000 долл. США; Q_{hot} – 2847,5 кВт; S_{hot} – 172 долл. США за 1 кВт год; Q_{cold} – 2093,5 кВт; S_{cold} – 24,5 долл. США за 1 кВт год; W – 754 кВт; S_{elec} – 500 долл. США за 1 кВт год (0,81 грн. за 1 кВт/ч). Стоимость компрессора теплового насоса взята из работ, которые публиковались ранее [19].

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

Выводы. Применение методов пинч-анализа в интеграции процессов переработки продуктов коксования позволило уменьшить потребление горячих и холодных утилит на величину – 18,8 % и 19,4 % соответственно, при этом увеличилась мощность рекуперации теплоты на 37,4 %.

Интеграция теплового насоса с использованием инструмента большой составной кривой (БСК) дополнительно позволила сократить потребление горячих и холодных утилит от исходного значения на 25,94 % и 24,73 %.

Использование «Total Site Profiles» показало возможность интеграции теплового насоса в пределах общего производственного комплекса, установка которого позволяет сократить потребление горячих утилит на 1,05 %, холодных утилит на 0,93 %.

Площадь поверхности рекуперации с учетом установленных тепловых насосов увеличилась на 53,78 %.

Годовая прибыль от внедрения проекта составит 1024906 дол. США, срок окупаемости 0,6 года (218 дней).

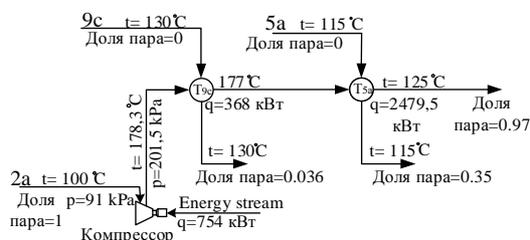


Рисунок 8 – Схема подключения теплового насоса

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

Энергетическая характеристика процессов	Мощность горячих утилит, МВт	Мощность холодных утилит, МВт	Мощность рекуперации теплоты, МВт
Существующая система теплообмена	34,782	33,5091	17,44
предлагаемая система теплообмена без тепловых насосов	28,2389	26,9993	23,97
предлагаемая система теплообмена с тепловыми насосами	25,3914	24,906	26,82
% от существующего значения без тепловых насосов	81,2	80,6	137,44
% от существующего значения с тепловыми насосами	73	74,3	153,78

Литература

1. Ukraine policy review. [электронный ресурс] // International Energy Agency. Режим доступа: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ukraine2006.pdf>. accessed 13.09.2014.
2. Лейбович Р.Е. Технология коксохимического производства / Р.Е. Лейбович, Е.И. Яковлева, А.Б. Филатов – Москва: Металлургия, 1982. – 360 с.
3. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Екстракція даних смолопереробного цеху та двох бензолних відділень зі спільним сировинним потоком / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, П.О. КАПУСТЕНКО, Л.М. УЛЬЄВ, С.О. БОЛДИРЕВ, М.А. ВАСИЛЬЄВ // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 2. – С. 85–91.
4. Основы интеграции тепловых процессов / [Смит Р., Клемеш Й., ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А., УЛЬЄВ Л.М.]. – Харків: НТУ «ХПІ», 2000. – 458 с.
5. 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.
6. Ульєв Л.М. Пінч-інтеграція теплових насосів в процес очищення тетрахлориду титана / Л.М. Ульєв, В.В. Сивак // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 2. – С. 35–44.
7. Клемеш Й. Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки / Й. Клемеш, Ю.Т. Костенко, Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, П.А. КАПУСТЕНКО, Л.М. УЛЬЄВ, А.Ю. ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО, Б.Д. ЗУЛИН // Теорет. основы хим. технологии. – 1999. – Т. 33. – №4. – С. 420–431.
8. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л. Інтеграція теплових процесів на установці первинної переробки нафти АВТ А12/2 при роботі в зимнє время / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, П.А. КАПУСТЕНКО, Л.М. УЛЬЄВ, С.А. БОЛДИ-

рев, О.П. Арсеньева, М.В. Тарновский // Теорет. основы хим. технологии. – 2009. – Т. 43.– №6. – С. 665–677.

9. 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 «ХПИ», 2013. – № 2. – С. 95–101.

10. Кресс Л.А. Реконструкция бензольного отделения коксохимического производства / Л.А. Кресс, С.В. Крякунов // Кокс и химия. – М.: 2005. – № 10. – С. 19–22.

11. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Определение потенциала энергосбережения процесса дистилляции каменноугольной смолы и процесса переработки нафталиновой фракции на авдеевском КХЗ. / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев, С.А. Болдырев, С.И. Бухкало, С.И. Кауфман // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2003. – № 2. – С. 23–30.

12. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Создание оптимальной теплообменной системы в процессе дистилляции каменноугольной смолы / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев, С.А. Болдырев // Интегрированные технологии и энергосбережение. 2004. № 2. С. 85–90.

13. Tovazhnyansky L. Heat integration improvement for benzene hydrocarbons extraction from coke-oven gas. / L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, L. Ulyev // Chem. Eng. Trans.– 2011. –V. 25.– P. 153–158.

14. Ульев Л.М. Программное обеспечение для проектирования теплообменных сетей – HINT / Л.М. Ульев, О.А. Яценко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 10. – С. 61–72.

15. «Укррудпром» [электронный ресурс]: http://www.ukrudprom.ua/news/Gorlovskiy_KHZ_zapustil_ustanovku_po_utilizatsii_koksovih_gazov.html. accessed: 14.09.2014.

16. Hesselgreaves JE. Compact heat exchangers. Selection, design and operation. Amsterdam: Elsevier. – 2001. – 398 p.

17. Anton A. Kiss. Towards energy efficient distillation technologies – Making the right choice / A. Kiss Anton, J. Flores Landaeta Servando, A. Infante Ferreira Carlos // Energy. –2012. – V. 47. – P. 531–542.

18. Eduardo Dnez. Economic feasibility of heat pumps in distillation to reduce energy use / Dnez Eduardo, Langston Paul, Ovejero Gabriel, Romero M. Dolores // Applied Thermal Engineering. – 2009. – V. 29. – P. 1216–1223.

19. Горшков В.Г. Тепловые насосы. Аналитический Обзор // Справочник промышленного оборудования. – 2004. – № 2. – 80 с.

20. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Теплова інтеграція процесу очищення коксового газу від бензольних вуглеводнів за допомогою програм «Hint» та «Aspen Hysys» / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.О. Капустенко, Л.М. Ульев, С.О. Болдырев, М.А. Васильев // Интегрированные технологии и энергосбережение. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – № 2. – С. 1–7.

21. Gorsek A., Glavic P., Bogataj M. Design of the optimal total site heat recovery system using SSSP approach / A. Gorsek, P. Glavic, M. Bogataj // Chem. Eng. Process. – 2006. – V. 45. – P. 372–382.

Bibliography (transliterated)

1. Ukraine policy review. [elektronnyiy resurs]. International Energy Agency. Rezhim dostupa: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ukraine2006.pdf>. accessed 13.09.2014.

2. Leybovich P.E. Tehnologiya koksohimicheskogo proizvodstva. P.E. Leybovich, E.I. Yakovleva, A.B. Filatov – Moskva: Metallurgiya, 1982. – 360 p.

3. Tovazhnyanskiy L.L. Ekstraktsiya danih smolopererobnogo tsehu ta dvoh benzolnih viddilen zi spilnim sirovinnim potokom. L.L. Tovazhnyanskiy, P.O. Kapustenko, L.M. Ulev, S.O. Boldirev, M.A. Vasilev. Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie. – Harkov: NTU «HPI», 2013. – # 2. – P. 85–91.

4. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov. [Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Ulev L.M.]. – Harkov: NTU «HPI», 2000. – 458 p.

5. Tovazhnyansky L. Process integration of sodium hypophosphate production. L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, L. Ulyev, S. Boldyryev, O. Arsenyeva. Applied Thermal Engineering. – 2010. – V. 30, Issue 16. – P. 2306–2314.

6. Ulev L.M. Pinch-integratsiya teplovyih nasosov v protsess ochistki tetrahlorida titana. L.M. Ulev, V.V. Sivak. Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie. – Harkov: NTU «HPI», 2013. – # 2.– P. 35–44.

7. Klemesh Y. Primenenie metoda pinch-analiza dlya proektirovaniya energosberegayuschih ustanovok neftepererabotki. Y. Klemesh, Yu.T. Kostenko, L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, L.M. Ulev, A.Yu. Perevertaylenko, B.D. Zulin. Teoret. osnovyi him. tehnologii. – 1999. – Т. 33. – #4. – P. 420–431.

8. Tovazhnyanskiy L.L. Integratsiya teplovyih protsessov na ustanovke pervichnoy pererabotki nefiti AVT A12/2 pri rabote v zimnee vremya. L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, L.M. Ulev, S.A. Boldyryev, O.P. Arsenyeva, M.V. Tarnovskiy. Teoret. osnovyi him. tehnologii. – 2009. – Т. 43.– #6. – P. 665–677.

9. Ulev L.M. Pinch-rekonstruktsiya seksiy gidroochistki i kataliticheskogo riforminga na ustanovke L-35-11/600. L.M. Ulev, D.D Nechiporenko. *Integririvannyie tehnologii i energosberezhenie*. – Harkov: NTU «HPI», 2013. – # 2. – P. 95–101.
10. Kress L.A. Rekonstruktsiya benzolnogo otdeleniya koksohimicheskogo proizvodstva. L.A. Kress, S.V Kryakunov. *Koks i himiya*. – M.: 2005. – # 10. – P. 19–22.
11. Tovazhnyanskiy L.L. Opredelenie potentsiala energosberezheniya protsessa distillyatsii kamennougolnoy smolyi i protsessa pererabotki naftalinovoy fraktsii na avdeevskom KHZ. L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, L.M. Ulev, S.A. Boldyirev, S.I. Buhkalo, S.I. Kaufman. *Integririvannyie tehnologii i energosberezhenie*. – 2003. – # 2. – P. 23–30.
12. Tovazhnyanskiy L.L. Sozdanie optimalnoy teploobmennoy sistemyi v protsesse distillyatsii kamennougolnoy smolyi. L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, L.M. Ulev, S.A. Boldyirev. *Integririvannyie tehnologii i energosberezhenie*. 2004. # 2. P. 85–90.
13. Tovazhnyanskiy L. Heat integration improvement for benzene hydrocarbons extraction from coke-oven gas. L. Tovazhnyanskiy, P. Kapustenko, L. Ulyev. *Chem. Eng. Trans.* – 2011. – V. 25. – P. 153–158.
14. Ulev L.M. Programmnoe obespechenie dlya proektirovaniya teploobmennyyih setey – HINT. L.M. Ulev, O.A. Yatsenko. *Vestnik NTU «HPI»*. – 2012. – # 10. – P. 61–72.
15. «Ukrudprom» [elektronnyiy resurs]: http://www.ukrudprom.ua/news/Gorlovskiy_KHZ_zapustil_ustanovku_po_utilizatsii_koksovih_gazov.html. accessed: 14.09.2014.
16. Hesselgreaves JE. Compact heat exchangers. Selection, design and operation. Amsterdam: Elsevier. – 2001. – 398 p.
17. Anton A. Kiss. Towards energy efficient distillation technologies – Making the right choice. A. Kiss Anton, J. Flores Landaeta Servando, A. Infante Ferreira Carlos. *Energy*. – 2012. – V. 47. – P. 531–542.
18. Eduardo Dnez. Economic feasibility of heat pumps in distillation to reduce energy use. Dnez Eduardo, Langston Paul, Ovejero Gabriel, Romero M. Dolores. *Applied Thermal Engineering*. – 2009. – V. 29. – P. 1216–1223.
19. Gorshkov V.G. Teplovyie nasosyi. Analiticheskiy Obzor. Spravochnik promyshlennogo oborudovaniya. – 2004. – # 2. – 80 p.
20. Tovazhnyanskiy L.L. Teplova Integratsiya protsesu ochischennya koksovogo gazu vid benzolnih vuglevodniv za dopomogoyu program «Hint» ta «Aspen Hysys». L.L. Tovazhnyanskiy, P.O. Kapustenko, L.M. UIEv, S.O. Boldyirev, M.A. Vasilev. *Integririvannyie tehnologii i energosberezhenie*. – Harkov: NTU «HPI», 2012. – # 2. – P. 1–7.
21. Gorsek A., Glavic P., Bogataj M. Design of the optimal total site heat recovery system using SSSP approach. A. Gorsek, P. Glavic, M. Bogataj. *Chem. Eng. Process.* – 2006. – V. 45. – P. 372–382.

УДК 66.045.1

Ульєв Л.М., Васильєв М.А.

ПИНЧ-ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ПРОДУКТІВ КОКСУВАННЯ НА КОКСОХІМІЧНОМУ ЗАВОДІ

Процес дистиляції бензолу і процес перегонки кам'яновугільної смоли, які є типовими для країн східної Європи, аналізується в даній роботі. Метод пинч-аналізу було обрано для виконання проекту реконструкції. Відповідно до принципів пинч-аналізу, розроблено нові схеми теплообмінних мереж і розраховане теплообмінне обладнання. Застосування комплексного методу для інтеграції декількох цехів підприємства «Total Site» показало можливість інтеграції теплового насосу. У статті показано шляхи зменшення споживання зовнішніх енергоносіїв на коксохімічному заводі, а також запропоновано шляхи покрової модернізації заводу.

Ulyev L., Vasilyev M.

PINCH-INTEGRATION FOR COKE OVEN PLANT

The process of benzene distillation and process of coal tar distillation being typical for East European countries is analyzed in this paper. The pinch analysis method was selected to perform a reconstruction project. According to principles of pinch analysis, new network diagrams are designed and capacity of heat-exchange equipment is calculated. The using of «Total Site Profiles» showed the feasibility of heat pump integration.

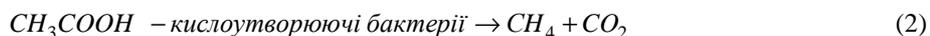
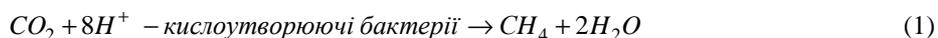
УДК 66.045.01

Перевертайленко О.Ю., Товажнянський Л.Л., Ніколаїдіс Г.Н., Капустенко П.О., Арсеньєва О.П.

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ КОРОТКОЦИКЛОВОЇ АДСОРБЦІЇ ІЗ ЗМІННИМ ТИСКОМ У ВИРОБНИЦТВІ БІОМЕТАНУ

Вступ. Важливою умовою енергетичної безпеки України є максимальне зменшення залежності від імпорту енергоносіїв. На сьогоднішній день альтернативні джерела енергії поширюють свої позиції у енергобалансі країн світу. Згідно даних Міжнародного енергетичного агентства ІЕА, у 2010 році 13,1 % первинної енергії у світі було вироблено з відновлювальних джерел, більшу частину яких склала біомаса – 9,9 % первинної енергії [1]. Важливою складовою використання біомаси є виробництво та використання біогазу – суміші метану та двоокису вуглецю. Загальне виробництво біогазу у Європейській Спільноті (формат ЄС-25) у 2010 році склало 10,9 мільйонів тон палива у нафтовому еквіваленті. Біогаз використовується як енергоносіє для виробництва теплової та електричної енергії, а також як сировина для виробництва біометану, що є еквівалентом природного газу. У 2011 році у ЄС 56,7 % біо-газу було вироблено на біогазових установках, що використовують як сировину відходи агропромислового комплексу і спеціально вирощену рослинну сировину, 31,3 % отримано на полігонах твердих побутових відходів, 12 % – на станціях очистки стічних вод [1,2]. Потенційний обсяг базового ринку біогазу в Україні може бути освоєний до 2030 року, у цілому його можна оцінити як перспективний. Паралельно з виробництвом електричної та теплової енергії доцільно виробляти біометан для прямого заміщення природного газу [2].

Викладення основного матеріалу. З біомаси біогаз отримують в результаті її анаеробного бродіння (далі – анаеробного процесу). Перша стадія анаеробного процесу, як правило, включає конверсію складних органічних сполук у простіші органічні сполуки, а потім – у органічні кислоти, більшою частиною, у оцтову, за допомогою кислотоутворюючих бактерій. Ідентифіковано два основних механізми утворення метану з продуктів анаеробного бродіння [3]:



Суміш утворених метану та двоокису вуглецю є біогазом, який також містить сірководень, аміак та інші домішки. Для отримання метану відповідної якості, який можна закачувати у газові мережі, треба очистити біогаз від домішок, насамперед від сірководню, а потім відділити двоокис вуглецю.

Отримання біометану з біомаси за допомогою анаеробного процесу можна представити за допомогою функціональної схеми, що приведена на рис.1.

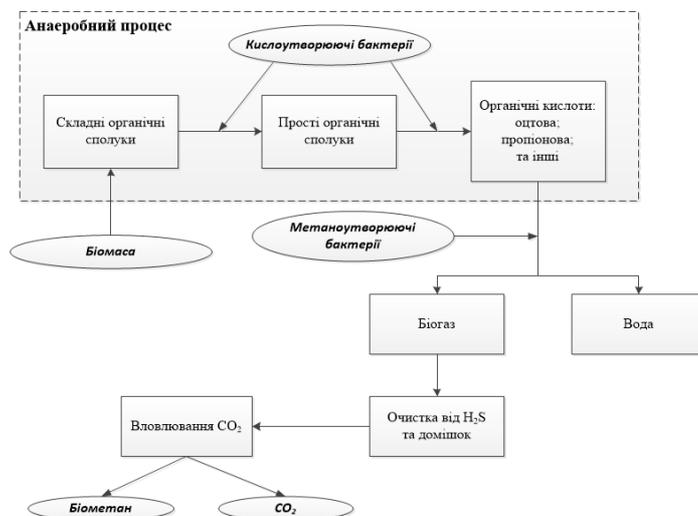


Рисунок 1 – Принципова функціональна схема отримання біометану з біомаси

Таким чином, за допомогою анаеробного процесу з біомаси можна отримати два товарних продукти – метан як паливо, та двоокис вуглецю як сировину для вироблення зварювального газу, рідкої вуглекислоти та сухого льоду, а також як сировину для харчової промисловості та для вироблення іншої продукції.

Основною сировиною біогазу, отриманого за допомогою анаеробного процесу, з якого виробляють біометан у Європі є енергетичні рослини, гній крупної рогатої худоби, свиней та пташиний послід. У склад такого біогазу входить метан (60–75 %), двоокис вуглецю (20–40 %), сірководень (1–3 %), сілксани, аміак тощо.

За даними аналітичного огляду, наведеними у [4], технологія коротко циклової адсорбції із змінним тиском (КАЗТ) для виробництва біометану посідає третє місце за поширеністю у Європі: біля 40 установок. Відзначено, що технологія КАЗТ у середньому у 1,8–2 рази менш енергоємна, ніж абсорбційні технології. Максимальна пропускна спроможність існуючих установок КАЗТ складає 2000 Нм³/годину по біогазу.

Адсорбція є результатом сильної молекулярної взаємодії між газовим потоком та поверхнею твердих матеріалів з великою поверхнею контакту. Такими матеріалами є активоване вугілля, цеоліти (природні або штучні), а також металоорганічні координаційні сполуки, наприклад, матеріали, імпрегновані амінами. Газ подається на шар адсорбенту, CO₂ адсорбується, а решта проходить крізь шар адсорбенту. Адсорбент, насичений двоокисом вуглецю, піддають регенерації з видаленням останнього із адсорберу.

Під час КАЗТ газова суміш проходить крізь шар або низку шарів адсорбенту під підвищеним тиском (0,1–2,0 МПа) та невисокої температурі (25–75 °С) [5] до досягнення потрібної рівноваги за потрібним компонентом у шарі адсорбенту на виході з адсорбера, після чого адсорбент регенерують, знижуючи тиск здебільшого до вакууму. Після регенерації адсорбент є готовим до нового циклу.

Порівняльно з процесами коротко циклової адсорбції, що базується на зміні температур (КАЗТр) КАЗТ є кращим, оскільки КАЗТр потребує великих енерговитрат на підігрів газових потоків. Тому у процесах отримання біометану із біогазу з процесів короткоциклової адсорбції застосовується КАЗТ.

Основними позитивними рисами, притаманими КАЗТ, є нижчі капітальні витрати, нижче споживання теплової енергії, відсутність проблеми корозії, компактність установок та порівняльна простота їх експлуатації [6]. Але, аналізуючи матеріали, що приведені, наприклад, у [4,6,7], для адсорбційних процесів вловлювання CO₂, включаючи КАЗТ, як і для абсорбційних процесів, регенерація є лімітуючою стадією.

Зараз поширені процеси КАЗТ з використанням у якості адсорбентів цеолітів, активованого вугілля, сполук, імпрегнованих амінами, гідроталькітів (Mg₆Al₂CO₃(OH)₁₆·4H₂O). Процес із використанням цеолітів дає високу чистоту отриманого двоокису вуглецю, але потребує глибшого вакууму, ніж інші адсорбенти, що приводить до значних витрат енергії на створення вакууму. Для регенерації аміноімпрегнованих адсорбентів потрібно підвищити температуру регенерації десь до 110–115 °С. Для регенерації гідроталькітів наряду із зниженням тиску потрібен підігрів до температур, вищих за 170 °С.

Тому для інтенсифікації процесу КАЗТ потрібні дослідження, спрямовані на зниження різниці тисків процесів адсорбції-регенерації, а також пошук простих та ефективних методів підвищення температури у процесі регенерації адсорбенту.

Технології із використанням надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання на сьогоднішній день наводять все більше імплементацій у процесах та виробництвах різних галузей різних секторів економіки. Зокрема, нагрів із застосуванням НВЧ-поля на відміну від інших фізичних методів нагріву – кондуктивного та конвективного – передбачає об'ємність тепловиділення у діелектричному середовищі, що підігрівається. Коректний вибір параметрів НВЧ-поля дозволяє досягти рівномірності розподілу температур усередині матеріалу, що нагрівається. Це дозволяє уникнути теплових втрат і пов'язаного з цим надлишкового споживання теплової енергії. Серед інших переваг НВЧ-підігріву можна визначити його безконтактну природу, а також високу швидкість розігріву [8]. Як показали результати експериментальних випробувань, виконаних у Еймському дослідницькому центрі NASA [9], дія НВЧ-поля частотою 2,45 ГГц на такі адсорбенти, як активоване вугілля та цеоліт 13X дозволила суттєво пришвидшити процес десорбції двоокису вуглецю, слідів органічних сполук та вологи. Показано також, що варіація частоти дозволяє розширити коло адсорбентів, з якими можна працювати НВЧ-полем для пришвидшення десорбції. У роботі [10] наведено результати дослідження застосування НВЧ-випромінювання на коротко цикловий процес десорбції вловленого NO_x з поверхні адсорбенту. Показано, що дія НВЧ-поля пришвидшує процес десорбції майже у п'ять разів. У технічному рішенні згідно [11] представлено застосування НВЧ-випромінювання у процесі десорбції вуглеводнів з поверхні адсорбенту шляхом підігріву останнього.

Таким чином, застосування НВЧ-поля може бути позитивним фактором, що інтенсифікує процес десорбції в установках КАЗТ. Але дуже мала чисельність публікацій вказує на те, що проблема знаходиться тільки у початковій стадії систематичних наукових досліджень. Систематизація полягає у формуванні конкретних шляхів досліджень, а саме:

- визначення реципієнту НВЧ-випромінювання у процесі десорбції;
- дослідження діелектричних властивостей адсорбентів, що застосовуються або можуть застосовуватися у процесі вловлювання діоксиду вуглецю у виробництві біометану з біогазу за допомогою процесу КАЗТ;
- дослідження витрат електроенергії для нагріву різних адсорбентів;
- дослідження ефекту впливу НВЧ-випромінювання на різницю тисків процесів адсорбції-десорбції для КАЗТ
- техніко-економічні дослідження.

Висновки. Проведено аналіз наявних технологій отримання біометану із біогазу шляхом короткоциклової адсорбції із змінним тиском. Виявлені позитивні аспекти застосування надвисокочастотного випромінювання у процесі регенерації адсорбенту. Сформульовані перспективні напрями майбутніх досліджень.

Подяка. Роботу виконано за підтримкою Європейської Комісії, проект DISKNET PIRSES-GA-2011-294933.

Література

1. Renewables Information. IEA 2010; Europe in figures – Eurostat Yearbook 2010 – Access page: www.iea.org/stats.
2. Гелетуха Г.Г. Перспективи виробництва і використання біогазу в Україні / Гелетуха Г.Г., Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б. // Аналітична записка БАУ №4, 31 травня 2013 р. - Біоенергетична Асоціація України, 2013. – 22 с.
3. Biosolids treatment process: in Handbook of Environment Engineering, Volume 6 / Ed. By L.K. Wang, N.K. Shammam, Yung-Tse Hung. - Humana Press, 2007. - 831 pp.
4. Niesner J. Biogas Upgrading Technologies: State of Art Review in European Region / J. Niesner, D. Jecha, P. Stehlik // Chemical Engineering Transactions. - 2013. – Vol.35. - p. 517–522.
5. Поглощение CO₂: традиционные подходы и современные методы, основанные на использовании ионных жидкостей / Е.И. Привалова, П. Мяки-Арвела, Д.Ю. Мурзин, Ю.-П. Никкола // Успехи химии. – 2012. – Т.81, №5. - с. 435–457.
6. Advances in Natural Gas Technology / Ed. by Hamid Al-Megren. - Intech Open Science, 2012. - 542 pp.
7. Siriwardane R.V. Adsorption of CO₂, N₂ and O₂ on Natural Zeolites / R.V. Siriwardane, Ming Shing Shen, E.P. Fisher // Energy and Fuels. - 2003. - Vol.17. - p. 571–576.
8. Диденко А.Н. СВЧ-енергетика. Теория и практика. – Москва: «Наука», 2003. - 446 с.
9. Atwater J.E. Microwave-Powered Thermal Regeneration of Sorbents for CO₂, Water Vapor and Trace Organic Contaminants / J.E. Atwater, B. Luna et al. // 27th International Conference on Environmental Systems: Lake Tahoe, Nevada, July 14–17, 1997. SAE Technical Paper Series 972430. - p. 1–11.
10. Hyun-Seog Roh. Abatement of NO_x through the Absorption-Desorption Cycle Assisted by Microwave Irradiation / Hyun-Seog Roh et al // Journal Ind. Eng. Chem. -2001. – Vol.7, No.5. - p. 326–331.
11. Универсальный револьверный реактор-адсорбер для углеводородов с теплоподводом на основе СВЧ излучения. / Бахонин А.В. и др. // Патент РФ № 2 500 466 С1, МПК В 01 J 19/ 00, заявл.05.07.2012, опубл. 10.12.2013 бюлл. №34.

Bibliography (transliterated)

1. Renewables Information. IEA 2010; Europe in figures – Eurostat Yearbook 2010 – Access page: www.iea.org/stats.
2. Geletuha G.G. Perspektivi virobnitstva i vikoristannya biogazu v Ukrayini. Geletuha G.G., Kucheruk P.P., Matveev Yu.B. Analitichna zapiska BAU #4, 31 travnya 2013 r. Bioenergetichna Asotsiatsiya Ukrayini, 2013. – 22 p.

3. Biosolids treatment process: in Handbook of Environment Engineering, Volume 6. Ed. By L.K. Wang, N.K. Shamma, Yung-Tse Hung. Humana Press, 2007. 831 pp.
4. Niesner J. Biogas Upgrading Technologies: State of Art Review in European Region. J. Niesner, D. Jecha, P. Stehlik. Chemical Engineering Transactions. 2013. – Vol. 35. p. 517–522.
5. Pogloschenie SO₂: traditsionnyie podhodyi i sovremennyye metody, osnovannyye na ispolzovanii ionnyih zhidkostey. E.I. Privalova, P. Myaki-Arvela, D.Yu. Murzin, Yu.-P. Nikkola. Uspehi himii. – 2012. – T.81, #5. p. 435–457.
6. Advances in Natural Gas Technology. Ed. by Hamid Al-Megren. Intech Open Science, 2012. 542 pp.
7. Siriwardane R.V. Adsorption of CO₂, N₂ and O₂ on Natural Zeolites. R.V.Siriwardane, Ming Shing Shen, E.P. Fisher. Energy and Fuels. 2003. Vol.17. p. 571–576.
8. Didenko A.N. SVCh-energetika. Teoriya i praktika. – Moskva: «Nauka», 2003. 446 p.
9. Atwater J.E. Microwave-Powered Thermal Regeneration of Sorbents for CO₂, Water Vapor and Trace Organic Contaminants. J.E. Atwater, B. Luna et al. 27th International Conference on Environmental Systems: Lake Tahoe, Nevada, July 14–17, 1997. SAE Technical Paper Series 972430. p. 1–11.
10. Hyun-Seog Roh. Abatement of NO_x through the Absorption-Desorption Cycle Assisted by Microwave Irradiation. Hyun-Seog Roh et al. Journal Ind. Eng. Chem. 2001. – Vol.7, No.5. p. 326–331.
11. Universalnyiy revolvernyiy reaktor-adsorber dlya uglevodorodov s teplopodvodom na osnove SVCh izlucheniya. Bahonin A.V. i dr. Patent RF # 2 500 466 S1, MPK B 01 J 19/ 00, zayavl.05.07.2012, opubl. 10.12.2013 byull. #34.

УДК 66.045.01

Перевертайленко А.Ю., Товажнянский Л.Л., Николаидис Г.Н., Капустенко П.А., Арсеньева О.П.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА КОРОТКОЦИКЛОВОЙ АДСОРБЦИИ С ПЕРЕМЕННЫМ ДАВЛЕНИЕМ В ПРОИЗВОДСТВЕ БИОМЕТАНА

Проведен анализ доступных технологий производства биометана из биогаза путем применения короткоциклового адсорбции с переменным давлением. Выявлены позитивные аспекты сверхвысокочастотного излучения в процессе регенерации адсорбента. Сформулированы перспективные направления будущих научных исследований.

Perevertaylenko O.Yu., Tovazhnyansky L.L., Nikolaidis G.N., Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P.

PROBLEMS AND PERSPECTIVES OF PRESSURE SWING ADSORPTION ENHANCEMENT FOR BIOMETHANE PRODUCTION

The analysis of available technologies of biomethane production from biogas with pressure swing adsorption was carried out. The positive aspects of use the microwave irradiation during regeneration stage were found. The promising ways for future researches were formulated.

Ульєв Л.М., Нечипоренко Д.Д.

**ПИНЧ-ИНТЕГРАЦИЯ БЛОКОВ ГИДРООЧИСТКИ СЫРЬЯ И ДЕЭТАНИЗАЦИИ
И СТАБИЛИЗАЦИИ КАТАЛИЗАТА НА УСТАНОВКЕ Л-35-11/600****Актуальность и постановка задачи**

Украинский рынок нефтепродуктов продолжает развиваться, однако его развитие сдерживают низкая глубина переработки на НПЗ страны, непродуманная фискальная политика и размытое законодательство в области альтернативных топлив [1]. Повышение эффективности использования теплообменного оборудования на действующих нефтеперерабатывающих заводах является важным энергосберегающим мероприятием.

Украинским нефтеперерабатывающим заводам необходима модернизация. Снижение удельного энергопотребления можно достичь путем модернизации отдельных систем производства, установок и заводов в целом, а также совершенствованием отдельных производственных операций.

Применение пинч-метода позволяет добиться существенной финансовой экономии за счет минимизации использования внешних энергоносителей, путем максимизации рекуперации теплоты в рамках рассматриваемой энерготехнологической системы [2].

В представленной работе проведено обследование блоков гидроочистки сырья и деэтанализации и стабилизации катализата установки каталитического риформинга Л-35-11/600. Для данных блоков установки была проведена пинч-диагностика и выполнен сравнительный экономический анализ эффективности их работы после предложенной реконструкции.

Описание технологического процесса

Установка каталитического риформинга Л-35-11/600 предназначена для переработки широкой фракции прямогонного бензина (при температуре 85–180 °С) с целью получения компонентов бензина с октановым числом по моторному методу 78–85 пунктов.

Данная установка состоит из трёх основных отделений:

- блока гидроочистки сырья;
- блока каталитического риформинга;
- блока деэтанализации и стабилизации катализата;

Сырьё – прямогонный бензин поступает на блок гидроочистки сырья, где в реакторе Р-1 на алюмокобальтомолибденовом катализаторе в присутствии водорода происходит гидроочистка сырья и затем очищенное от сернистых соединений сырьё поступает на блок каталитического риформинга в реактор Р-2, в котором на платинорениевом катализаторе протекает реакция ароматизации сырья. Проектом предусмотрено проведение процесса каталитического риформинга в три ступени, для чего газосырьевая смесь последовательно поступает в реакторы Р-2,3,4/1,2 и после охлаждения поступает на блок деэтанализации и стабилизации катализата.

Для того чтобы выполнить пинч-проектирование установки целиком необходимо провести пинч-диагностику и выполнить пинч-проектирование для всех блоков установки [3].

В представленной работе проведено обследование блоков гидроочистки сырья и деэтанализации и стабилизации катализата установки каталитического риформинга Л-35-11/600. Технологическая схема данных блоков представлена на рисунке 1. Была проведена пинч-диагностика для данных блоков установки [4].

Анализ данной схемы показал значительный потенциал энергосбережения, содержащийся как в элементарных потерях тепловой энергии в окружающую среду, так и в нерациональной технологии теплообмена между технологическими потоками.

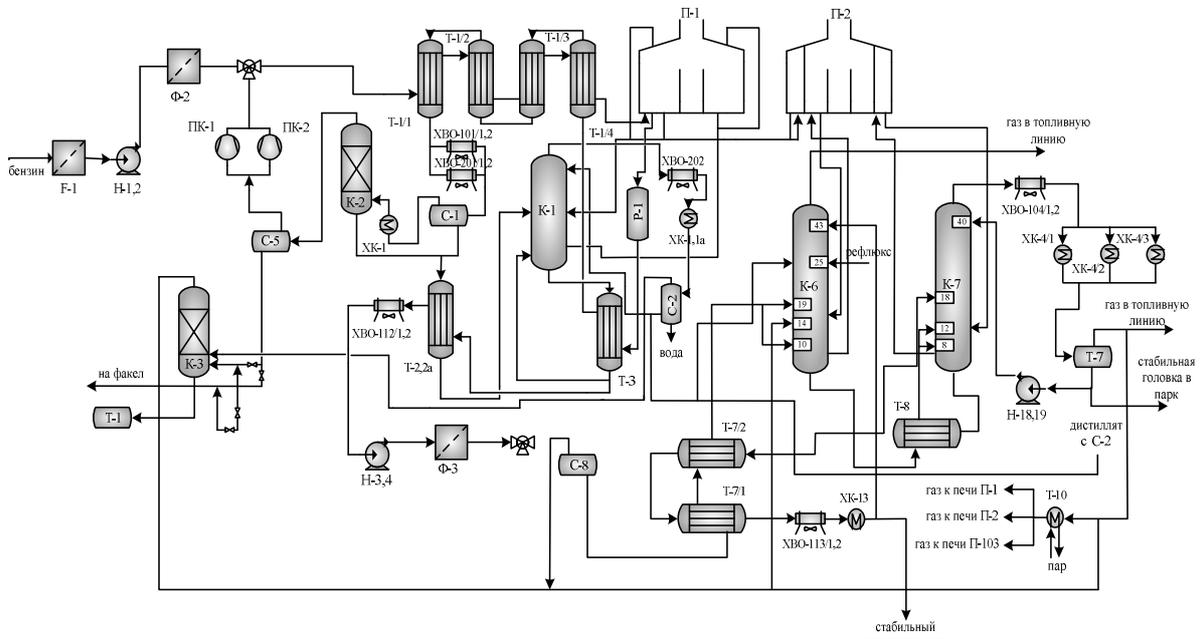
Экстракция технологических данных

Систематизировав результаты изучения технологической схемы, регламента, были получены технологические потоковые данные процесса гидроочистки сырья и деэтанализации и стабилизации катализата Л-35-11/600.

На основании этих данных была построена сеточная диаграмма (рис. 2), были определены теплообменные связи между технологическими потоками [5]. А также была посчитана мощность рекуперации теплоты, которая составила для блока гидроочистки 11,9 МВт, для блока деэтанализации и стабилизации катализата 2,5 МВт и для этих двух блоков совместно 15 МВт.

Используя полученные технологические потоковые данные процесса гидроочистки сырья и деэтанализации и стабилизации катализата, были построены составные кривые (рис. 3) для существующего процесса.

Для снижения энергопотребления в химико-технологической системе необходимо уменьшение минимальной разности температур ΔT_{\min} между теплоносителями в теплообменных аппаратах [6, 7]. Это достигается путем сближения составных кривых вдоль энтальпийной оси.



К-1 – отпарная колонна; К-2 – абсорбер очистки циркуляционного газа гидроочистки; К-3 – абсорбер очистки углеводородного газа; К-6 – фракционирующий абсорбер; К-7 – стабилизационная колонна; ПК – компрессоры; Н – насосы; Р – реакторы; П-1 – печь риформинга и гидроочистки; П-2 – печь стабилизации и газодифракционирования; С – сепараторы; Т – теплообменники; ХК – кожухотрубчатые конденсаторы; ХВО – холодильники воздушного охлаждения; Ф – фильтры

Рисунок 1 – Технологическая схема существующего процесса гидроочистки сырья и деэтанализации и стабилизации катализата Л-35-11/600

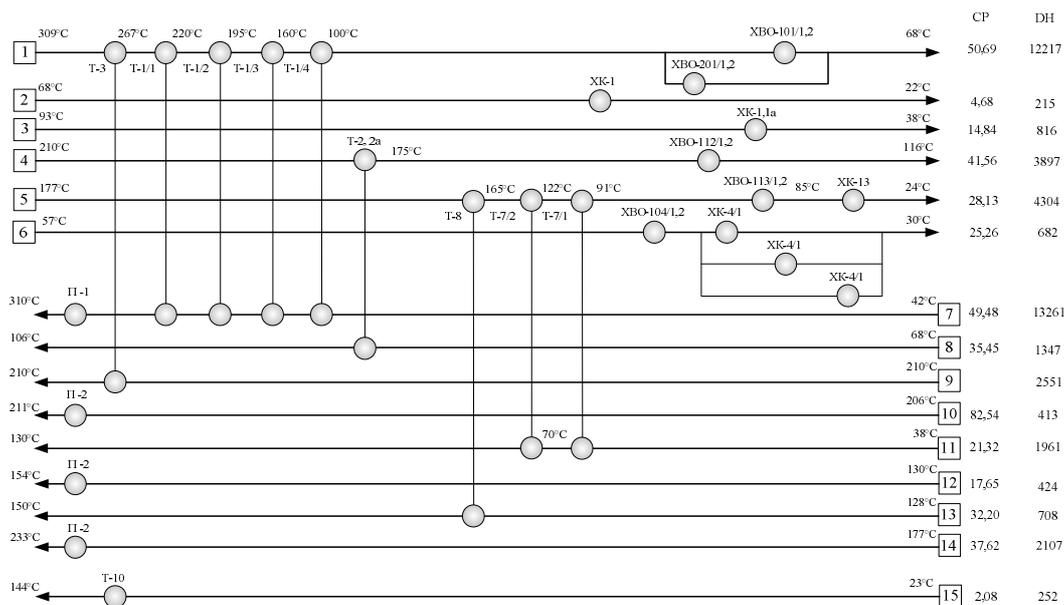


Рисунок 2 – Сеточная диаграмма процесса гидроочистки сырья и деэтанализации и стабилизации катализата

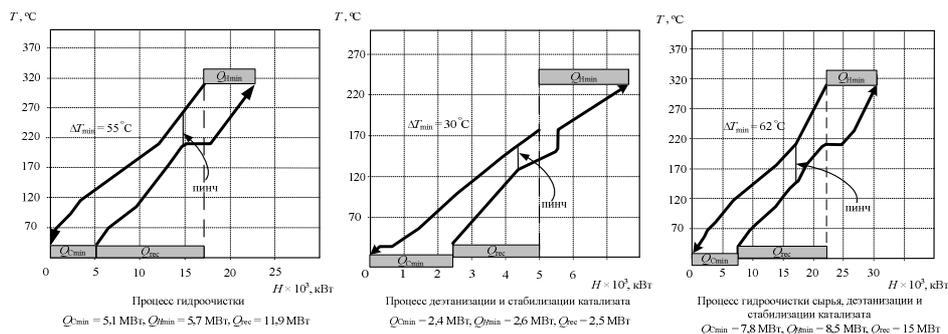


Рисунок 3 – Составные кривые существующего процесса гидроочистки сырья и деэтанзации и стабилизации катализата

Q_{Hmin} , Q_{Cmin} , Q_{rec} – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации

Теплоэнергетическая интеграция

Для того чтобы экономически оптимально интегрировать рассматриваемый процесс, необходимо определить наиболее экономически важные значения, которые существенно влияют на приведенную стоимость проекта [8].

Стоимость горячих утилит, использованных в процессе, примем равной 400 долл. США за 1 кВт год, с учетом того, что в году 8000 рабочих часов.

Стоимость холодных утилит принимаем 40 долл. США за 1 кВт год.

Используя цены на теплообменное оборудование, полученные от его производителей, можно еще до выполнения проекта реконструкции оценить необходимые капвложения и срок их окупаемости.

Итак, капитальную стоимость одного теплообменного аппарата можно определить выражением:

$$\text{Кап. стоимость} = A_T + B_T (S)^c, \tag{1}$$

где $A_T = 40000$ долл. США – стоимость установки одного теплообменного аппарата; B_T – коэффициент, эквивалентный стоимости 1 м² площади поверхности теплообмена, для кожухотрубчатых теплообменных аппаратов $B_T = 500$; S – площадь поверхности теплообмена теплообменного аппарата; c – коэффициент, отражающий нелинейную зависимость стоимости теплообменника от величины его поверхности теплообмена, $c = 0,87$.

Расчет дисконтированных величин стоимостей проекта позволяет определить значение минимальной разности температур между теплоносителями в будущей системе рекуперации тепловой энергии с учётом существующего теплообменного оборудования (рис. 4).

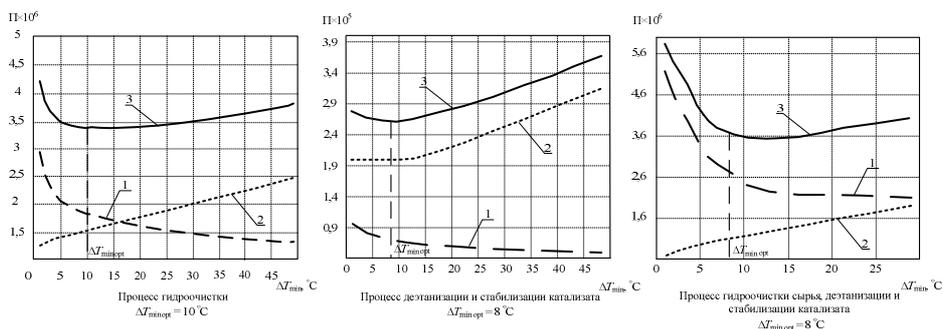


Рисунок 4 – Зависимость приведенной стоимости от ΔT_{min}
1 – инвестиции в оборудование; 2 – энергия; 3 – общая стоимость

Процесс гидроочистки сырья, выполненный с системой теплообмена при $\Delta T_{min} = 10$ °C будет работать в экономически оптимальном режиме. Для процесса деэтанзации и стабилизации катализата данное значение составит $\Delta T_{min} = 8$ °C. И для выполнения совместного проекта этих процессов значение $\Delta T_{min} = 8$ °C.

Полученные значения позволяют определить возможный потенциал энергосбережения данного проекта реконструкции [9, 10]. Для этого были построены новые составные кривые процессов гидроочистки сырья и деэтанзации и стабилизации катализата с соответствующей разницей температур (рис. 5).

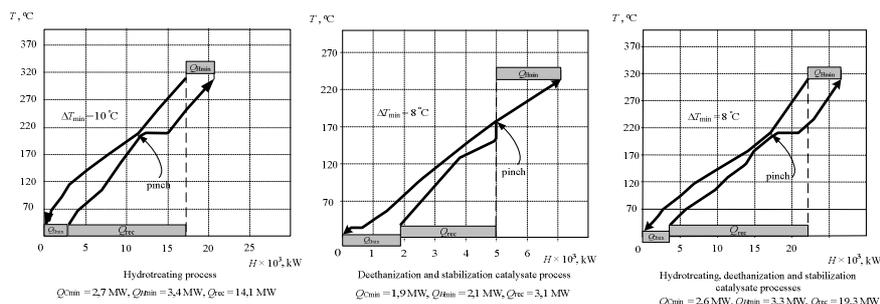


Рисунок 5 – Составные кривые интегрированного процесса гидроочистки сырья и деэтаннизации и стабилизации катализата

Q_{Hmin} , Q_{Cmin} , Q_{rec} – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации

В соответствии с принципами пинч-анализа [11] были построены новые сеточные диаграммы для процессов гидроочистки сырья и деэтаннизации и стабилизации катализата с учетом полученной разницы температур для данных процессов (рис. 6).

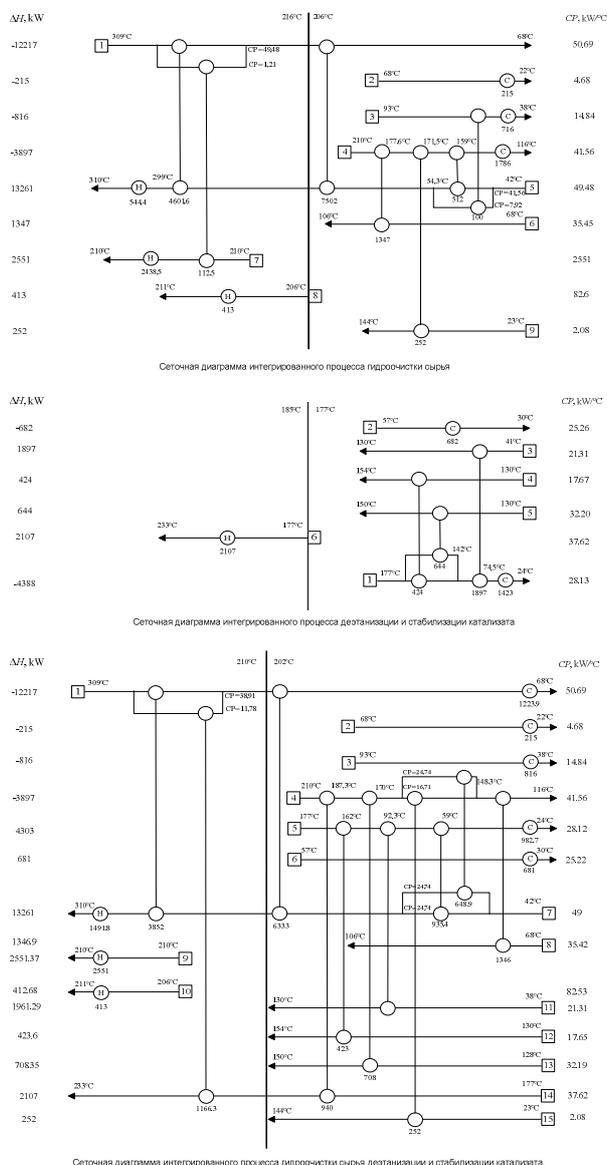


Рисунок 6 – Сеточная диаграмма интегрированного процесса гидроочистки сырья и деэтаннизации и стабилизации катализата

Как видно по данным рисункам, переход к совместной сеточной диаграмме процессов гидроочистки сырья и деэтанализации и стабилизации катализата просто путем соединения сеточных диаграмм данных процессов невозможен. Необходимо проводить модернизацию либо каждого блока данной установки в отдельности, либо совместно.

Заключение

В результате применения пинч-методов получена новая система теплообмена для процессов гидроочистки сырья и деэтанализации и стабилизации катализата на установке каталитического риформинга Л-35-11/600. Определены излишние энергозатраты в существующей схеме и проведена пинч-интеграция как для каждого блока в отдельности так и для совместного проекта реконструкции данных блоков.

Внедрение пинч-проектирования позволяет снизить энергопотребление для блока гидроочистки сырья на 2,2 МВт. Для блока деэтанализации и стабилизации катализата энергопотребление снижается на 0,6 МВт. Для совместной интеграции блоков гидроочистки сырья и деэтанализации и стабилизации катализата энергопотребление снижается на 4,3 МВт. Была проведена сравнительная характеристика интегрированных процессов, на основе которой был сделан вывод, что наиболее целесообразным является проведение реконструкции для двух данных блоков совместно, а не по отдельности.

Литература

1. Dossier of the Ukrainian energy <http://www.uaenergy.com.ua/>, 2014.
2. Linnhoff B. Townsend D.W., Boland D. et al., 1994, User guide on process integration of the efficient use of energy, Rugby, IChemE.
3. Jannelli E., Minutillo M., Perna A., 2013, Analyzing microcogeneration systems based on LT-PEMFC and HT-PEMFC by energy balances, Applied Energy 108, 82–91.
4. Smith R., Zhang N., Zhao J., 2012, Hydrogen integration in petroleum refining, Chemical Engineering Transactions part 2, 29, 1099–1105.
5. Ульев Л.М. Пинч-реконструкция секций гидроочистки и каталитического риформинга на установке Л-35-11/600 / Л.М. Ульев, Д.Д. Нечипоренко // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 2. – С. 95–101.
6. Kemp, Ian C. 2007, Pinch Analysis and Process Integration – A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy (2nd Edition).
7. Feng X., Pu J., Yang J., Hoong Chu K., 2011, Energy recovery in petrochemical complexes through heat integration retrofit analysis, Applied Energy 88, 1965–1982.
8. Ульев Л.М. Энергосберегающий потенциал процесса гидроочистки на установке каталитического риформинга / Л.М. Ульев, Д.Д. Нечипоренко // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – № 2. – С. 20–28.
9. Nordman R., 2005, New process integration methods for heat – saving retrofit projects in industrial systems, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
10. Ulyev L., Kapustenko P., Melnykovskaya L., 2013, The Precise Definition of the Payload Tube Furnaces for Units of Primary Oil Refining, Chemical Engineering Transactions Vol. 35, 247–250
11. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев – Харьков: ХПИУ, 2000. – 457 с.

Bibliography (transliterated)

1. Dossier of the Ukrainian energy <http://www.uaenergy.com.ua/>, 2014.
2. Linnhoff B. Townsend D.W., Boland D. et al., 1994, User guide on process integration of the efficient use of energy, Rugby, IChemE.
3. Jannelli E., Minutillo M., Perna A., 2013, Analyzing microcogeneration systems based on LT-PEMFC and HT-PEMFC by energy balances, Applied Energy 108, 82–91.
4. Smith R., Zhang N., Zhao J., 2012, Hydrogen integration in petroleum refining, Chemical Engineering Transactions part 2, 29, 1099–1105.
5. Ulev L.M. Pinch-rekonstruktsiya sektsiy gidroochistki i kataliticheskogo riforminga na ustanovke L-35-11/600. L.M. Ulev, D.D. Nechiporenko. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – # 2. – P. 95–101.
6. Kemp, Ian C. 2007, Pinch Analysis and Process Integration – A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy (2nd Edition).

7. Feng X., Pu J., Yang J., Hoong Chu K., 2011, Energy recovery in petrochemical complexes through heat integration retrofit analysis, *Applied Energy* 88, 1965–1982.

8. Ulev L.M. Energosberegayuschiy potentsial protsessa gidroochistki na ustanovke kataliticheskogo riforminga. L.M. Ulev, D.D. Nechiporenko. *Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya*. – Harkiv: NTU «HPI», 2011. – # 2. – P. 20–28.

9. Nordman R., 2005, New process integration methods for heat – saving retrofit projects in industrial systems, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.

10. Ulyev L., Kapustenko P., Melnykovskaya L., 2013, The Precise Definition of the Payload Tube Furnaces for Units of Primary Oil Refining, *Chemical Engineering Transactions* Vol. 35, 247–250.

11. Smit R. Osnovy integratsii teplovyih protsessov. R. Smit, Y. Klemesh, L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, L.M. Ulev – Harkov: HGPU, 2000. – 457 p.

УДК 658.26:665.63:338.45

Ульєв Л.М., Нечипоренко Д.Д.

ПІНЧ-ІНТЕГРАЦІЯ БЛОКІВ ГІДРООЧИЩЕННЯ СИРОВИНИ І ДЕЕТАНІЗАЦІЇ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ КАТАЛІЗАТУ НА УСТАНОВЦІ Л-35-11/600

В результаті застосування пінч-методів отримана нова система теплообміну для процесів гідроочищення сировини і деетанізації та стабілізації каталізатору на установці каталітичного riformingu Л-35-11/600. Визначено зайві енерговитрати в існуючій схемі і проведена пінч-інтеграція як для кожного блоку окремо так і для спільного проекту реконструкції даних блоків. Впровадження пінч-проекування дозволяє знизити енергоспоживання для блоку гідроочищення сировини на 2,2 МВт. Для блоку деетанізації та стабілізації каталізатору енергоспоживання знижується на 0,6 МВт. Для спільної інтеграції блоків гідроочищення сировини і деетанізації та стабілізації каталізатору енергоспоживання знижується на 4,3 МВт. Була проведена порівняльна характеристика інтегрованих процесів. На основі економічно обґрунтованих розрахунків було зроблено висновок, що найбільш доцільним є проведення реконструкції для двох даних блоків спільно, а не окремо.

Ulyev L.M., Nechiporenko D.D.

THE PINCH RECONSTRUCTION FOR SECTIONS HYDROTREATING, DEETHANIZATION AND STABILIZATION CATALYSATE OF THE CATALYTIC REFORMING UNIT

Pinch diagnostics for hydrotreating section and deethanization and stabilization catalysate section of catalytic reforming unit L-35-11/600 was carried out. Comparative economic analysis of their effectiveness after the proposed retrofit was performed for each section separately and for the total their flowsheet. The implementation of the pinch design allows to reduce power consumption for hydrotreating process by 2,2 MW, the payback period of the proposed project will be about 7 months. For the deethanization and stabilization catalysate section power consumption is reduced by 0,6 MW, the payback period of the proposed project will be about 10 months. Energy consumption for joint integration of hydrotreating section and deethanization and stabilization catalysate section reduced by 4,3 MW, the payback period of the proposed project will be about 8 months. Therefore, it was concluded that pinch design for these sections of catalytic reforming unit L-35-11/600 the most advisable to carry out for the two sections together.

УДК 66.045.1

Гарев А.О., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Арсеньева О.П., Клемеш Й, Кусаков С.К.,
Анохин П., Чучек Л.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ВТОРИЧНОГО ПАРА ОТДЕЛЕНИЯ СУШКИ ТАБАКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Введение

В настоящее время, когда стоимость энергии резко возросла и в Украине наблюдается ее недостаток, внедрение энергосберегающих технологий является жизненно важным условием для сохранения промышленного потенциала нашей страны. Поэтому, большинству украинских компаний необходимо использовать энергосберегающие методы проектирования новых и реконструкции старых производств.

Промышленные предприятия в основном используют энергию, которая получается путем сжигания топлива. Часть этой энергии не используется и эта тепловая энергия отводится от химико-технологической системы [1]. Отходящее тепло – это тепло, генерируемое в процессе путем сжигания топлива или химической реакции, которое "сбрасывается" в окружающую среду и повторно не используются в производстве. В зависимости от типа процесса, отходящее тепло может отводиться в широком диапазоне температур от использования охлаждающей воды при низких температурах до высокотемпературных отходящих газов промышленных печей. При анализе возможности использования рекуперационного тепла необходимо учитывать температурно-энтальпийный потенциал сбросного тепла, как показано в таблице 1.

Таблица 1 – Источник тепловой энергии и его потенциал

№	Источник	Потенциал
1	Тепло сгорания дымовых газов.	Чем выше температура, тем более высокий потенциал тепловой энергии рекуперации
2	Тепло потоков пара.	Высокий потенциал тепловой энергии рекуперации. Теплота конденсации также может быть использована.
3	Тепловые потери конвективного и лучистого тепловыделения с поверхности технологического оборудования.	Низкий потенциал. Если существует возможность, можно использовать для обогрева помещений или воздуха.
4	Отвод теплоты с охлаждающей водой.	Низкий потенциал. Может быть использован для предварительного подогрева потоков, поступающих на предприятие, для систем отопления, горячего водоснабжения, аккумуляирования тепла.
5	Потери тепла в использовании воды из чиллеров.	а) Высокий потенциал, если утилизация энергии снижает холодопотребление. б) Низкий потенциал, если используется для теплонасосной установки.
6	Тепло конечных продуктов процесса.	Потенциал зависит от температуры.
7	Тепло газообразных и жидких стоков, отводимых от технологической системы	Низкий потенциал. Зачастую, это сильно загрязненные среды и требуют применения специального теплообменного оборудования.

Как правило, чем выше температура, тем выше энергетический потенциал и более экономически эффективнее рекуперация тепла. В каждом конкретном случае необходим тщательный анализ возможности использования сбросного тепла на производстве. Типичны примеры использования низкопотенциального тепла для подогрева воздуха, отопления, или предварительного нагрева воды для котлов или технологической воды. При высоком температурном потенциале, необходимо проектировать каскадную систему рекуперации тепла для осуществления максимальной передачи тепловой энергии от охлаждаемых потоков к нагреваемым. На украинских предприятиях химической, нефтеперерабатывающей, пищевой и др. отраслей большинство видов сбросного тепла не используется и отводится от химико-технологических систем с помощью холодных утилит.

В последние годы все больше внимания уделяется использованию технологии утилизации тепла. Разработка рекуперативной системы использования тепла воздуха была предложена на основе технологии сушки биомассы. Технологии низкопотенциальной утилизации тепла могут быть использованы в систе-

ме горячего водоснабжения, системы кондиционирования, предварительного нагрева и вентиляции. В работе [2] показана возможность использования низкопотенциального тепла аммиачного теплового насоса с использованием методов тепловой интеграции. Анализ работы цикла аммиачной холодильной машины супермаркета показал возможности использования тепла охлаждения газообразного аммиака и тепла его конденсации. Это тепло может быть использовано для нагрева воздуха и водяного отопления, что позволит значительно снизить затраты на энергоносители.

В данной работе была выявлено наличие источника сбросного тепла и обоснована возможность его использования на предприятии по производству табака.

1. Методология

Сбросное тепло в процессе сушки табака выделяется при отводе пара из отделения сушки. В этих условиях решающим фактором является эффективность процесса конденсации. Основными факторами, влияющими на теплопередачу при конденсации пара, являются тепло и массоперенос от потока пара к поверхности пленки конденсата, термическое сопротивление пленки конденсата, теплоотдача от пленки конденсата к поверхности пластины, термическое сопротивление материала пластины и слоя отложений, если таковой имеется, и теплоотдача от поверхности пластины к потоку охлаждающей рабочей среды. Как было показано в работе [3], для случая многокомпонентной конденсации, процесс может быть описан одномерной математической моделью.

В работе [4] отмечено, что в каналах пластинчатых теплообменников для расчета коэффициентов теплоотдачи можно использовать аналогию переноса тепла и импульса. Это позволяет произвести расчет коэффициентов теплоотдачи по зависимости, представленной в этой же работе:

$$Nu = 0,065 \cdot Re^{6/7} \cdot (\psi \cdot \zeta_s / F_x)^{3/7} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}, \quad (1)$$

где ψ – доля потерь давления за счет трения о стенку в общем падении давления; F_x – фактор увеличения поверхности, ζ_s – фактор трения при течении в части канала, образованного основными теплопередающими полями соседних пластин по корреляционной зависимости, представленной в [4]. Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; μ и μ_w – значения динамической вязкости в при температуре потока и стенки, Па.

Доля потерь давления на трение в общей величине падения давления:

$$A_1 = 380 / [tg(\beta)]^{1,75}; \text{ при } Re > A_1 \quad \psi = (Re/A_1)^{-0,15 \cdot \sin(\beta)}; \text{ при } Re \leq A_1 \quad \psi = 1. \quad (2)$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи от пленки конденсата к поверхности пластины Арсеньевой О.П. в работе [5] предложена зависимость, основанная на взаимосвязи переноса тепла и импульса и однородной модели для двухфазного потока:

$$Nu = Nu^* \cdot \left[1 + x \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right) \right]^{0,48}, \quad (3)$$

где Nu – число Нуссельта для потока конденсата с учетом общего расхода двух фаз, x – массовая доля паров, ρ_L , ρ_G – плотности паровой и жидкой фаз соответственно. Для пластинчатых конденсаторов важным фактором является падение давления в каналах, которое понижает температуру насыщенного пара, что снижает локальную разность температур и отрицательно влияет на теплопередачу. Учитывая прирост поверхности теплопередачи за счет гофрировки и, следовательно, соответствующий прирост длины канала для конденсирующегося пара можно записать следующее выражение:

$$\frac{dP}{dF} = \frac{\Delta P_{2PH} / \Delta P_G}{N_{CH} \cdot p_{CH} \cdot d_e} \zeta \cdot \frac{\rho_v \cdot W_v^2}{2} - \frac{d}{dF} \left(\frac{\rho_v \cdot W_v^2}{2} + \rho_v \cdot g \cdot F \right), \quad (4)$$

где N_{CH} – число каналов по пару, p_{CH} – периметр, м, W_v – скорость пара, м/с, g – ускорение свободного падения, м/с², $\Delta P_{2PH} / \Delta P_G$ – отношение падения давления в канале двухфазного потока к падению давления потока паровой фазы.

Согласно подходу Локкарта-Мартинелли можно записать следующее:

$$\Delta P_{2PH} / \Delta P_G = 1 + 2,9 \cdot X_{TT}^{0,46}; \quad (5)$$

$$X_{TT} = \left(\frac{G_{v0} - G_v}{G_v} \right)^{1-m/2} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_v} \right)^{m/2}. \quad (6)$$

Разделим канал на Z малых зон, имеющих конечную величину поверхности теплопередачи ΔF . Для каждой i -той зоны все переменные и их изменения по длине зоны можно выразить через среднее значение плотности теплового потока q_i , Вт/м². Получаем нелинейное алгебраическое уравнение, численное решение которого дает величину q_i , а затем определяются изменения соответствующих переменных. Произведя расчеты для всех зон, получим распределение параметров по длине канала ПТА.

Для оценки точности разработанной математической модели были произведены расчеты для конденсации пара в канале с неизменяемой формой и постоянной величиной его поперечного сечения. Число зон равнялось 16. Сравнение с полученными экспериментальными данными показало, что погрешность для коэффициентов теплоотдачи не превысила 5 %, а для падения давления по пару не превысила 11 %.

2. Анализ данных

Потоковые данные отделения сушки табака были экстрагированы и проанализированы. Табак поступает в сушильную башню с влажностью 22,5 %. Сушка ведется в струе перегретого пара при температуре 180 °С. Пар подается в сушильную трубу с расходом 350–400 кг в час. Табак находится в сушильной трубе 5 секунд и затем в течение 6–7 секунд осажается в циклоне. В сушильной трубе происходит вскипание влаги в табаке и частичное испарение, дальнейшая отдача влаги происходит при осаждении в циклоне. Из циклона табак выгружается с помощью шлюзового затвора. Табак выходит из сушильной башни с влажностью 14,5 %. Воздушно-паровая смесь возвращается в сушильный контур, проходя теплообменник, поддерживающий требуемую температуру. Часть введенного пара, а также вторичные пары удаляются в атмосферу через регулируемую заслонку. Расход пара через заслонку варьируется от 950–1100 кг в час температура 140 °С. В рабочем состоянии заслонка открыта на 15–19 %. Были подобраны потоки, которые будут использованы в качестве теплоносителя для отопления и горячего водоснабжения предприятия. Основные параметры потоков показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Потоковые данные существующего процесса

№	Поток	Тип	T _s , °С	T _t , °С	G, кг/с	CP, кВт/К	ΔH, кВт
1	Пар	Горячий	110	88	0,278	25,7	566
2	Конденсат	Горячий	88	30	0,278	1,2	67
3	Этиленгликоль	Холодный	50	70	7,640	28,8	566
4	Горячая вода	Холодный	5	55	0,320	1,34	67

Тепловая энергия конденсации вторичного пара используется для нагрева этиленгликоля (поток 3, рисунок 1), циркулирующего в системе отопления предприятия. Тепло охлаждения конденсата передается потоку воды (поток 4, рисунок 1), поступающей в систему горячего водоснабжения (рисунок 1).

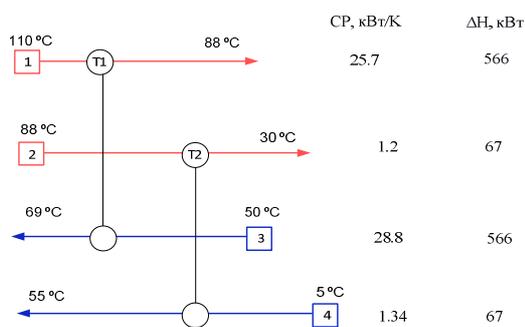


Рисунок 1 – Сеточная диаграмма рекуперативной теплообменной системы

3. Разработка и внедрение

Был спроектирован автоматизированный теплообменный модуль рекуперации тепла вторичного пара. После отделения сушки «мятый пар» поступает в теплообменный модуль, где отдает тепло конденсации и охлаждения холодному теплоносителю. Тепловая энергия конденсата используется для нужд предприятия, отопления и горячего водоснабжения по схеме, представленной на рисунке 2.

В качестве теплообменного оборудования были использованы пластинчатые теплообменники (ПТА). ПТА являются энергоэффективными теплообменниками с высокими значениями коэффициента теплопередачи за счет развитой турбулизации потока в каналах. В качестве парового конденсатора был выбран TS6M-FG пластинчатый теплообменник производства компании Alfa Laval [6].

Паровые нагреватели серии TS-M можно использовать в различных водонагревательных установках. Это компактные, высокопроизводительные аппараты, позволяющие поддерживать температуру высоко-

точных процессов, обеспечивая максимальную эффективность нагрева и минимальные затраты энергии. Правильно спроектированная система автоматического управления обладает высоким быстродействием и способна обеспечить точное регулирование температуры при любых изменениях параметров. Благодаря своей компактности паровые нагреватели серии TS-M легко интегрируются с другим оборудованием, часто используя для этого пространства, которые слишком малы для кожухотрубных теплообменников, спроектированных для аналогичных целей.

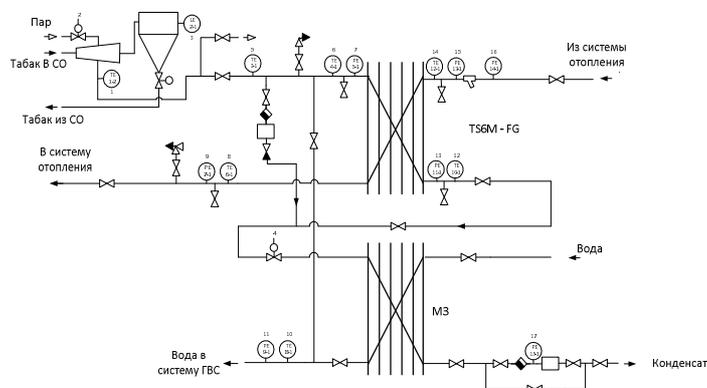


Рисунок 2 – Принципиальная схема автоматизированной установки утилизации тепла вторичного пара

Благодаря высокой тепловой эффективности теплообменников TS-M можно спроектировать аппарат, который, работая при низкой температуре конденсации, обладает малым энергопотреблением и отсутствием пролетного пара. Преимущества образуются за счет отсутствия потерь энергии, затрачиваемой на вентиляцию системы при вторичном парообразовании, отсутствия необходимости, а следовательно и затрат на отдельный доохладитель или систему утилизации пара при вторичном парообразовании. Сравнительно низкая температура конденсации означает существенное уменьшение образования накипи. Это способствует сохранению высокой теплоотдачи, уменьшает эксплуатационные затраты и повышает КПД оборудования.

Малый рабочий объем теплообменников TS-M позволяет легко поддерживать требуемую температуру и быстро нагревать воду, например, в устройствах проточного горячего водоснабжения.

В качестве нагревателя воды для горячего водоснабжения был выбран компактный пластинчатый теплообменник МЗ. Основные параметры теплообменного оборудования представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов ПТА

	Тепловая нагрузка, кВт	K^1 , Вт/(м ² К)	Поверхность теплообмена, м ²	Термическое сопротивление 10000 м ² ·К/Вт	Количество пластин, шт.
TS6M-FG	545	2,573	4.1	0.012	50
МЗ	67	6,506	0.4	0.015	13

¹коэффициент теплопередачи

4. Экономический эффект

Экономические результаты интеграции тепловой установки утилизации тепла вторичного пара в существующую систему предприятия представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Экономический эффект

	Значение
Затраты на проектирование, €	6,056
Затраты на оборудование, €	40,495
Общие капитальные затраты, €	46,551
Эксплуатационные расходы, €/г	11,482
Годовая экономия, €/г	121,725
Годовой доход, €/г	89,297
Срок окупаемость, г	0,52
Коэффициент капитальных вложений, €/€	1,92

Выводы

Была решена задача использования сбросного тепла на табачной фабрике с использованием высокоэффективного теплообменного оборудования. Применение современных методик расчета пластинчатых теплообменников и проектирования автоматизированных теплообменных установок на их базе позволило максимально использовать тепло вторичного пара для системы отопления и горячего водоснабжения предприятия. Быстрая окупаемость проекта подтверждает эффективность использования предложенной методики в процессах утилизации вторичного тепла промышленных предприятий.

Благодарности

Авторы благодарят за финансовую поддержку ЕС FP7 проект “Distributed Knowledge-Based Energy Saving Networks” – DISKNET, Grant Agreement No: PIRSES-GA-2011-294933 и ЕС проект “Efficient Energy Integrated Solutions for Manufacturing Industries” – EFENIS, Grant Agreement No. ENER/FP7/296003/EFENIS.

Литература

1. Klemeš J.J., Varbanov P.S., 2012, Heat Integration and Renewables – Recent Developments and Achievements, *Global Journal of Technology and Optimization*, 3, 86–93.
2. Boldyryev S.A., Kapustenko P.O., Tovazhnyansky L.L., Garev A.O., Perevertaylenko O.Yu, Khavin G.L., Arsenyeva O.P., Klemeš J.J., Ammonia Refrigeration Cycle Integration in Buildings Heating System, *Chemical Engineering Transactions*, 29, 1453–1458.
3. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Nagorna O.G., Perevertaylenko O.Y., 2004, The simulation of multicomponent mixtures condensation in plate condensers, *Heat Transfer Engineering*, 25(5), 16–22.
4. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V., 2012, Heat transfer and friction factor in criss-cross flow channels of plate-and-frame heat exchangers. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 46(6), 634–41.
5. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Perevertaylenko O., Khavin G., 2011, Investigation of the new corrugation pattern for low pressure plate condensers. *Applied Thermal Engineering*, 31, 2146–52.
6. TS6 Plate Heat Exchanger. Alfa Laval publication EPM00002EN 1203, 2 p.

УДК 66.045.1

Гарєв А.О., ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.О., АРСЕНЬЄВА О.П., КЛЕМЄШ Й., КУСАКОВ С.К., АНОХІН П., ЧУЧЕК Л.

РОЗРОБКА СИСТЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА ВТОРИННОГО ПАРА ВІДДІЛЕННЯ СУШКИ ТЮТЮНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛОБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ

У даній роботі була вирішена проблема утилізації скидного тепла відділення сушки тютюну промислового підприємства Харківської області. Вихідні дані були зібрані і проаналізовані для використання в подальших технологічних розрахунках і техніко-економічному обґрунтуванні. Була розроблена методика розрахунку конденсації пароводяної суміші в каналах пластинчатого теплообмінника. Це дозволило отримати оптимальні конструктивні параметри теплообмінного обладнання для забезпечення високих енергетичних показників в процесі його роботи. Після підбору і розрахунку допоміжного обладнання була розроблена проектно-конструкторська документація для автоматизованої установки рекуперації скидного тепла.

Andrii O. Gariev, Leonid L. Tovazhnyansky Petro O. Kapustenko, Jiří J. Klemeš, Olga P. Arsenyeva, Sergey. K. Kusakov, Petr Anokhin, Lidija Čuček

THE DEVELOPMENT OF HEAT SUBSTATION FOR DRYING WASTE HEAT UTILIZATION

The problem solution of waste heat utilization at the tobacco factory is considered in this work. The analysis of the possibility of waste heat utilization and appropriate calculations of plate heat exchangers were carried out. The method for multi component mixture condensation calculation is used. This allows obtaining optimal parameters for the working conditions of the heat exchangers according to the energy efficiency retrofit of industrial enterprises. The design of heat substation for waste heat utilization was developed.

УДК 621.35

Сахненко М.Д., Ведь М.В., Каракуркчі Г.В., Єрмоленко І.Ю.

РЕСУРСОЗАОЩАДЖУВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ**Постановка проблеми**

Зношування деталей машин та устаткування є причиною порушення нормальних умов функціонування вузлів та механізмів внаслідок збільшення зазорів у спряжених та рухомих деталях, змінення їх взаємного розташування тощо. Значний обсяг деталей, що надходять для капітального ремонту, мають пошкодження лише поверхневого шару без істотних руйнувань об'єкта в цілому, тому потребують застосування певної технології поверхневої обробки. Обираючи спосіб, в який буде проведено відновлення зношеної поверхні, слід враховувати вимоги щодо ефективності та екологічної безпеки технологічного процесу. Рациональна технологія ремонту деталей повинна відповідати наступним критеріям: якість відремонтованих деталей, продуктивність ремонтної технології та її економічність, при цьому саме остання складова є переважальною при прийнятті рішення.

Таким чином, підвищення надійності роботи обладнання, подовження ресурсу його експлуатації та реновація машин й устаткування за рахунок застосування прогресивних ресурсозберігаючих технологій ремонту є актуальною задачею.

Підвищення якості ремонтних робіт та зниження витрат на їх здійснення досягається за рахунок використання технологій зміцнення та відновлення зношених поверхонь. Більшість деталей, відновлених та зміцнених сучасними способами, за своїми експлуатаційними характеристиками, працездатністю та довговічністю роботи не поступаються новим виробам, при цьому витрати значно скорочуються.

Найбільш перспективним способом зміцнення та відновлення зношених поверхонь деталей зі сталі та чавуну є нанесення на їх поверхню захисних покриттів металами (хромом, міддю, нікелем). Особливе місце при цьому посідає електролітичне залізнення, яке має такі переваги, як висока продуктивність, достатня дешевизна та простота організації технологічного процесу [1].

Нівелювати притаманні залізненню негативні фактори (низька адгезія з основою, значна воднева крихкість, недостатня твердість) можна за рахунок легування співсаджуваними компонентами. Додаткове введення молібдену і вольфраму дозволяє підвищити механічний та хімічний опір сформованих покриттів та отримати нові функціональні матеріали для зміцнення та відновлення деталей.

Відомі способи формування зносостійких гальванічних покриттів двокомпонентними сплавами заліза з молібденом та вольфрамом асиметричним змінним струмом з хлоридних електролітів на основі заліза (II) з додаванням цитратної кислоти, молібдату амонію (вольфрамату натрію) та хлоридної кислоти [2]. Сформовані покриття Fe-Mo та Fe-W, за свідченнями авторів, мають вищі показники мікротвердості, міцності зчеплення з основою та зносостійкості порівняно з чистим електролітичним залізом. Проте вищенаведений спосіб формування зносостійких покриттів має недоліки, пов'язані з низькою стабільністю електролітів, що пояснюється окисненням заліза (II) як киснем повітря, так і в анодному процесі, а також невисокий вміст тугоплавких металів в одержаних сплавах (до 2,5 мас%).

Нами досягнуті певні успіхи у розробці технології бінарних покриттів на основі заліза для зміцнення зношених деталей [3], але вельми перспективним, на наш погляд, є формування багатоконпонентних покриттів заліза шляхом легування молібденом і вольфрамом для зміцнення та відновлення поверхні деталей зі сталі та чавуну, які б мали більший вміст сплавотвірних компонентів, а, отже, і вищі фізико-механічні властивості, та відповідали вимогам екологічності і ресурсозаощадження.

Матеріали та методи досліджень

Покриття залізо-молібден-вольфрам товщиною від 1 до 20 мкм осаджували на попередньо підготовлені зразки зі сталі 3 та сірого чавуну СЧ 18 з комплексного цитратного електроліту на основі сульфату заліза (III) при температурі 20...25 °С, кислотність розчину підтримували в інтервалі 2,8...3,5. Електроосадження проводили з використанням потенціостата ПІ-50-1.1 та програматора ПР-8 уніполярним імпульсним струмом амплітудою від 3,5 до 6 А/дм² при тривалості імпульсу 5·10⁻³...1·10⁻² та паузи 1·10⁻²...2·10⁻².

Продуктивність процесу за струмом визначали гравіметрично, виходячи з приросту маси зразка за час електролізу з урахуванням електрохімічного еквіваленту сплаву.

Хімічний склад покриттів досліджували методом рентгенівської фото-електронної мікроскопії на енергодисперсійному спектрометрі INCA Energy 350, морфологію поверхні вивчали за допомогою сканівного електронного мікроскопу (СЕМ) Zeiss EVO 40XVP. Оцінку шорсткості поверхні гальванічних оса-

дів здійснювали контактним методом сканівним зондовим мікроскопом АСМNT-206 (зонд CSC-37 кантилівер В).

Дослідження фізико-механічних властивостей електролітичних покриттів багатокомпонентними сплавами заліза проводили з використанням мікротвердоміра ПМТ-3 з навантаженням 50 і 100 г та металографічного мікроскопу НЕОРНОТ-21 (збільшення $\times 100 \dots 500$). Корозійну тривкість покриттів оцінювали у модельних агресивних середовищах за глибинним показником корозії.

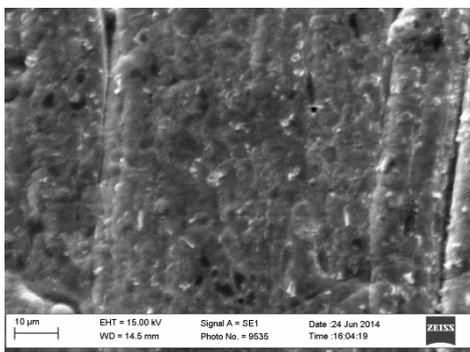
Результати та їх обговорення

Для формування багатокомпонентних покриттів заліза з молібденом і вольфрамом обрані комплексні цитратні електроліти на основі заліза (III). Це пояснюється тим, що у робочому діапазоні рН, враховуючи схильність заліза (III) та цитратів до гідролізу, константи нестійкості комплексів та потенціали відновлення Fe(III), Mo(VI) та W(VI), створюються оптимальні умови для співосадження зазначених компонентів у покриття.

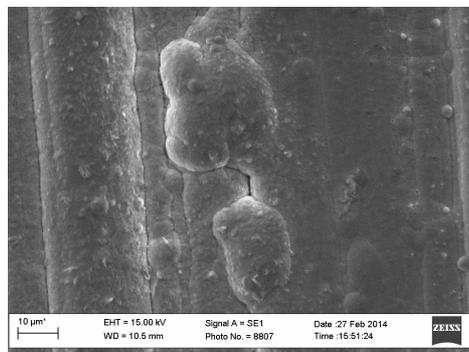
Концентрації компонентів розробленого електроліту не перевищують 0,3 моль/дм³ для ліганду та 0,1 моль/дм³ для решти речовин, включаючи також іони сплавотвірних металів. Це дозволяє віднести розроблений електроліт до категорії ресурсозощаджувальних за концентрацією основних компонентів [6].

Використання імпульсного електролізу дозволяє інтенсифікувати процес електроосадження покриттів заліза з молібденом і вольфрамом і досягти виходу за струмом від 65 до 85 % при досить високій концентрації легуючих компонентів у сплаві (Mo – 15...35 мас%, W – 5,0...15,0 мас%). Середня швидкість осаження покриттів залізо-молібден-вольфрам в заданих умовах становить 20–25 мкм/год. Слід відзначити, що реакції осаження молібдену та вольфраму конкурують між собою, оскільки залежно від концентрації солей та умов осаження на молібден і вольфрам сумарно приходиться 30...40 мас%, тоді як на залізо у будь-якому випадку – 50...60 мас%. Крім того, цікавим виявився і факт впливу матеріалу основи на вміст легуючих компонентів покриття.

Запропонований інтервал густин струму, тривалості імпульсу та паузи забезпечує оптимальну якість покриття та співвідношення вмісту молібдену і вольфраму. При зменшенні/збільшенні вказаних параметрів якість покриття та ефективність осаження значно знижуються. Сформовані покриття є рівномірними по всій поверхні зразків, без тріщин, з гомогенною поверхнею, аморфною структурою, про що свідчать дані мікрорентгеноспектрального аналізу та дослідження морфології і топографії поверхні покриттів за знімками сканівного (рис. 1) та атомно-силового мікроскопів (рис. 2).



а



б

Рисунок 1 – Покриття Fe-Mo-W на підкладці зі Ст.3 (а) та СЧ 18 (б).
Збільшення $\times 1000$

При дослідженні мікрорельєфу зразка (рис. 3) встановлено, що утворена структура складається з зерен сферичної форми, а конгломерати мають розмір 0,5...1,0 мкм.

Дослідження фізико-механічних властивостей (визначення мікротвердості та стійкості при механічній обробці) електролітичних покриттів Fe-Mo-W, сформованих на зразках зі Ст. 3 та СЧ 18 проводили з використанням мікротвердоміра ПМТ-3 з навантаженням 50 г та металографічного мікроскопу НЕОРНОТ-21 (збільшення $\times 100 \dots 500$). Результати дослідження довели, що незалежно від умов формування покриттів заліза з тугоплавкими металами їх мікротвердість у 2,0...2,5 рази вища за основний метал (Ст. 3 та СЧ 18). Покриття рівномірні та мають міцне зчеплення з основою по всій площині зразків, стійкі при механічній обробці та підготовці поперечових перерізів і шліфуванні (рис. 4).

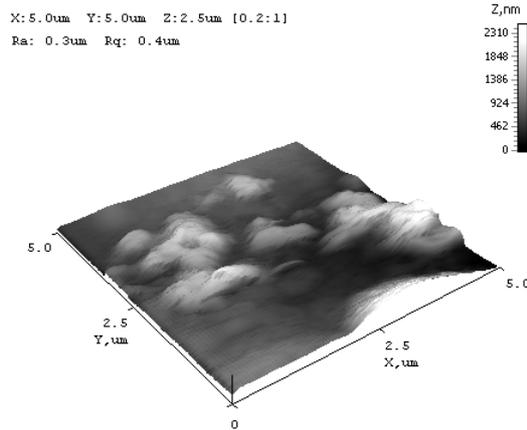


Рисунок 2 – 3-D карта поверхні покриття Fe-Mo-W на підкладці зі Ст.3

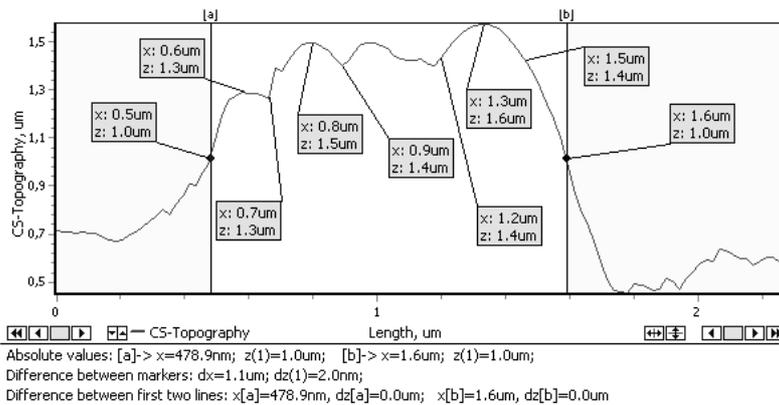


Рисунок 3 – Профіль перетину покриття Fe-Mo-W на підкладці зі Ст.3

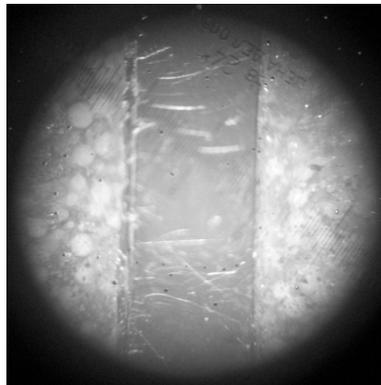


Рисунок 4 – Поперековий переріз покриття Fe-Mo-W на підкладці із СЧ 18

Випробування сформованих покриттів на корозійну тривкість у середовищах різної кислотності довели, що за величиною глибинного показника корозії k_h сформовані гальванічні покриття Fe-Mo-W у всіх модельних корозійних середовищах відносяться до категорії “вельми стійкі” (значення k_h знаходиться в інтервалі 0,004...0,006 мм/рік).

Висновки

Одержані багатокомпонентні електролітичні покриття заліза з молібденом і вольфрамом мають покращені фізико-механічні властивості та корозійну стійкість, що свідчить про можливість їх використання для ефективного відновлення та зміцнення зношених поверхонь деталей з наданням відновлених поверхні підвищених функціональних властивостей. Технологічний процес формування електролітичних пок-

риттів Fe-Mo-W із цитратних електролітів на основі сульфату заліза (III) відповідає вимогам ресурсозбереження й екологічної безпеки та є перспективним для потреб виробництва.

Література

1. Закиров Ш. З. Упрочнение деталей машин электроосаждением железа / Ш. З. Закиров. – Душанбе: Ирфон, 1978. – 208 с.
2. Применение электролитических сплавов на основе железа для упрочнения и восстановления деталей машин / В.В. Серебровский, Е.А. Афанасьев, Д.С. Реутов, Р.В. Степашов // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2012. – Вип. 6 (24). – С. 38–42.
3. Сахненко М.Д. Ресурсозаощаджувальна технологія відновлення зношених деталей / М.Д. Сахненко, М.В. Ведь, Г.В. Каракуркчі [та ін.] // Інтегровані технології та ресурсозбереження, 2013. – № 2. – С. 9–13.
4. Ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии в химической и нефтехимической промышленности: тез. докл. III Международной конференции Российского химического общества им. Д.И. Менделеева: – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2011. – С. 23–26.

Bibliography (transliterated)

1. Zakirov Sh. Z. Uprochnenie detaley mashin elektroosazhdeniem zheleza. Sh. Z. Zakirov. – Dushanbe: Irfon, 1978. – 208 p.
2. Primenenie elektroliticheskikh splavov na osnove zheleza dlya uprochneniya i vosstanovleniya detaley mashin. V.V. Serebrovskiy, E.A. Afanasev, D.S. Reutov, R.V. Stepashov. Visnik Sumskogo natsionalnogo agrarnogo universitetu. Seriya «Mehanizatsiya ta avtomatizatsiya virobnichih protsesiv». – 2012. – Vip. 6 (24). – P. 38–42.
3. Sahnenko M.D. Resursozaozhadzhivalna tehnologiya vidnovlennya znoshenih detaley. M.D. Sahnenko, M.V. Ved, G.V. Karakurkchi [ta in.]. Integrovani tehnologiyi ta resursozberezhennya, 2013. – # 2. – P. 9–13.
4. Resursosberegayushchie i energoeffektivnyie tehnologii v himicheskoy i neftehimicheskoy promyshlennosti: tez. dokl. III Mezhdunarodnoy konferentsii Rossiyskogo himicheskogo obschestva im. D.I. Mendeleeva: – M.: RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2011. – P. 23–26.

УДК 621.35

Сахненко Н.Д., Ведь М.В., Каракуркчі А.В., Ермоленко І.Ю.

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Показана возможность применения электролитических многокомпонентных покрытий железа с молибденом и вольфрамом для упрочнения деталей. Сформированные покрытия Fe-Mo-W имеют повышенные физико-механические и коррозионные свойства, процесс осаждения высокоэффективен и характеризуется большой скоростью формирования покрытия. Технологический процесс отвечает требованиям ресурсосбережения и экологической безопасности.

Skhnenko N.D., Ved M.V., Karakurkchi A.V., Yermolenko I.Yu.

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES OF FORMATION IRON-BASED MULTICOMPONENT COATINGS FOR HARDENING OF PARTS

The possibility of using electrolytic multicomponent coatings of iron with molybdenum and tungsten for hardening of parts is shown. Formed coating by Fe-Mo-W have higher physical, mechanical and corrosion properties, the deposition process is highly efficient and is characterized by a high rate of the coating formation. Technological process meets the requirements of resource conservation and environmental safety.

**ДЕЯКІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ У ЯКОСТІ СИРОВИНИ
ДЛЯ ЕНЕРГО- І РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ПРОЦЕСІВ**

Вступ. Для України критичний стан економіки й виробничої сфери, зв'язаний, насамперед з високими цінами на енергоносії усіх видів. Одним з якісних джерел дешевого енергетичного ресурсу можуть бути полімерні відходи різного виду.

Енерго- і ресурсозберігаючі процеси утилізації полімерних відходів виконують кілька необхідних функцій: 1) економія сировини у вигляді газу або нафти, які є одночасно енергоносіями й енергетичними ресурсами для виробництва первинних полімерів; 2) полімерні відходи, які не підлягають утилізації за пунктом 1 підлягають, наприклад, шляхом високотемпературної газифікації в складові енергетичних ресурсів; 3) створення комплексних підприємств на працюючих виробництвах хімічної промисловості з метою сполучення всіх вищевказаних можливостей. Ресурсозбереження в цьому випадку можна представити у вигляді складових утилізації твердих побутових відходів (ТПВ):

- 1) ресурсовміст, ресурсоемність, ресурсоекономічність і можливість утилізації – з однієї сторони;
- 2) збереження первинних ресурсів, тобто їхня економія, з другої сторони.

Енергозбереження в наш час один із пріоритетів політики будь-якого підприємства або компанії, що працюють у різних сферах виробництва. І це обумовлене не тільки постійним зростанням цін на енергоносії, а також, тим, що питомі енерговитрати на виробництво основних видів продукції в Україні значно вищі, ніж у західноєвропейських країнах. Ефективність енергозбереження може бути представлена в цьому випадку у вигляді енергозберігаючих технологій виробництва продукції з раціональним використанням енергії, які дають можливість одночасно зменшити навантаження на навколишнє середовище й суттєво знизити кількість відходів, одержуваних при виробництві сировини й виробів або експлуатації різного виду полімерної продукції.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Використання полімерних відходів потребує науково-обґрунтованого підходу до аналізу їх властивостей. На зміну деформаційних властивостей полімерних матеріалів у процесі експлуатації впливають різні фактори, наприклад, вид, умови й тривалість строку використання виробу. Для порівняльного аналізу й прогнозування зазначених властивостей необхідна розробка плану досліджень на основі науково-обґрунтованого аналітичного опису цих впливів. Слід зазначити, що вивчення фізико-механічних властивостей полімерних відходів, які проявляються в умовах експлуатації, набагато складніше, ніж вимір цих характеристик, для властивостей первинних полімерів. Завдання значно ускладняється, коли в зазначених матеріалах окрім фізико-механічних і реологічних характеристик, проявляються також і фізико-хімічні властивості. Особливу цінність має розв'язок такого завдання для полімерних відходів, коли крім зіставлення їх фізико-механічних властивостей, доводиться також урахувувати умови експлуатації полімерних виробів. Без визначення таких процесів як повзучість і релаксація зазначене завдання розв'язати неможливо.

При цьому слід відзначити, що під повзучістю розуміють деформацію, що розвивається в часі при постійній нарузі. Повна деформація включає пружну, високоеластичну і деформацію в'язкої течії. Пружна деформація розвивається дуже швидко, високоеластична – розвивається в часі зі спадною швидкістю і прагне досягнення рівноважного значення. Деформація в'язкої течії спостерігається головним чином в полімерах лінійної структури.

В умовах релаксації макромолекули прагнуть перейти в рівноважний стан шляхом перетворення витягнутої конформації в згорнуту, а при повзучості, – навпаки, згорнутої в випрямлену, причому це відбувається з деяким часом запізнювання. Отже, і релаксація напружень і повзучість для полімерних матеріалів визначаються їх структурою (лінійна, сітчаста), довжиною, орієнтацією і конформацією макромолекул.

Таким чином, у комплексне дослідження й аналіз енерго- і ресурсозберігаючих процесів переробки полімерних відходів різного походження необхідно включати окрім фізико-механічних та фізико-хімічних характеристик, дослідження з повзучості та релаксації.

Формулювання цілей статті. Різноманітність полімерних матеріалів і великий обсяг накопиченого експерименту доводять необхідність, як розробки нових методів дослідження їх деформаційних властивостей, так і створення на їхній основі методик контролю якості полімерних відходів. Поява полімерних

відходів з різними в'язкопружними властивостями обґрунтовує пошук нових моделей прогнозування зазначених властивостей і застосування їх з метою вибору способу утилізації. Створення нових методів дослідження експлуатаційних властивостей полімерних відходів сприяє найбільш достовірному прогнозуванню деформаційних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Актуальність питань більш ретельного аналізу деформаційних властивостей полімерних матеріалів в областях неруйнуючих навантажень неодноразово відзначалася в розроблювальних матеріалах конференцій і публікацій. Результатом загальноновизнаної значимості досліджень у цьому напрямку з'явилася виникнення в останні роки ряду деяких рекомендацій, що містять окремі питання фізико-механічні, фізико-хімічні й інші характеристики первинних полімерів, але вони можуть мати пряме відношення до поглибленого дослідження властивостей полімерних відходів.

Невід'ємною частиною ТПВ є полімерні відходи різного походження, кількість яких зростає рік у рік, і ці тенденції будуть підсилюватися. Але найголовніше – проблема утилізації полімерних відходів різного походження, виявилася без якоїсь керівної науково-обґрунтованої ідеї [1–4]. Розробка такої ідеї з погляду технологічних енерго- і ресурсозберігаючих процесів дозволила б переосмислити роль полімерних відходів в організації ринку полімерної сировини й виробити комплексні підходи до умов перехідного періоду ринкових відносин, обраним у якості пріоритетної складової фінальних цілей економіки успішної держави [2, 3].

Відповідно до постановки завдання досліджень пропонується новий підхід до організації енерго- і ресурсозберігаючих процесів переробки полімерних відходів з обліком отриманих нами теоретичних і практичних результатів. Ці розробки проведені з урахуванням необхідності впровадження інноваційних методів навчання у вищих навчальних закладах, тому що все частіше сучасні інженери-технологи повинні знаходити відповіді в нетрадиційних проектах, розв'язок яких вимагає спеціальних підходів і способів оцінки комплексних властивостей об'єкта [5].

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтування отриманих наукових результатів. Алгоритм виконання завдання для розв'язку питань ідентифікації й математичного моделювання завдань комплексного проекту досить складний, його розв'язок вимагає спеціальної професійної підготовки в цілому з урахуванням останніх досягнень в інноваційному напрямку проекту (рис. 1).

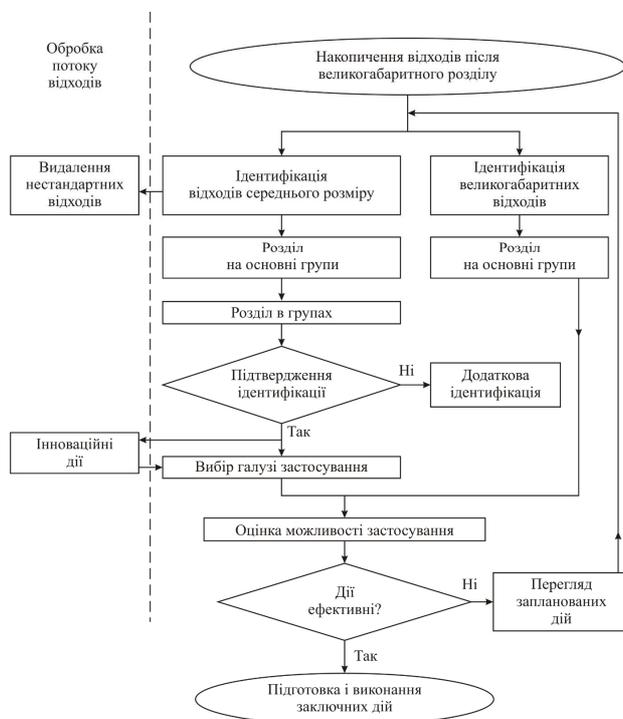


Рисунок 1 – Алгоритм процесів ідентифікації полімерних відходів

Складність аналізу ситуації з утилізації полімерних відходів зв'язана, насамперед, з різноманіттям видів полімерних матеріалів внаслідок потреб ринку, неоднорідністю й нестабільністю складу полімерних відходів, що визначають множинність залежних факторів для їхньої повторної переробки й експлуатації.

Процеси експлуатації поліетиленової плівки багато авторів пов'язують із зміною структури і властивостей, зокрема з появою і зростанням кількості геліфракції – нерозчинної в ксилолі частини поліетилену. Нами були досліджено вплив вмісту геліфракції, що утворилася в процес експлуатації поліетиленової плівки на структуру і властивості вторинного поліетилену, отриманого з неї (табл. 1).

Таблиця 1 – Деякі властивості вторинного поліетилену

№ п/п	Кількість геліфракції, %	Щільність, г/см ³	Кристалічність, %
1	17	0,872	10
2	34	0,905	31
3	42	0,887	20

Другою, не менш важливою метою, був пошук критерію оцінки якості, можливого критерію зміни властивостей при експлуатації поліетиленової плівки і вибору способу її утилізації чи переробки.

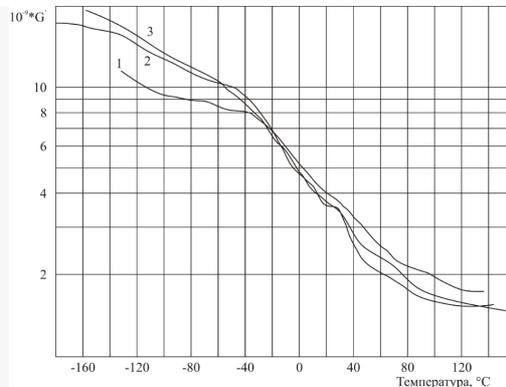


Рисунок 2 – Залежності $G' = f(T)$ для вторинного поліетилену з кількістю геліфракції, %: 1 – 17; 2 – 34; 3 – 42

Отримані залежності (рис. 2) для вторинного поліетилену з різних зразків поліетиленової плівки, кількістю геліфракції складає, %: 1 – 17; 2 – 34; 3 – 42 дозволяють зробити висновки:

- 1) виявлена залежність $G' = f(T)$ від вмісту геліфракції в температурних областях нижче і вище області механічного склування з характерною температурою інверсії цієї залежності для даної області;
- 2) таку поведінку величини $G' = f(T)$ зазвичай зв'язують з лінійними кристалічними полімерами – із збільшенням ступеня їх кристалічності (табл.), якщо їх структура відповідає моделі Хоземана-Бонара;
- 3) слід зазначити, що для моделі Хоземана-Бонара із збільшенням χ спостерігається зменшення G' при температурах $T < T_g$ і зростання G' – при $T > T_g$, подібна залежність для наших досліджень із зростанням вмісту геліфракції.

Аналіз отриманої залежності дозволяє припустити, що, в разі зміни густоти просторової макроскопічної сітки, слід очікувати зворотної залежності для G' з ростом кількості геліфракції. Таким чином можна говорити про те, що геліфракція не є регулярною структурою – макроскопічною сіткою по всьому об'єму полімерного матеріалу, а спостережувана закономірність обумовлена зміною структури аморфних областей полімеру, тому що оцінка зміни цих зразків не виявляє залежності від вмісту геліфракції (табл. 2), але знаходяться у відповідності з якісними змінами обсягу аморфних областей.

Аналіз кривих температурного ходу коефіцієнта теплового розширення α_T (рис. 3) підтверджує наші припущення:

- 1) при температурах $T < T_g$ для зразка 1 характерна наявність більш рихлої молекулярної упаковки аморфної фази і, отже, можлива найбільша ефективність міжмолекулярної і внутримолекулярної взаємодії;
- 2) для зразка 3 з найбільшою кількістю геліфракції слід зазначити зворотні тенденції;

3) аналогічні обставини зумовлюють найменшу величину механічних втрат в цій системі і зрушення деяких релаксаційних процесів в бік більш високих температур.

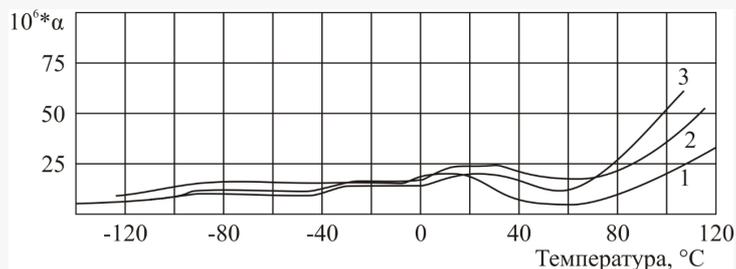


Рисунок 3 – Залежності $\alpha_T = f(T)$ для вторинного поліетилену з різною кількістю геліфракції, %:
1 – 17; 2 – 34; 3 – 42

При температурах $T > T_g$ хід залежності $\alpha_T = f(T)$ відображає в основному зміну вільного об'єму досліджуваних систем: найбільш щільноупакована система була найбільш термодинамічно нерівноважною – для неї характерна і найбільш різка зміна вільного об'єму при температурних переходах вище температури склування T_g . При побудові фізико-хімічних і фізико-механічних моделей ми розробили представлення про механізм реальних процесів експлуатації полімерних матеріалів [6–8]. Методологічні принципи утворення таких моделей в основі мають визнання того факту, що різні хіміко-технологічні процеси базуються на однакових законах фізики й хімії, наприклад, на вивченні процесів гідродинаміки, масо- і теплопередачі, хімічної кінетики, процесів фазових переходів і ін.

Висновки. Таким чином, можна виділити основні специфічні характеристики енерго- і ресурсозберігаючих процесів у технології утилізації полімерних відходів для оптимально організованого комплексного інноваційного проекту: високий ступінь компетентності в утилізаційних процесах ТПВ ще на первісних стадіях виготовлення виробів і, як правило, достатній практичний і теоретичний досвід з питань розв'язку нестандартних розв'язків використання полімерних відходів.

Необхідно відзначити, що система утилізації полімерних відходів і вибір промислових об'єктів для реалізації цих процесів є найважливішим важелем соціальної політики в руках регіональних органів влади, які формують якість життя населення й зобов'язано займатися екологічними питаннями в тому або іншому регіоні.

І все ж має першорядне наукове і практичне значення задача встановлення зв'язку між хімічним складом, будовою, структурою і макроскопічними властивостями полімерних матеріалів все ще недостатньо вивчена і далека від повного вирішення. Зокрема, слабо вивченим залишається питання встановлення фізичної природи всього комплексу макроскопічних властивостей і, перш за все релаксаційних, в полімерах, для яких характерна значна неоднорідність ступеня молекулярного впорядкування в їх аморфній (некристалічній) частині.

Література

1. Бухкало С.И., Гардер С.Е., Химич О.Ю. Применение математического моделирования для комплексных предприятий по переработке отходов // Вісник НТУ «ХПІ». 2012. № 10. С. 73–78.
2. Бухкало С.И., Сериков А.В., Ольховская О.И. Об утилизации полимерных отходов как комплексе инновационных проектов // Вісник НТУ «ХПІ». 2012. № 10. С. 160–166.
3. Бухкало С.И. Изменение свойств в процессе эксплуатации пленки и направленная модификация вторичного полиэтилена ; дис. ... канд. техн. наук. М., 1988.
4. Богданов В.В., Торнер Р.В. Красовский В.Н., Регер Э.И. Смешение полимеров. Л.: Химия, 1979. – 192 с.
5. Юшкова Е.В., Шанина Е.В. Деятельностная модель обучения: формирование позиций «инженер-исследователь», «инженер-проектировщик» // Пищевая промышленность. 2011. № 12. С. 10.
6. Boyer R.F. Dependence of mechanical properties on molecular motion in polymers. Polymer Eng. Sci. 1968. Vol. 8. № 3. P. 161–185.

7. Барте́нев Г.М., Зеле́нев Ю.В. Физика и механика полимеров. М.: Высшая школа, 1983. – 392 с.
8. Переходы и релаксационные явления в полимерах / Составитель Р.Ф. Бойер // Под ред. А.Я. Малкина. М.: Мир. 1968. – 384 с.

Bibliography (translated)

1. Buhkalo S.I., Garder S.E., Himich O.Ju. Primenenie matematicheskogo modelirovanija dlja kompleksnyh predpriyatij po pererabotke othodov. Visnik NTU «HPI». 2012. # 10. P. 73–78.
2. Buhkalo S.I., Serikov A.V., Ol'hovskaja O.I. Ob utilizacii polimernyh othodov kak komplekse innovacionnyh proektov. Visnik NTU «HPI». 2012. # 10. P. 160–166.
3. Buhkalo S.I. Izmenenie svojstv v processe jekspluatacii plenki i napravlennaja modifikacija vtorichnogo polijetilena ; dis. ... kand. tehn. nauk. M., 1988.
4. Bogdanov V.V., Torner R.V. Krasovskij V.N., Reger Je.I. Smeshenie polimerov. L.: Himija, 1979.– 192 p.
5. Jushkova E.V., Shanina E.V. Dejatel'nostnaja model' obuchenija: formirovanie pozicij «inzhenersissledovatel'», «inzheners-proektirovshhik». Pishhevaja promyshlennost'. 2011. # 12. P. 10.
6. Boyer R.F. Dependence of mechanical properties on molecular motion in polymers. Polymer Eng. Sci. 1968. Vol. 8. # 3. P. 161–185.
7. Bartenev G.M., Zelenev Ju.V. Fizika i mehanika polimerov. M.: Vysshaja shkola, 1983. – 392 p.
8. Perehody i relaksacionnye javlenija v polimerah. Sostavitel' R.F. Bojer. Pod. red. A.Ja. Malkina. M.: Mir. 1968. – 384p.

УДК 678:628.54

Бухкало С.И.

**НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ
ДЛЯ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ**

Утилизация и переработка полимерных отходов в статье представлена как комплексное исследование и анализ энерго- и ресурсосберегающих процессов переработки полимерных отходов различного происхождения. Исследования направлены на изучение таких вопросов как: организация сбора и транспортировки отходов, их идентификация по маркировке в соответствии с общепринятой классификацией полимеров; выбор научно-обоснованных методов переработки подлежащих утилизации полимеров; установление связи между изменением химического состава, строения, структуры и свойств полимерных материалов (в частности, полиэтилена) и режимно-временными сроками эксплуатации.

Bukhkalov S.I.

**SOME PROPERTIES OF POLYMER WASTE AS RAW MATERIAL
FOR ENERGY AND RESOURCE SAVING PROCESSES**

The problem of wastes utilization and recycling is present as complex research and analysis of energy- and resource saving processes for treatment of polymer wastes of various origin. The investigation are focused in researching such problems as organization of waste collection, transportation and identification of wastes according to adapted polymers classification; selection of scientific based methods of wastes to be utilized or recycled; the development of appropriated process flow sheets and choice of modifications additives and equipment for polymers waste recycling. The choice of appropriate plants with selected energy resources is very important for projects realization.

ОЦІНКА ЕНЕРГОВИТРАТ ПРОЦЕСУ СУШКИ ДЕРЕВИННОЇ СИРОВИНИ**Актуальність задачі та формулювання цілей статті**

Одним з основних чинників, які впливають на продуктивність підприємства з піролізу деревини та собівартість отриманої продукції, є вологість сировини, яка йде на переробку. Саме тому процесу сушки необхідно інтенсифікувати задля підвищення ефективності роботи таких виробництв.

Конвективна сушка – це процес видалення вологи з матеріалу, який відбувається за рахунок підвода тепла нагрітим повітрям або продуктами згоряння [1].

Сушка сировини є початковим етапом для процесу піролізу. Головна мета сушки полягає у перетворенні деревини з природної сировини на промисловий матеріал з покращеними технологічними властивостями. Задля отримання вірної картини протікання усього комплексу процесів, пропонується розглянути цю початкову стадію.

Під час камерної сушки терміни висихання деревини порівняно невеликі (декілька годин), крім того при кваліфікованому проведенні процесу є можливість отримати технологічну сировину з будь-якою кінцевою вологістю [2].

Процес випаровування вологи з деревини потребує підводу певної кількості зовнішнього тепла. За методом передачі тепла розрізняють наступні основні види сушки: конвективна (камерна), кондуктивна (контактна), радіаційна, сублімаційна та височастотна. Кожен з цих видів може мати декілька різновидів у залежності від типу теплоносія та особливостей обладнання, яке використовується [2].

Мета даної роботи полягає у тому, щоб дати оцінку енерговитрат на реалізацію процесу сушки. Це дозволить виробити правильний підхід до процесу у цілому за рахунок диференціації порід, їхніх властивостей та початкової вологості деревини. Принципи сушки матеріалів, існуючі на сьогоднішній день, є економічно недоцільними через кількісну та якісну однаковість характеристик апаратів у процесах сушіння для усіх типів сировини. Пересушування деревини тягне за собою одночасно зміну властивостей кінцевого продукту та зайві витрати. Недосушена сировина потребуватиме декількох перезапусків процесу, що також відіб'ється на якості та собівартості продукції [3].

Опис процесу

Конвективна газова сушка – це процес видалення води з деревини шляхом нагрівання для перетворення вологи з рідкого у газоподібний стан. При цьому об'єм вологи збільшується у сотні разів і вона виділяється у навколишнє середовище у вигляді пари. Маса видаленої з деревини вологи відповідає величині підведеного до неї тепла. Наразі це основний промисловий спосіб сушки технологічної деревини на піролізних підприємствах, який здійснюється у сушильних камерах різних конструкцій [2, 4].

За допомогою підводу до матеріалу теплоти, яка отримана у результаті спалювання палива, здійснюють комбіновану сушку. Через те, що об'єм пари, яка виділилася, прямує з нагрітої деревини у навколишнє середовище та відводиться ним, для сушки необхідно з повітрям підводити тепло та видаляти пароподібну вологу, тобто здійснювати загальну циркуляцію повітря у матеріалі [1].

Матеріали та результати досліджень.

Для дослідження було обрано зразки п'яти порід дерев: бук, береза, дуб, сосна та червоне дерево. Надалі будуть наведені загальні дані щодо одного зразку листвяної породи та одного зразку хвойної (берези та сосни відповідно).

Оброблялися зразки цехового технологічного матеріалу, який пройшов первинну підготовку для столярних цілей та матеріалу, який попередньо був штучним чином максимально насичений вологою. Було досліджено обсяги енергії, необхідні для здійснення сушки заданого зразку деревини до досягнення цільової вологості.

Проведене вивчення процесу сушки визначило необхідність доповнити класичну формулу $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ наступними елементами: енергією, яка витрачається на розігрів деревини, енергією для нагріву вологи до температури кипіння та енергією власне випаровування води зі зразку.

$$Q = c_d \cdot m_d \cdot \Delta T_d + c_v \cdot m_v \cdot \Delta T_v + r_v \cdot m_v, \quad (1)$$

де c_d та c_v – питомі теплоємності деревини та води відповідно, кДж/(кг·К); m_d та m_v – маса деревини та води відповідно, кг; ΔT_d та ΔT_v – різниця температур між кінцевим та початковим станом деревини та води відповідно, К; r_v – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

Сушильний апарат RADWAG розігріває камеру обробки матеріалу до необхідної температури (в нашому випадку, 150 °С) за декілька секунд і саме тому цим часом можна зневажити. Зразок деревинної сировини розігрівається поступово, а отже його температура «запізнюється» відносно температури у камері. Таким чином утворюється градієнт температур. Для того, щоб визначити його рамки у зразки деревини різних порід однакової ваги були поміщені термомпари, які заміряли температури всередині деревини у різних її шарах.

Результати показали, що для досліджуваного зразку будь-якої породи деревини внутрішня температура досягає 90 °С через дві хвилини від початку процесу.

Впродовж наступних 3,5 хвилин температура стабільно, але повільно піднімається до 110 °С, а до десятої хвилини зразок підходить з температурою у 125 °С. Саме з цього місця починається найстабільніший фрагмент процесу безпосередньої сушки деревини з майже невідчутними коливаннями в обидва боки, які зумовлені переходом вологи з одного шару деревини до іншого.

Знаючи температури у товщі зразку, є можливість обчислити енергетичні значення процесу. Маючи певні набори точок замірів температури та кількості вологи у зразку, зроблені через рівномірні проміжки часу, перейдемо від формули вище до формули наступного виду:

$$Q = c_d \cdot m_d \cdot (T_i - T_{i-1}) + c_v \cdot (W - W_i) \cdot (T_i - T_{i-1}) + r_v \cdot (W - W_i). \quad (2)$$

Щоб обрахувати енергію для кожного інтервалу, просумуємо отримані енергетичні значення та продемонструємо загальний вигляд кривої на прикладі зразків сосни та берези, рис. 1 та 2. Вертикальна вісь відображає Q, кДж, а горизонтальна – масу води, яка залишається у матеріалі з плином часу, грамів. Для даних прикладів обраховане значення енергії, яка була витрачена на нагрів зразку з водою та повне випаровування з нього вологи, дорівнює 0,425 кДж для сосни та 0,439 кДж для берези.

Процеси сушки усіх матеріалів відбувалися за однакових умов однієї й тієї ж установки. Кількість часу, що була необхідною для повного висушування зразку, відрізняється для кожного типу порід та серій експериментів. На наведених рисунках вперше запропоновано енергетичні криві для хвойної та листвяної порід дерева.

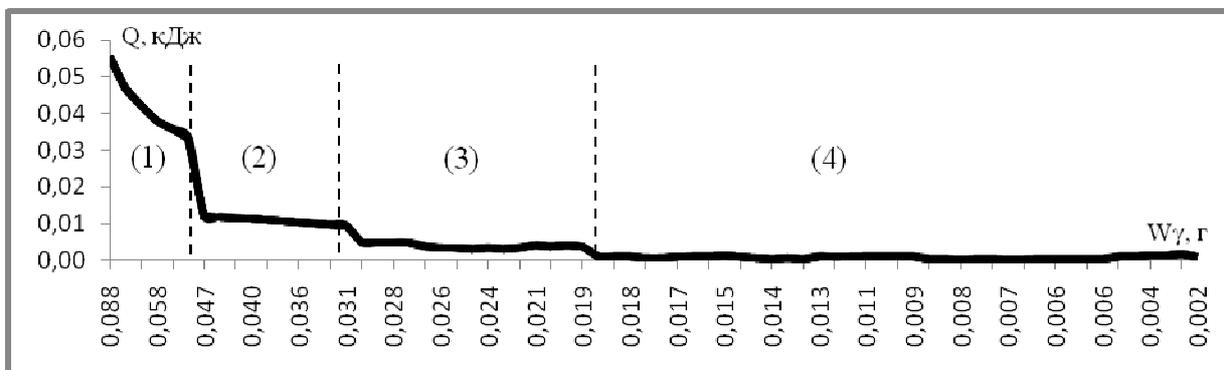


Рисунок 1 – Енергетична крива процесу сушки, характерної для хвойних порід, на прикладі сосни

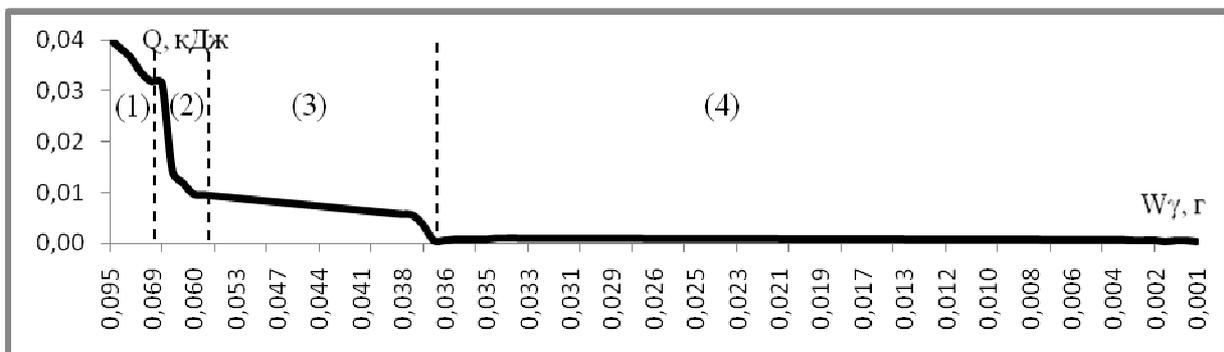


Рисунок 2 – Енергетична крива процесу сушки, характерної для листвяних порід, на прикладі берези

Спільність вигляду кривих полягає у тому, що на рис. 1, 2 ясно простежується послідовність етапів, характерних для сушки деревини.

Першим йде етап підйому температури зразку з випаровуванням вологи поверхневих шарів та початковим прогріванням внутрішніх (1). Волога видаляється з найбільш легкодоступних для потоку повітря ділянок зовнішньої поверхні. За рахунок розкриття проходів для повітря тепло проникає вглиб зразків, завдяки чому матеріали поступово нагріваються зсередини.

Далі слідують два етапи рівномірного та інтенсивного випаровування. Це відбувається за рахунок переміщення вологи з середини матеріалу до його поверхні. Волога внутрішніх шарів приблизно однаковими порціями піднімається догори та виходить назовні. У першій (2) з цих двох етапів за малий проміжок часу видаляється невелика кількість рідини, проте після його закінчення енерговитрати на наступний рівень суттєво зменшуються. В той же час останній з них (3) поступово видаляє вологу, не потребуючи значних витрат енергії.

Етап стабільної сушки зразку закінчує процес, повільно видаляючи залишки вологи з деревини (4). Досягнувши певного значення вологості, сушіння уповільнюється та за умови малого енергоспоживання з товщі деревини поступово витягуються останні об'єми рідини.

Проведені дослідження продемонстрували стадійність процесу сушки та дозволили обрахувати цілові енергетичні значення для заданих умов.

Наведений аналіз дозволяє класифікувати породи за часом сушки та енерговитратами на її реалізацію, порівнявши максимальну та цехову вологості порід деревини наступним чином – таблиці 1 та 2.

Таблиця 1 – Класифікація порід деревини за початковою (максимальною) вологістю

Порода дерева	Умовна відносна вологість, %
Береза	57,7
Червоне дерево	43,9
Дуб	42,5
Бук	39,8
Сосна	20,7

Таблиця 2 – Класифікація порід деревини за кінцевою (цеховою) вологістю

Порода дерева	Умовна відносна вологість, %
Червоне дерево	21,1
Бук	16,8
Береза	9,5
Сосна	8,8
Дуб	6,9

Дані, які наведені у табл. 1, 2 свідчать про те, що найбільш вологосприйнятливою породою серед досліджених зразків є береза, а найменш – сосна. Однак при цьому висихання берези відбувається швидше та інтенсивніше, а отже для її сушки необхідно витратити менший обсяг енергії, аніж для сосни. Задля сушки деревини дуба доведеться застосувати рівномірну температурну сушку, оскільки вона має властивість добре накопичувати вологу та довго від неї позбавляється. Деревину бука слід сушити за умов інтенсивної подачі тепла на першому етапі сушки та поступового зменшення теплового навантаження одразу після його закінчення. Найбільш повільно висихає червоне дерево, потребуючи майже однакових витрат на кожному з етапів енергетичної кривої.

Висновки

Деякі прийоми сушки матеріалів, які існують на сьогоднішній день, є економічно недоцільними. В роботі дана оцінка енерговитрат на реалізацію процесу сушки. За допомогою цього параметру можна визначити більш виправданий підхід до процесу сушки деревини у цілому за рахунок диференціації порід, їхніх властивостей та початкової вологості сировини. Проведення процесу сушки дозволяє обирати один з варіантів підготовки сировини в залежності від потреби виробника: або отримати повністю суху

деревину, на яку доведеться витратити максимальну кількість енергії, або проводити процес до стадії, яка є найбільш вигідною економічно та забезпечує необхідну якість кінцевої продукції.

Література

1. Кречетов И.В. Сушка древесины. Издание 3-е, переработанное / И.В. Кречетов – М.: Издательство «Лесная промышленность», – 1980. – 432 с.
2. Ковернинский И.И. Комплексная химическая переработка древесины: Учебник для вузов / И.И. Ковернинский, В.И. Комаров, С.И. Третьяков, Н.И. Богданович, О.М. Соколов и др. – Архангельск: Издательство АГТУ, – 2002. – 347 с.
3. Ведь В.Е. Краткий обзор технологий углежжения и пиролиза древесного сырья / В.Е. Ведь, А.Н. Миронов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Тези доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції. Частина III – Харків: НТУ «ХПІ», – 2014. – С. 11.
4. Выродов В.А. Технология лесохимических производств: Учебник для вузов / В.А. Выродов, А.Н. Кислицын и др. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 352 с.

Bibliography (transliterated)

1. Krechetov I.V. Sushka drevesinyi. Izdanie 3-e, pererabotannoe. I.V. Krechetov – M.: Izdatelstvo «Lesnaya promyshlennost», – 1980. – p. 432.
2. Koverninskiy I.I. Kompleksnaya himicheskaya pererabotka drevesinyi: Uchebnik dlya vuzov I.I. Koverninskiy, V.I. Komarov, S.I. Tretyakov, N.I. Bogdanovich, O.M. Sokolov i dr. – Arhangelsk: Izdatelstvo AGTU, – 2002. – p. 347.
3. Ved V.E. Kratkiy obzor tehnologiy uglezhzheniya i piroliza drevesnogo syrya. V.E. Ved, A.N. Mironov. Informatsiyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya. Tezi dopovidey XXII mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi. Chastina III – Harkiv: NTU «HPI», – 2014. – p. 11.
4. Vyirodov V.A. Tehnologiya lesohimicheskikh proizvodstv: Uchebnik dlya vuzov V.A. Vyirodov, A.N. Kislitsyin, M.I. Gluharyova i dr. – M.: Lesnaya promyshlennost, 1987. – p. 352.

УДК 674.8

Ведь В.Е., Миронов А.Н., Ровенский А.И.

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ ДЛЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ

В рамках выработки правильной методологии процесса сушки древесного сырья проведены исследования касательно объёмов энергии, необходимых для достижения целевых характеристик образцов. Дана оценка энергозатрат на реализацию процесса сушки с дифференциацией пород древесины, их свойств и начальной влажности сырья.

Ved V.E., Mironov A.N., Rovenskiy A.I.

ESTIMATION OF ENERGY CONSUMPTION FOR THE DRYING PROCESS OF WOOD RAW MATERIAL

Within the framework of developing the correct methodology for the drying process of wood raw material researches on the amount of energy needed to achieve the performance targets of the samples is conducted. The estimation of the energy consumption for the implementation of the drying process with differentiation of wood species, its properties and the initial moisture content of raw materials is given.

**РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ
ТЕРНАРНЫХ СПЛАВОВ КОБАЛЬТА С ТУГОПЛАВКИМИ КОМПОНЕНТАМИ****Введение**

В последнее время повышенное внимание исследователей обращено на создание и разработку технологий получения покрытий с полифункциональными свойствами (высокой каталитической активностью, микротвердостью, электропроводностью, износо- и коррозионной стойкостью, пластичностью, отражательной способностью, декоративным видом и т.д.), что позволит решить вопросы энерго- и ресурсосбережения, а также экологической безопасности.

Технологические варианты нанесения металлических покрытий могут быть весьма разнообразными, в частности «горячий», диффузионный, металлизационный, механотермический, химический, гальванохимический, хотя доминантой является последний. К его достоинствам можно отнести простоту и удобство аппаратного оформления, контроля и управления параметрами покрытий, возможность получения многослойных осадков, что весьма важно в условиях массового производства. К тому же, некоторые покрытия можно получать только электрохимическим способом, а другие пути либо экономически менее эффективны, либо не могут быть реализованы. Особенно это актуально для покрытий сплавами, одним из компонентов которых является тугоплавкий элемент, такой как вольфрам, ванадий или молибден, востребованность которых определяется рядом обстоятельств:

– бинарные и тернарные сплавы кобальта с молибденом и вольфрамом могут служить альтернативой покрытиям твердым хромом [1, 2], нанесение которых проводят из электролитов на основе соединений Cr (VI), в виду высокой токсичности отнесенных экологически опасному гальваническому производству 1-го класса [3];

– весьма эффективным представляется их использование для замены каталитических материалов на основе металлов платиновой группы, поскольку их дефицит, высокая стоимость, а также безвозвратные потери в процессе эксплуатации делают все более актуальной проблему поиска путей и способов их полной или частичной замены в каталитических системах [4–6].

Материалы и методы исследования

Покрытия синтезировали из полилигандного электролита электрохимическим методом в стационарном и импульсном режимах [3, 7]. Поляризацию проводили униполярным током при плотностях от 2 до 10 А/дм², частоту варьировали от 19 до 910 Гц, а температуру электролита (для сплава Co-Mo-W) от 293 до 343 К. Режимы электроосаждения задавали от потенциостата ПИ-50-1,1 с программатором ПР-8. В качестве растворимых анодов использовали кобальтовые пластины. Растворы готовили из аналитически чистых реактивов, которые растворяли в небольшом количестве дистиллированной воды, после чего раствор смешивали в определенной последовательности и доводили дистиллированной водой до заданного объема. Значение pH в интервале 8–10 корректировали введением гидроксида калия.

Химический состав покрытий определяли рентгенофлуоресцентным методом с использованием портативного спектрометра «СПРУТ». Анализ проводили минимум в 3 точках с последующим усреднением полученных значений. Элементный состав и морфологию поверхности покрытий анализировали сканирующим электронным микроскопом ZEISS EVO 40XVP. Изображения получали при помощи регистрации вторичных электронов путем сканирования электронным пучком, что позволило исследовать топографию с высокой разрешающей способностью и контрастностью [8]. Погрешность измерения содержания компонентов составляла ±1 масс. %.

Шероховатость покрытий определяли с помощью атомно-силового зондового микроскопа (АСМ) NT-206. Участки для сканирования выбирали в верхней, нижней и средней частях образца на расстоянии 1500 мкм друг от друга. Сканирование проводили контактным методом, используя зонд CSC-37, кантиливер В с латеральной разрешающей способностью 3 нм [9].

Микротвердость по Виккерсу (H_v) покрытий сплавами кобальт – вольфрам – молибден, а также материала подложки определяли методом вдавливания алмазной пирамиды на твердомере ПМТ - 3 при нагрузке $P = 0,2$ кг и времени выдержки 10 с. Эксперимент проводили после 24 часового старения покрытий при комнатной температуре. Значение H_v вычисляли по формуле:

$$H_v = 1854P / d^2,$$

где d – диагональ вдавливания пирамиды, мкм. Измерения проводили минимум в 3 точках с последующим усреднением данных, доверительный интервал составил ± 10 . Толщина покрытий сплавами для анализа составляла не менее 30 мкм.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования влияния режимов электролиза на состав, структуру и морфологию поверхности электролитических покрытий Co–Mo–W, а также установление их взаимосвязи с физико-механическими и физико-химическими свойствами синтезированных сплавов являются основой для формирования рекомендаций по применению материалов. Установлено, что на микрофотографиях при невысоких увеличениях четко видна равномерность поверхности электроосажденных покрытий Co–Mo–W, а также мелкие дефекты в виде участков выхода пузырьков водорода во время электролиза. Повышение содержания тугоплавкого компонента в сплавах способствует аморфизации покрытий (рис. 1), которое визуализируется как постепенное уменьшение размера зерна с ростом $\omega(W, Mo)$.

Из анализа микрофотографий (рис. 1, а и б) следует, что при увеличении плотности тока покрытия становятся более мелкокристаллическими, однако возрастают внутренние напряжения, о чем свидетельствуют появление сетки трещин в покрытии, а при плотностях тока ≥ 10 А/дм² (рис. 1, в) происходит аморфизация структуры покрытий, сопровождающаяся дальнейшим ростом внутренних напряжений.

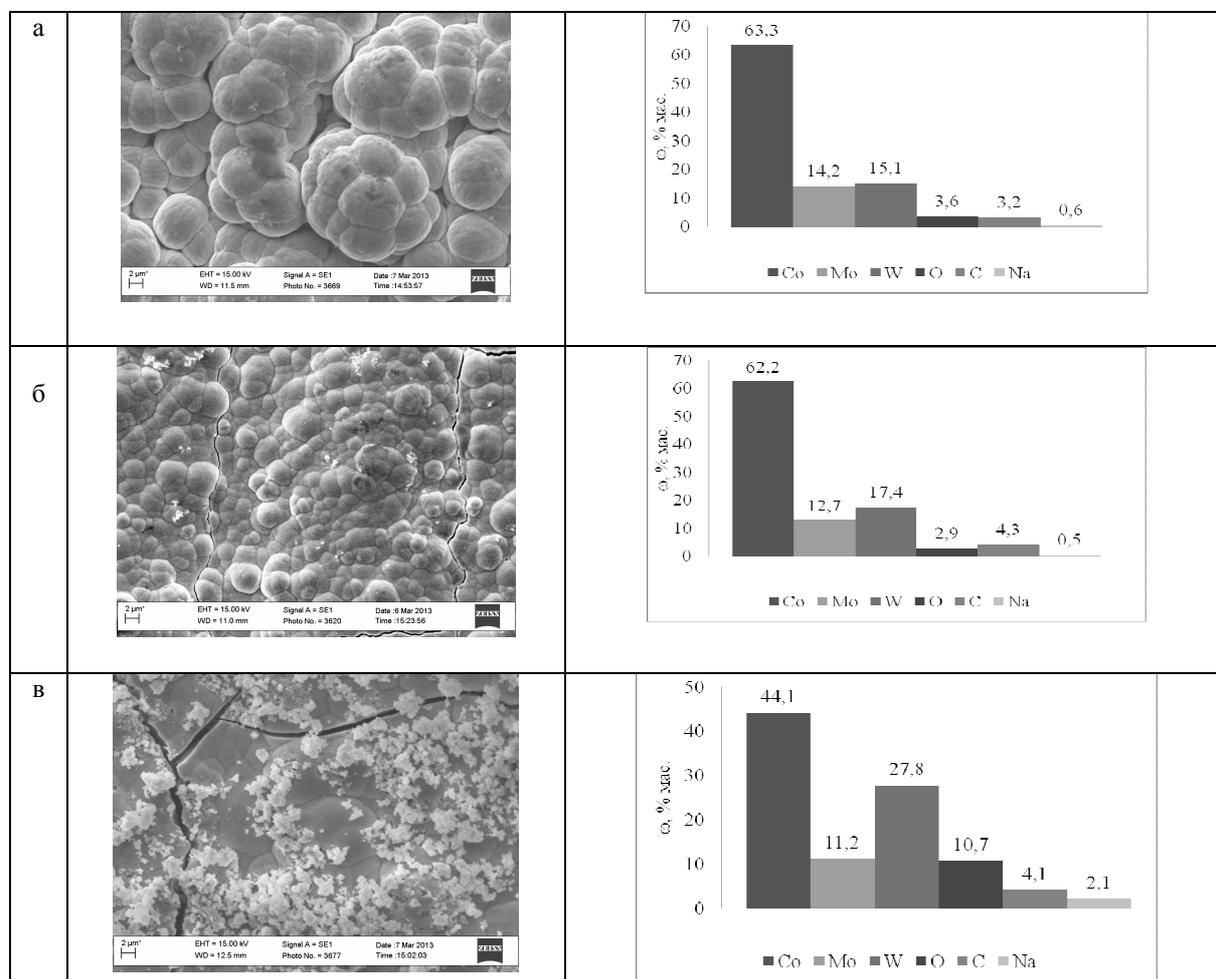


Рисунок 1 – Микрофотографии (x 2000) и состав поверхности сплава Co-Mo-W, осажденного в импульсном режиме при плотностях тока, А/дм²: а – 4 , б – 7, в – 10

Исследование морфологии синтезированных покрытий (рис. 2) с применением атомно-силовой микроскопии позволило оценить размер зерен и ассоциатов, а также степень развития поверхности полученных пленок. Установлено, что при содержании тугоплавких компонентов на уровне 18 % мас. размер

кристаллитов складає до 600 нм, що багато нижче, ніж у покриттів сплавами з меншим вмістом вольфраму та молибдена.

Топологія поверхні сплава Co–Mo–W з вмістом тугоплавких компонентів $\omega(W, Mo) \leq 18\%$ відображає його аморфну структуру, т.к. відсутні чіткі очертання глобул, а поверхня дуже однорідна. Іменно аморфізацією структури тернарного сплаву можна пояснити високі значення мікротвердості покриття (таблиця 1).

Так, мікротвердість покриттів Co–Mo–W (МН/м²) в залежності від співвідношення компонентів в сплаві становить 350–1100, тоді як для окремих сплавоутворюючих компонентів багато нижче: $H_v(Co) = 130$, $H_v(W) = 350$, $H_v(Mo) = 150$.

Інтересно відзначити, що застосування імпульсного електролізу дозволяє підвищити мікротвердість покриттів сплавом ідентичного складу в порівнянні з гальваностатическим режимом нанесення.

Таблиця 1 – Мікротвердість по Вікерсу гальванічних покриттів сплавами

$\omega(Mo)$, мас. %	$\omega(W)$, мас. %	H_v , МН/м ²
0	21	479
10,6	15,1	350
16,1	13,8	420
18,8	12,9	1100

Мікротвердість покриттів сплавами Co–Mo–W зростає з збільшенням загального вмісту тугоплавких компонентів. Для порівняння відзначимо, що H_v електролітичних покриттів хромом, технологія яких передбачає використання розчинів на основі Cr (VI), знаходиться в діапазоні значень 700–850 МН/м² в залежності від умов отримання.

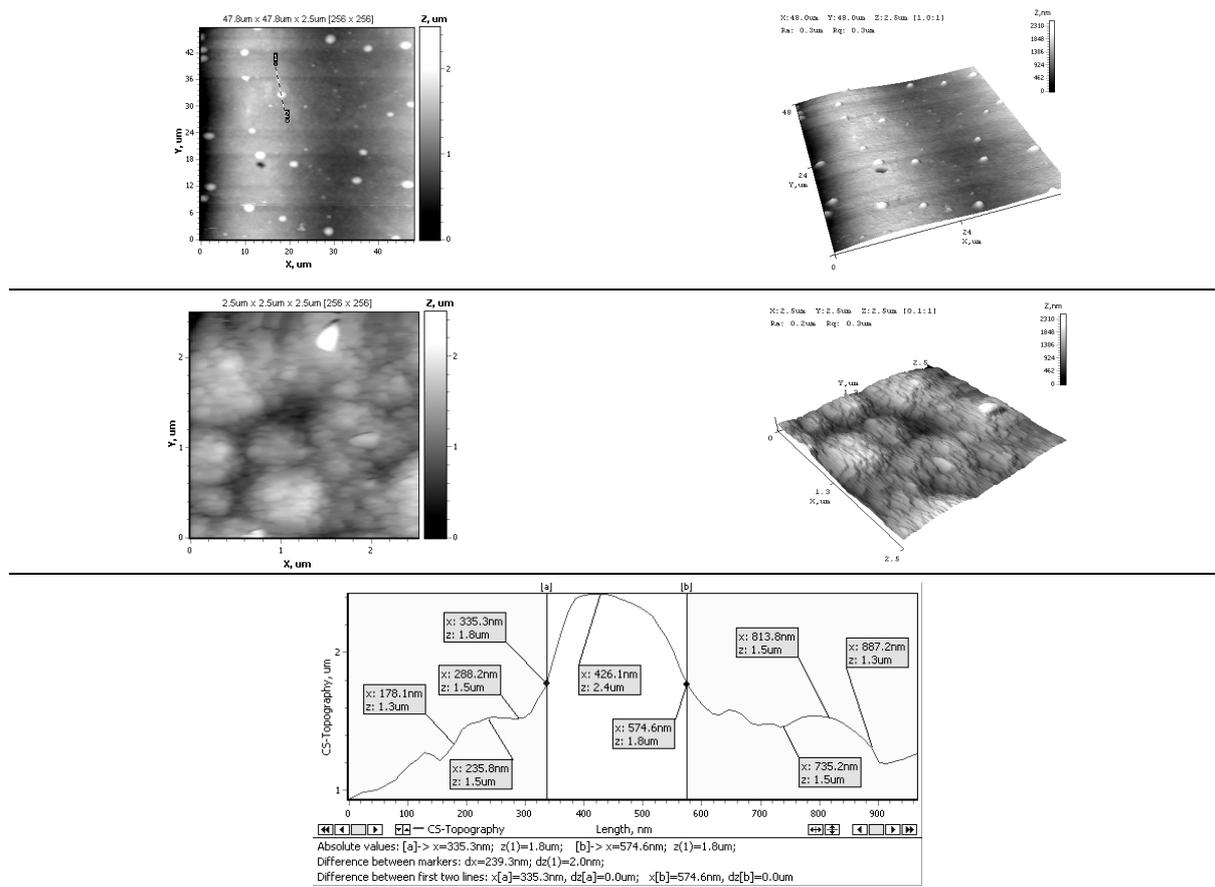


Рисунок 2 – АСМ-топология поверхности осажденного в импульсном режиме сплава кобальт-молибден-вольфрам с $\omega(W, Mo) \leq 17\%$ масс

Выводы

Установлено, что из полилигандного электролита в условиях стационарного и нестационарного электролиза осаждаются компактные полифункциональные покрытия сплавом Co–Mo–W. Варьирование энергетических и временных параметров электролиза позволяет управлять составом, структурой и свойствами осадков. Благодаря широкому спектру физико-химических и физико-механических характеристик гальванически синтезированные многокомпонентные сплавы на основе кобальта с тугоплавкими металлами могут служить альтернативой покрытиям драгоценными металлами и хромом. Использование предложенных подходов к формированию функциональных покрытий сплавами создает предпосылки для разработки ресурсо- и энергосберегающих гальванохимических технологий, а также снижения экологической нагрузки на окружающую среду.

Литература

1. Экологические аспекты гальванохимических процессов нанесения покрытий сплавами тугоплавких металлов / Ю.К. Гапон, М.В. Ведь, Н.Д. Сахненко, Т.А. Ненастина // Экология и промышленность. – Харьков: ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», 2014.– Т. 2(39). – С. 74–77.
2. Каталитическая активность электролитических сплавов кобальта в реакции выделения водорода / Ю.К. Гапон, М.А. Глушкова, А.С. Шепеленко [и др.] // Актуальные проблемы теории и практики электрохимических процессов. – Саратов : СГУ, 2014. – Т.2.– С. 145–150.
3. Костин Н.А. Импульсный электролиз сплавов / Костин Н. А., Кублановский В.С.– К. : Наукова думка, 1996.– 202 с.
4. Ефремов В.Н. Основы приготовления и формирования никель-медных каталитических систем на различных носителях и промышленные катализаторы на их основе / В.Н. Ефремов, Е.З. Голосман // Кинетика и катализ. – 2006. – Т. 47, № 5. – С. 805–817.
5. Биметаллические Co–Pt катализаторы окисления углерода в водородсодержащих смесях / П.В. Снытников, К.В. Юсенко, С.В. Коренев [и др.] // Кинетика и катализ.– 2007.– Т. 48, № 2.– С. 292–297.
6. Окисление СО на платино-молибденовых электродах / А.А. Михайлова, А.А. Пасынский, Ж.В. Доброхотов // Электрохимия. – 2008. – Т. 44, № 3. – С. 326–335.
7. Патент на корисну модель № 81121, Украина, МПК C25D 3/56 (2006.01) Электролит для формирования покрытий сплавом кобальт-молибден-вольфрам / Сахненко М.Д., Ведь М.В., Зюбанова С.І., Гапон Ю.К.; Заявник та власник патенту НТУ «ХПИ», опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12.
8. Корний С.А. Анодное растворение граней монокристалла меди в хлоридсодержащей водной среде // Физико-химическая механика материалов, 2003.– № 2.– С. 118–119.
9. Снежко Д.В. Использование сканирующей зондовой микроскопии при разработке электрохемилюминесцентных нанотехнологических сенсоров // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тез. докл. IX Междунар. конф. (Минск, 12–15 октября 2010 г.). – Минск : БГУ, 2010 г. – С. 156.

Bibliography (transliterated)

1. Ekologicheskie aspekty galvanohimicheskikh protsessov naneseniya pokrytity spлавami tugoplavkikh metallov. Yu.K. Gapon, M.V. Ved, N.D. Sahnenko, T.A. Nenastina. Ekologiya i promyishlennost. –Harkov: GP «UkrNTTs «Energostal», 2014.– Т. 2(39). – P. 74–77.
2. Kataliticheskaya aktivnost elektroliticheskikh spлавov kobalta v reaktsii vyideleniya vodoroda. Yu.K. Gapon, M.A. Glushkova, A.S. Shepelenko [i dr.]. Aktualnyie problemyi teorii i praktiki elektrohimicheskikh protsessov. – Saratov : SGU, 2014. – Т.2.– P. 145–150.
3. Kostin N.A. Impulsnyiye elektroliz spлавov. Kostin N. A., Kublanovskiy V.S.– K.: Naukova dumka, 1996.– 202 p.
4. Efremov V.N. Osnovyi prigotovleniya i formirovaniya nikel-mednyih kataliticheskikh sistem na razlichnyih nositelyah i promyishlennyye katalizatoryi na ih osnove. V.N. Efremov, E.Z. Golosman. Kinetika i kataliz. – 2006. – Т. 47, # 5. – P. 805–817.

5. Bimetallicheskie Co–Pt katalizatoryi okisleniya ugleroda v vodorodsoderzhaschih smesyah. P.V. Snyitnikov, K.V. Yusenko, S.V. Korenev [i dr.]. Kinetika i kataliz.– 2007.– Т. 48, # 2.– P. 292–297.
6. Okislenie SO na platino-molibdenovyih elektrodah. A.A. Mihaylova, A.A. Pasyinskiy, Zh.V. Dobrohotov. Elektrokhimiya. – 2008. – Т. 44, # 3. – P. 326–335.
7. Patent na korisnu model # 81121, Ukraina, MPK S25D 3/56 (2006.01) Elektrolit dlya formirovaniya pokrytitiy splavom kobalt-molibden-volfram. Sahnenko M.D., Ved M.V., Zyubanova S.I., Gapon Yu.K.; Zayavnik ta vlasnik patentu NTU “HPI”, opubl. 25.06.2013, Byul. # 12.
8. Korniy S.A. Anodnoe rastvorenne graney monokristalla medi v hloridsoderzhaschey vodnoy srede. Fiziko-himicheskaya mehanika materialov, 2003.– # 2.– P. 118–119.
9. Snezhko D.V. Ispolzovanie skaniruyushey zondovoy mikroskopii pri razrabotke elektrohemilyuminestentnyih nanotekhnologicheskikh sensorov. Metodologicheskie aspektyi skaniruyushey zondovoy mikroskopii: tez. dokl. IX Mezhdunar. konf. (Minsk, 12–15 oktyabrya 2010 g.). – Minsk : BGU, 2010 g. – P. 156.

УДК 621.35

Гапон Ю.К., Ведь М.В., Сахненко М.Д., Ненастіна Т.О., Долженко Ю.І.

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ОСАДЖЕННЯ ТЕРНАРНИХ СПЛАВІВ КОБАЛЬТУ З ТУГОПЛАВКИМИ КОМПОНЕНТАМИ

Запропоновано екологічно безпечну ресурсозберігаючу технологію отримання поліфункціональних покриттів сплавами кобальту з тугоплавкими металами. Досліджено вплив режимів електролізу на склад, структуру і морфологію поверхні електролітичних покриттів кобальт – молібден – вольфрам. Результати атомно-силової і сканівної електронної мікроскопії довели, що отримані покриття мають щільну і дрібнокристалічну структуру.

Gapon Yu.K., Ved' M.V., Sakhnenko N.D., Nenastina T.A., Dolzhenko Yu.I.

RESOURCE SAVING TECHNOLOGY THE ELECTROCHEMICAL DEPOSITION OF TERNARY ALLOYS OF COBALT WITH REFRACTORY COMPONENT

Environmentally friendly and resource-saving technology for producing multifunctional coatings cobalt alloys with refractory metals are proposed. Influence of electrolysis modes on the composition, structure and morphology of the surface of electrolytic coatings cobalt – molybdenum – tungsten are study. The results of atomic force and scanning electron microscopy showed that the coatings have a dense and fine-grained structure.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОВЕРШЕНСТВА ТРАНСПОРТНЫХ САМОЛЕТОВ

Введение

Специфической особенностью начального этапа проектирования технических систем, является частая необходимость принятия решений в условиях неопределенности. В этих условиях риск допущения ошибок разработчиком чрезвычайно велик, что может поставить под угрозу успех реализации всего проекта, а также чревато существенными временными и материальными потерями [1]. Снижение уровня такого риска может быть достигнуто применением разных подходов, среди которых важное место занимают методы теории принятия решений, формальные методы теории полезности и теории статистических решений [2, 3, 4]. Опираясь такими понятиями, как «полезность решения», «альтернативное решение», «решающее правило» все они направлены в той или иной мере на формализацию процесса выбора варианта решения, в первую очередь, задач средней сложности или узко специализируемых задач. Для решения более сложных задач используются методы имитационного моделирования [5], в основе которых лежит знание исследователем внутреннего взаимодействия в сложных технических системах или подсистемах в границах сложной технической системы, а также взаимодействия системы и ее составляющих с внешней средой.

Актуальность

Проблема вскрытия этих связей является ключевой проблемой при формировании системы показателей характеризующих качество проектируемых систем и, как показано в работах [6, 7], не может быть решена без предварительного формирования и использования баз данных исследуемых классов объектов и баз знаний, содержащих модели возможных решений, относящихся к объектам данных классов. Ее решение позволяет вплотную приблизиться к решению проблемы осуществления интегральной оценки сложных технических систем посредством комплексирования отдельных показателей, что является чрезвычайно актуальным при создании формализованного аппарата принятия решения, в частности, в авиационной отрасли.

Цель работы

Разработка регулярного подхода к решению задачи оценки технического совершенства при параметрическом синтезе транспортных самолетов на основе обобщенных показателей, их комплексирования для получения дополнительной информации при принятии инженерно-конструкторских решений на начальном этапе проектирования.

Основной материал статьи

Интерес к подобного рода исследованиям особенно возрос в последние десятилетия, в связи с необходимостью создания авиационных систем, обладающих более сложной и развитой, по сравнению с ранними образцами, структурой, способных решать комплексные задачи, интегрироваться в системы более высокого уровня. Композиционный подход к созданию таких систем является малоэффективным ввиду проявления «интегративного эффекта» [7], суть которого состоит в невозможности применения здесь классических методов оптимизации ввиду многомерности задачи. Однако, представляется целесообразным применение подхода, изложенного в работах [8, 9], особенностью которого является формирование иерархической структуры показателей системы.

В основе такой структуры лежит перечень базовых показателей летательного аппарата как сложной технической системы, классифицированных по признакам, которые отражают ключевые свойства объекта исследования и систем, характеризующих его целевое назначение, а в вершине – показатели, которые интегрально оценивают уровень технического совершенства летательного аппарата в целом. Другие уровни структуры формируются путем выявления связей между отдельными показателями, начиная с показателей непосредственно базового уровня. При переходе от уровня к уровню предполагается, что показатели все более укрупняются, охватывая все новые и новые свойства системы. Таким образом удастся подойти к задаче формирования концепции перспективного летательного аппарата, в частности транспортного назначения, в значительной мере устранив недостаток композиционного подхода.

Состоятельность представленного выше подхода подтверждается целым рядом работ отечественных и зарубежных исследователей, в том числе и касающихся авиационной отрасли. Так, работах [9, 10] предложено использовать показатели, позволяющие осуществлять интегральную оценку транспортных летательных аппаратов (ЛА) как сложных технических систем, комплексно учитывая при этом, как внут-

ренние свойства последних (показатель интеграции – $\Pi_{инт}$), так и их целевое назначение (показатель эффективности транспортного ЛА – $NP_{втс}$). Выражения для указанных показателей имеют вид:

– для показателя интеграции:

$$\Pi_{инт} = 0,1 \frac{P_{кр}^{cy}}{M_{втс} S_{нп}} \frac{S_M}{C_{x_2}}. \quad (1)$$

– для показателя эффективности:

$$NP_{втс} = \left(1 - \frac{M_{пн}}{M_{втс}}\right) \times \frac{D_{100}}{V_{кр}} N_{кр}^{cy}. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) введены следующие обозначения: $N_{кр}^{cy}, P_{кр}^{cy}$ – мощность и тяга силовой установки ЛА на крейсерском режиме полета соответственно, в дальнейшем $N_{кр}$ и $P_{кр}$; $M_{втс}$ – полная масса транспортного ЛА; $S_{нп}$ – площадь несущей поверхности ЛА (далее примем $S_{нп} = S_{кр}$, где $S_{кр}$ – площадь крыла самолета); C_{x_2} – аэродинамическое сопротивление гондолы в системе планера ЛА на режиме максимальной дальности полета последнего; S_M – площадь миделя транспортного ЛА; $M_{пн}$ – масса полезной (коммерческой) нагрузки; D_{100} – дальность полета транспортного ЛА, которая равняется 100 км; $V_{кр}$ – крейсерская скорость полета самолета.

Показатель (1) разработан для оценки качества интеграции силовой установки и планера транспортного самолета и лишь частично учитывает изменения, вносимые силовой установкой в аэродинамику всего планера. Целесообразно выполнить замену C_{x_2} на C_{x_0} – минимальное значение коэффициента лобового сопротивления планера ЛА. В этом случае получим модифицированный показатель, который характеризует отношение таких характеристик ЛА, как удельная тяга и удельный коэффициент аэродинамического сопротивления планера ЛА, отнесенный к единице площади несущей поверхности последнего, то есть

$$\Pi_{инт}^{(м)} = 0,1 \times \left(\frac{P_{кр}^{cy} / M_{втс}}{C_{x_0} / S_M} \right) \times \frac{1}{S_{кр}}. \quad (3)$$

Логика формирования показателей (2) и (3) в аспекте всего выше сказанного приведена на схеме рис. 1. На схеме также отмечены иерархические уровни показателей. Остается открытым вопрос, касающийся непосредственно механизма формирования соответствующих уровней, который большей степенью базируется на знаниях и интуиции специалистов, непосредственно выполняющих исследования. Тем не менее и этот этап может быть формализован. Так, в табл. 1 приведена корреляционная матрица по значениям элементов которой можно судить о связи между базовыми (единичными) показателями, что, безусловно, является важным результатом для формирования показателей следующего уровня – относительных или удельных показателей. И хотя коэффициенты корреляции, являющиеся элементами искомой матрицы, определяются из условия линейной зависимости между парами показателей, тем не менее, превышение значения 0,8 является достаточным основанием для последующих исследований форм этой связи.

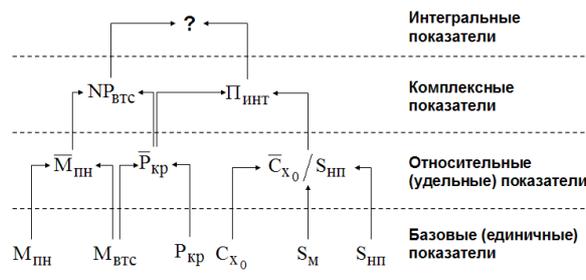


Рисунок 1 – Схема формирования показателей совершенства транспортного ЛА

Необходимо отметить также полезность разбиения показателей по группам. Так, можно выделить три группы: массовые характеристики; геометрические характеристики; тяговые и аэродинамические характеристики. Разбиение упрощает классификацию показателей последующего уровня. При этом если исследуется зависимость показателей одной группы, тогда имеет место процесс формирования относительных показателей, если показатели относятся к разным группам – то изучается процесс формирования удельных показателей. Это хорошо иллюстрирует анализ связей, для которых коэффициенты парной корреляции близки к 0,9 и превышающие это значение, что означает линейную зависимость между параметрами и дает основания утверждать, что второй уровень схемы рис. 1 должен содержать относительные показатели $M_{nn} / M_{вмс}$; $S_m / S_{кр}$ и удельную тягу по массе $P_{кр} / M_{вмс}$ (значения коэффициентов корреляции для этих сочетаний выделены жирным шрифтом).

Таблица 1 – Корреляционная матрица показателей базового (единичного) уровня

	Мпн, кг	Мвтс, кг	Снп, м ²	См, м ²	Ркр, кгс	Сх ₀
Мпн, кг	1					
Мвтс, кг	0,871	1				
Снп, м ²	0,858	0,990	1			
См, м ²	0,773	0,953	0,959	1		
Ркр, кгс	0,652	0,853	0,865	0,839	1	
Сх ₀	-0,361	-0,374	-0,396	-0,293	-0,291	1

Разработанный подход к формализации процесса формирования уровней показателей, несмотря на полученные результаты, все же требует дополнительного исследования. Основанием к такому выводу служит наблюдающееся снижение его эффективности по уровням приведенной схемы, что объясняется возникновением других форм связи между показателями, существенно отличающихся от линейной. Поэтому в дальнейшем целесообразно применение альтернативных методов классификации, например, методов канонического анализа, причинного моделирования.

Формирование уровня относительных, а в дальнейшем и комплексных показателей, позволяет перейти к интегральной оценке транспортных самолетов, учитывающей степень его технологического и целевого совершенства. Для этого выполним комплексирование уже имеющихся показателей $\Pi_{инт}$ и $NP_{вмс}$. В качестве исходных данных используется информация об отечественных и зарубежных транспортных самолетах, представленная в табл. 2. Данные получены из репрезентативных источников (официальные издания сборников ЦАГИ, технических описаний, инструкций, руководств, выпусков), например [11, 12], и поэтому имеют высокий уровень доверия, что позволяет прогнозировать удовлетворительный уровень достоверности последующих выводов.

Интегральный показатель (Π_{Σ}) представим в виде суммы искомых показателей.

Ввиду невозможности прямого суммирования данных показателей из-за различия в размерностях требуется приведение $NP_{вмс}$ и $\Pi_{инт}$ к единому масштабу, что может быть выполнено нормировкой последних. Выбор нормы осуществляется исходя из конкретных соображений, либо основываясь на специальных рекомендациях. В качестве нормы может быть выбран максимальный экономически и технологически достижимый уровень показателей. При этом выражение для интегрального показателя запишем в следующем виде:

$$\Pi_{\Sigma} = A \times NP_{вмс} + B \times \Pi_{инт}, \quad (4)$$

или с учетом выражений (2) и (3)

$$\Pi_{\Sigma} = A \times D_{100} P_{кр}^{cy} - A \times D_{100} P_{кр}^{cy} \frac{M_{nn}}{M_{вмс}} + B \times \frac{0,1 P_{кр}^{cy} / M_{вмс}}{\bar{C}_{x_0} S_{кр}}. \quad (5)$$

Здесь введены следующие замены $P_{кр} = N_{\delta вкр} / V_{кр}$, $\bar{C}_{x_0} = C_{x_0} / S_m$ – удельный коэффициент лобового сопротивления.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Таблица 2 – Фрагмент базы данных характеристик транспортных самолетов

Тип ВС	Кол-во АД	Ркр, кгс	Мвтс, кг	Мгр, кг	Скр, м ²	Сго, м ²	Смид, м ²	Сх ₀
Ил-62М	4	2750	165000	23000	279	40	12,2	0,021
Ил-76	4	2920	170000	48000	300	60,3	18,1	0,023
Ил-86	4	1730	215000	42000	330	96,5	29	0,021
Ил-96-300	4	3500	240000	40000	391,6	96,5	29	0,022
Ан124	4	4860	392000	120000	628	166,7	46,35	0,022
Боинг 707-320С	4	2060	151320	84550	268,7	58,06	12,78	0,02
Боинг 747-200F	4	4920	365150	113400	557	136,6	40	0,0194
DC-8-61	4	1930	147420	78470	267,8	51,4	12,1	0,021
Як-42	3	1350	54000	14500	150	29,5	11	0,022
Ту-154	3	2803	100000	18000	201	42	14,4	0,022
Як-40	3	450	16100	3200	70	13,03	4,5	0,024
Боинг-727-200	3	1950	76658	17885	166,1	34,93	12,55	0,0202
DC-10-10	3	4030	206400	44675	381	124,3	29,2	0,0185
DC-10-40	3	5027	259460	48330	390,1	124,3	29,2	0,0239
Локхид L-1011-1 Тристар	3	4200	195050	37870	353	119,1	27,6	0,0229
Хуокер Сидли Трайдент 2Е	3	1365	65320	13430	141,7	28,8	10,8	0,0169
Ту-204	2	3500	93500	21000	168,6	43,875	12,325	0,021
Ту-134	2	1631	47600	9000	127,3	30,68	6,6	0,02
Ан-74	2	1350	33000	10000	98,6	24,5	7,5	0,0313
Бе-200	2	1920	41000	5000	117,44	24,92	6,5	0,028
Ту-334-100	2	1500	47900	12000	83,226	22,02	12,325	0,033
Ан-148-100Е	2	1500	37780	9000	87,32	18,87	9,774	0,03
Боинг-737-100	2	1912	47174	13154	102,96	28,8	11,8	0,0217
DC-9-50	2	1890	54885	15270	93	25,6	10,7	0,0237

Представление интегрального показателя в виде выражения (5) позволяет решить задачу, связанную с развитием транспортных самолетов, как отдельного класса летательных аппаратов, путем определения степени взаимосвязи основных технических характеристик и показателей транспортных самолетов; выявить резервы их повышения и приоритетные направления развития транспортных самолетов.

Рассмотрим задачу увеличения грузоподъемности транспортного самолета, что является одним из приоритетных направлений развития транспортной авиации.

Увеличение грузоподъемности неизбежно приводит к увеличению взлетной массы $M_{вмс}$, как за счет непосредственно роста $M_{тн}$, так и за счет увеличения массы конструкции летательного аппарата, что выражается увеличением $M_{ла}$. Последнее непосредственно связано с увеличением объема грузовой кабины и необходимостью обеспечения заданного значения удельной нагрузки на крыло $M_{вмс} / S_{кр}$, достигнутое значение которого составляет порядка 650–700 кг/м² и объективно может трактоваться как конструктивно-технологическое ограничение для современных транспортных самолетов, а также необходимостью, по крайней мере, не ухудшения коэффициента лобового сопротивления планера C_x , что обеспечивается применением соответствующих компоновочных решений.

Увеличение массы $M_{вмс}$ требует увеличения скорости полета самолета, а следовательно тяги силовой установки, что может быть достигнуто, как за счет повышения тяговых характеристик непосредственно авиационных двигателей, так и за счет увеличения количества двигателей в составе силовой установки транспортного самолета.

Поскольку современный технологический предел по тяге для ТРДД составляет величину порядка 5000 кгс, то начиная с $M_{вмс} \geq 180-200 т$. дальнейшее увеличение массы может быть компенсировано исключительно за счет увеличения $n_{дв}$. Фактор тяги является определяющим в изменении показателя $NP_{вмс}$.

Его зависимость от $M_{вмс}$ и $n_{дв}$ приведена на рис.2. Особенностью зависимости является то, что для транспортных самолетов с числом двигателей $n_{дв} = 2-3$ она может быть с высокой степенью приближения ($R^2 = 0,97$) аппроксимирована линейной функцией вида:

$$NP_{вмс} = 82,795 + 0,0045 \times M_{вмс} \text{ [МДж]}. \quad (6)$$

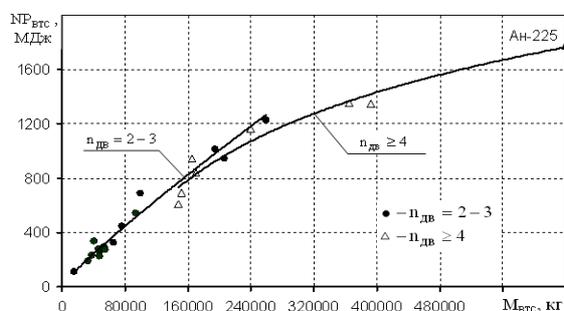


Рисунок 2 – Зависимость тяги силовой установки от взлетной массой транспортного самолета

В то же время для самолетов с $n_{дв} \geq 4$ связь между указанными показателями с уровнем приближения $R^2 = 0,95$ может быть описана логарифмической зависимостью вида:

$$NP_{вмс} = -7675,7 + 706,14 \ln M_{вмс} \text{ [МДж]}. \quad (7)$$

Наблюдается изменение темпа роста $NP_{вмс}$ с увеличением $M_{вмс}$, что может быть связано с нелинейностью второго и третьего слагаемого выражения (5) по отношению к $M_{вмс}$. Основная причина нелинейности, по видимому, кроется в увеличении относительной массы $\bar{M}_{ли}$ ввиду перехода, начиная с $M_{вмс} \approx 160-200$ т., к массовому использованию широкофюзеляжных транспортных самолетов.

С ростом тяги силовой установки из-за увеличения $n_{дв}$ следовало бы ожидать увеличения значение тяговооруженности самолета. Однако этого не происходит, так как интенсивность роста $M_{вмс}$ по мере увеличения грузоподъемности транспортных самолетов несколько превосходит прирост тяги $n_{дв} P_{кр}$. В результате, наблюдается даже некоторое снижение тяговооруженности, нижнее значение которого с ростом $M_{вмс}$ приближается к минимально-допустимому уровню, который, согласно статистическим данным для крейсерского режима полета современных тяжелых транспортных самолетов с ТРДД лежит в пределах 0,045–0,04 (рис. 3).

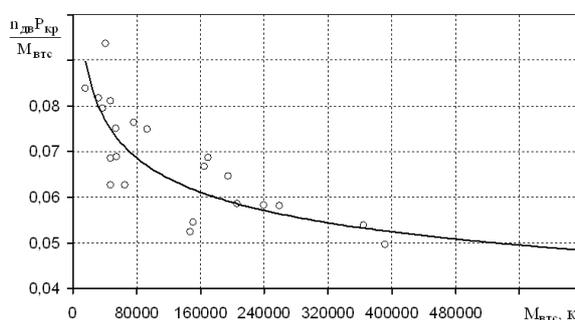


Рисунок 3 – Зависимость тяговооруженности транспортных самолетов на крейсерском режиме полета от взлетной массы

При этом снижается и значение удельного коэффициента лобового сопротивления C_{x_0} / S_M с увеличением грузоподъемности самолета существенно увеличивается S_M . Коэффициент C_{x_0} , начиная уже с значения $M_{вмс} \approx 50$ т, практически не изменяется и находится в пределах 0,018–0,023. Что же касается площади

крыла $S_{кр}$, то тут спостерігається лінійна залежність від $M_{вмс}$ зі ступенем наближення рівної $R^2 = 0,99$ і позитивним трендом. Все це визначає характер зміни показателя інтеграції $\Pi_{инт}$, його зниження для легких, постійне значення або незначительне зниження для середніх транспортних літаків з $n_{дв} = 2-3$, і константа – для літаків важкої категорії з чотирма і більше двигунами.

Найвище значення показателя інтеграції $\Pi_{инт}$ характерно для транспортних літаків з $n_{дв} = 2-3$. Тут діапазони змін показателя перекриваються і складають $\Pi_{инт}^{n=2} \in (0,017; 0,033)$, $\Pi_{инт}^{n=3} \in (0,021; 0,029)$. Для літаків важкої категорії з $n_{дв} \geq 4$ він нижче і складає $(0,011; 0,020)$, що свідчить про відповідно кілька нижчих інтеграційних характеристик цих літальних апаратів. Цей недолік повністю компенсується за рахунок зростання $NP_{втс}$, що ілюструє рис. 4, де представлені залежності інтегрального показателя Π_{Σ} , отриманого з виразу (5), від $M_{вмс}$.

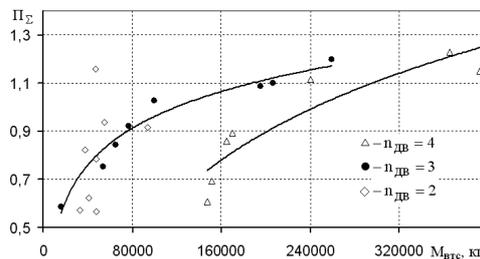


Рисунок 4 – Залежність інтегрального показателя Π_{Σ} від взлетної маси

На рисунку представлені результати апроксимації значень показателя Π_{Σ} для транспортних літаків з $n_{дв} = 3$ і 4. Залежність $\Pi_{\Sigma} = f(M_{вмс})$ для літаків легкої категорії з $n_{дв} = 2$ практично в усьому діапазоні їх взлетних мас співпадає з цією ж залежністю для випадку $n_{дв} = 3$, маючої вигляд:

$$\Pi_{\Sigma} = 0,22 \ln(M_{вмс}) - 1,57, \tag{8}$$

і описуючої вихідні дані з достатньо високою ступенню наближення рівної $R^2 = 0,95$. Для $n_{дв} = 4$ дана залежність має вигляд:

$$\Pi_{\Sigma} = 0,52 \ln(M_{вмс}) - 5,46, \tag{9}$$

при $R^2 = 0,83$.

Спадіння залежностей $\Pi_{\Sigma} = f(M_{вмс})$ для $n_{дв} = 2$ і 3 свідчить про загальності і незмінності концепції розвитку для літаків даних груп, для яких збільшення $M_{лн}$ і відповідно $M_{вмс}$ компенсувалося, головним чином, збільшенням тяги силової установки $P_{кр}^{сч} = n_{дв} P_{кр}$ (см. рис. 2). В той же час, для важких літаків з $n_{дв} \geq 4$, концепція розвитку передбачає прийняття додаткових рішень по суттєвому удосконаленню компоновки планера літака, результатом яких став перехід від узкофюзеляжних транспортних літаків до широкофюзеляжних. При цьому значення Π_{Σ} для літаків важкої категорії з $n_{дв} \geq 4$ по відношенню до літаків з $n_{дв} = 2-3$ нижче при одному і тому ж значенні взлетної маси.

Висновки

В результаті розробленого підходу до вирішення проблеми формування комплексних показателів, що характеризують досконалість сучасних транспортних літаків і їх комплексності, в якості висновків відзначимо наступне:

1. Аналізуючи проблеми, що мають місце на початковій стадії проектування літальних апаратів різного призначення, найважливішою з них, що вирішується сьогодні лише частково і головним чином на інтуїтивному рівні, слід вважати проблему формування інформативної системи показників досконалості зразків авіаційної техніки.

2. Розроблено підхід, що дозволяє формалізувати процес синтезу показників на основі формальних методів математичної статистики і прийняття рішень для дослідження існуючих зв'язків між базовими, удельними, комплексними і інтегральними характеристиками і показниками авіаційної техніки, а також виявлення існуючих взаємозв'язків між ними.

3. Формування нових показників досконалості літальних апаратів з наступним їх комплексним інтегруванням в інтегральні показники відкриває нові можливості для отримання достатньо стійких прогнозних оцінок перспектив і напрямків розвитку сучасних об'єктів авіаційної техніки, виявлення досягнутого рівня їх розвитку за базовими показниками, що є особливо важливим при формуванні зовнішнього вигляду сучасних літальних апаратів на ранніх – концептуальних етапах їх створення.

Література

1. Долгов О.С. Методика оцінки ефективності застосування багатифункціональних систем і агрегатів на початкових стадіях проектування літаків // О.С. Долгов, Т.В. Долгова, М.А. Лякішев / Вестник МАИ. – М.: МАИ, 2013. – Т.20. – №4 – С. 17–25.

2. Орлов А.И. Теория принятия решений. Учебное пособие / А.И. Орлов. – М.: Издательство «Экзамен», 2005. – 656 с.

3. Саати Т. Принятие решений. Методы анализа иерархий: пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.

4. Питер С. Фишберн Теория полезности для принятия решений. – М.: Наука, 1978. – 352 с.

5. Томашевский В.М. Моделирование систем. Підручник для вищих навчальних закладів / В.М. Томашевский – К.: Видавнична група ВHV, 2005. – С. 160–207.

6. Зінченко В.П. Інформаційна технологія проектних досліджень складних технічних об'єктів // В.П. Зінченко / Наукові вісті НТУУ «КПІ». – К.: НТУУ «КПІ», 2000. – С. 32–42.

7. Лазарев И.А. Композиционное проектирование сложных агрегативных систем / И.А. Лазарев – М.: Радио и связь, 1986. – 312 с.

8. Анипко О.Б. Концептуальное проектирование объектов бронетанковой техники / О.Б. Анипко, М.Д. Борисюк, Ю.М. Бусяк. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 196 с.

9. Анипко О.Б. Интеграция силовой установки и планера транспортного самолета / О.Б. Анипко, В.Г. Башинский, В.В. Логинов, В.Б. Семенов. – Издательский комплекс АО «Мотор Сич», Запорожье, 2013. – 329 с.

10. Анипко О.Б. Интегральный показатель для летательного аппарата транспортного назначения / О.Б. Анипко, Ю.И. Миргород, А.В. Приймак, А.Б. Котов // Системи озброєння і військова техніка: зб. наук. праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2012. – №3 (31). – С. 107–110.

11. Самолет Ан-148-100. Стандартная спецификация. – К.: АНТК им. О.К. Антонова, 2004. – 489 с.

12. Киселев Ю.В. Конструкция и техническая эксплуатация двигателя Д-36: Учебное пособие / Ю.В. Киселев, С.Н. Тиц. – Самара, СГАКУ, 2006. – 90 с.

Bibliography (transliterated)

1. Dolgov O.S. Metodika otsenki effektivnosti primeneniya mnogofunktsionalnykh sistem i agregatov na rannih stadiyah proektirovaniya samoletov. O.S. Dolgov, T.V. Dolgova, M.A. Lyakishev. Vestnik MAI. – M.: MAI, 2013. – T.20. – #4 – P. 17–25.

2. Orlov A.I. Teoriya prinyatiya resheniy. Uchebnoe posobie. A.I. Orlov. – M.: Izdatelstvo «Ekzamen», 2005. – 656 p.

3. Saati T. Prinyatie resheniy. Metodyi analiza ierarhiy: per. s angl. R.G. Vachnadze. – M.: Radio i svyaz, 1993. – 278 p.

4. Piter S. Fishbern Teoriya poleznosti dlya prinyatiya resheniy. – M.: Nauka, 1978. – 352 p.

5. Tomashevskiy V.M. Modelyuvannya sistem. Pidruchnik dlya vischih navchalnih zakladiv. V.M. Tomashevskiy – K.: Vidavnichna grupa VHV, 2005. – P. 160–207.

6. Zinchenko V.P. Informatsiyna tehnologiya proektnih doslidzhen skladnih tehnicnih ob'ektiv. V.P. Zinchenko. Naukovi visti NTUU «KPI». – K.: NTUU «HPI», 2000. – P. 32–42.
7. Lazarev I.A. Kompozitsionnoe proektirovanie slozhnyih agregativnyih sistem. I.A. Lazarev – M.: Radio i svyaz, 1986.– 312 p.
8. Anipko O.B. Kontseptualnoe proektirovanie ob'ektov bronetankovoy tehniki. O.B. Anipko, M.D. Borisyuk, Yu.M. Busyak. – Harkov: NTU «HPI», 2008. – 196 p.
9. Anipko O.B. Integratsiya silovoy ustanovki i planera transportnogo samoleta. O.B. Anipko, V.G. Bashinskiy, V.V. Loginov, V.B. Semenov. – Izdatelskiy kompleks AO «Motor Sich», Zaporozhe, 2013. – 329 p.
10. Anipko O.B. Integralnyiy pokazatel dlya letatel'nogo apparata transportnogo naznacheniya. O.B. Anipko, Yu.I. Mirgorod, A.V. Priymak, A.B. Kotov. Sistemi ozbroennya i viyskova tehnika: zb. nauk. prats HUPS. –H.: HUPS, 2012. – #3 (31). – P. 107–110.
11. Samolet An-148-100. Standartnaya spetsifikatsiya.– K.: ANTK im. O.K. Antonova, 2004.– 489 p.
12. Kiselev Yu.V. Konstruktsiya i tehni Cheskaya ekspluatatsiya dvigatelya D-36: Uchebnoe posobie. Yu.V. Kiselev, S.N. Tits.– Samara, SGAKU, 2006.– 90 p.

УДК 629.7.01

Аніпко О.Б., Приймак А.В.

КОМПЛЕКСУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ДОСКОНАЛОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЛІТАКІВ

Базуючись на результатах аналізу інформації про характеристики найбільш розповсюджених транспортних літаків вітчизняного та зарубіжного виробництва в статті викладені основні положення регулярного підходу щодо формування показників досконалості літаків транспортної категорії та результати їх комплексування.

Anipko O.B., Priymak A.V.

MAKING OF COMPLEX INDEXES OF PERFECTION OF TRANSPORT AIRPLANES

Based on an analysis of information about the characteristics of the most common transport airplanes of domestic and foreign production in the article the basic provisions concerning of design perfection transport category airplanes, and the results of their association in complexes.

**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
И РЕГИСТРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

Решение комплексной проблемы оптико-акустической разведки наземных целей имеет множество аспектов [1–9]. Это и создание новых образцов бронетанковой техники (БТТ) с пониженным шумовым полем и уменьшенными другими демаскирующими признаками, создание комплексных систем обнаружения по демаскирующим признакам, и в первую очередь связанных с возмущением различных полей, в том числе акустического [7, 9–12].

Одним из них является то, что современные средства поражения танков позволяют осуществлять стрельбу на дистанции до 5 километров при этом обнаружение типовых наземных целей на таком расстоянии имеющимися приборами проблематично [1,7,9,13,14].

В связи с этим, для снятия противоречия между дальностью стрельбы и обнаружением целей необходимо решить задачу разработки комплексной дополнительной оптико-акустической системы разведки (ДОАСР) наземных целей с работающим двигателем – как основным источником акустических возмущений.

Для решения этой проблемы, связанной с противоречием между дальностью стрельбы имеющегося вооружения и обнаружением наземных целей, необходимо создание оптико-цифровой системы разведки БТТ для их обнаружения и распознавания на основе сегментации изображений, которая позволит их идентифицировать, сузить область выявления целей, снизить время для их выявления и увеличить дальность их обнаружения, как компоненты, которая в совокупности с акустической системой и составляют ДОАСР [1,7,9].

Наряду с особенностью рельефа местности, климатическими условиями, специфическими гидрометеорологическими явлениями существует еще одна особенность – акустический (шумовой) фон. Акустический фон имеет определенные свойства и закономерности суточной и сезонной изменчивости, которые можно использовать для акустической маскировки (или обнаружения) передвижения и действий (стрельбы, шума запуска двигателей и т.д.) БТТ [2–6,15].

Целью данной работы является разработка комплексного метода обнаружения и распознавания наземных целей на основе анализа цифровых изображений и регистрации акустических возмущений типовых целей БТТ.

Одним из демаскирующих признаков бронетанковой техники является шум работающих двигателей, как при стоянках так и на марше, и звуки выстрелов из орудий и пулеметов. Зная акустические характеристики, можно оценить конкретные значения радиусов акустического демаскирования и использовать его при решении задачи обнаружения и идентификации источника шума.

Одним из физических методов обнаружения целей является оптический. Для осуществления оптической разведки целей, кроме оптических приборов необходимо иметь данные об оптической заметности объектов БТТ для их распознавания и идентификации, с последующим выявлением в узком секторе оптическими приборами [13,16]. Так задачам анализа цифровых изображений для ДОАСР посвящены предыдущие публикации [17,18,20,21].

Синтез оптических, акустических, тепловизионных и радиолокационных приборов (каналов), каждый из которых решает задачу обнаружения цели на определенной дальности, а так же в конкретном диапазоне длин волн и представляет собой комплекс дополнительной разведки БТТ [19].

В ряде работ [18,20] приведены теоретические положения, которые определяют основы создания оптической ветви дополнительной оптико-акустической системы разведки наземных целей. Для построения контуров типовых наземных целей, соответственно обычному фону, разработаны теоретические основы их цифрового изображения с использованием принципа поиска границы, скачкообразные изменения яркости изображения с последующим очерчиванием контура объекта БТТ. Для этой системы на основе серии экспериментальных исследований созданы типовые портреты разных ракурсов объектов БТТ (БТР–60ПБ, БТР–70, БТР–80, БТР–3) [20–21].

Однако в области оптики требуется дополнительное программное обеспечение, которое позволит в реальном масштабе времени контрастировать объекты БТТ на фоне сканируемой местности.

Измерение шумов образцов БТТ выполнялись на тактическом поле Академии внутренних войск МВД Украины шумомером второго класса ШУМ–1м30 [22]. Принцип работы которого основан на измерении электрического сигнала, поступающего с конденсаторного микрофона, пропорционального звуковому давлению акустических шумов. Функциональная схема шумомера представлена на рис. 1.

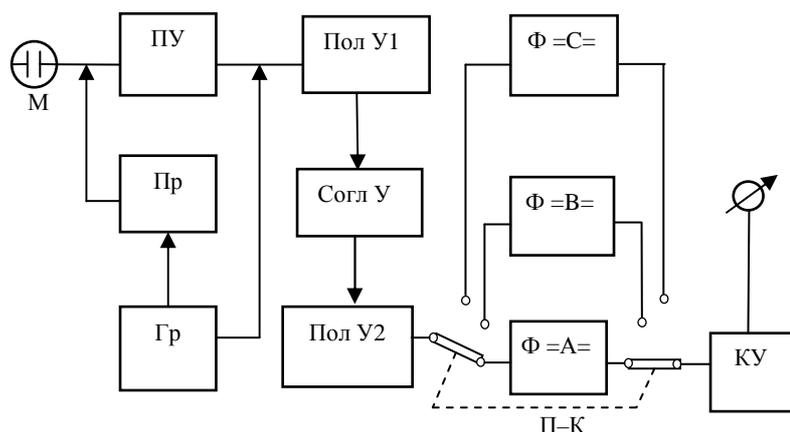


Рисунок 1 – Функціональна схема ШУМ–1м30

М – мікрофон; Пол У1(2) – полосовой усилитель №1(№2); ПУ – предварительный усилитель; Пр – преобразователь; Согл У – согласующий усилитель; Ф =А=(В, С) – фильтр А (В, С); Гр – калибровочный генератор; П-К – переключатель режимов; КУ – конечный усилитель; Р – стрелочный указатель

Приборное обеспечение и методика выполнения инструментальных измерений полностью обеспечило выполнение метрологических работ по измерению уровня шумов единиц бронетанковой техники (рис. 2).

Результаты выполнения измерений показывают, что средний уровень шумов для БТР–60–БП составляет 79,2 дБ, а для БТР–80 составляет 71,2 дБ. В носовом (переднем) секторе уровень шумов на 15–20 дБ ниже, чем в кормовом [7, 23].

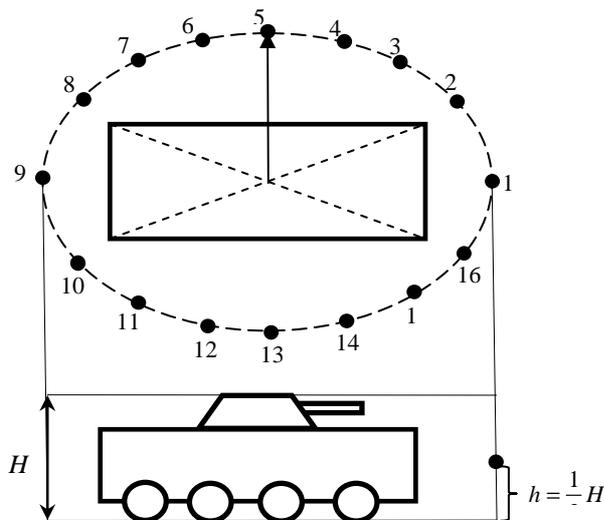


Рисунок 2 – Схема расположения измерительных микрофонов

Основной акустической характеристикой объектов БТТ является приведенное к одному метру от источника звука значение акустического давления в измеряемой полосе частот, которое выражается как в абсолютных (Паскалях) так и относительных (Децибелах) единицах. Конкретные значения приведенной шумности в полосе от 100 Гц до 10 кГц относительно порога слышимости ($2 \cdot 10^{-5}$ Па) составляют десятки и сотни децибел. Экспериментально, с помощью прибора "Шум–1м30", были определены акустические портреты объектов отечественной бронетехники БТР–60ПБ, БТР–70 и БТР–80. Эти данные составляют фактическую основу для практического осуществления системы акустической разведки наземных целей и могут быть использованы на объектах БТТ [7,19,23–24].

Определение угловых координат или направления на шумящий объект основывается на использовании направленных свойств приемных антенн (микрофонов). Часто методы пеленгования называют по параметру, выходной сигнал антенны которого играет основную роль. Рассмотрим их подробнее [8].

Амплитудный метод пеленгования позволяет определить направления на источник шума по максимуму выходного напряжения с антенны (прямого тракта), которое описывается выражением

$$u(\alpha) = u_{\max} R(\alpha), \quad (1)$$

где α – текущее значение угла (направления); $R(\alpha)$ – характеристика направленности приемной антенны.

Определение направления на источник шума производится путем поворота характеристики направленности в плоскости пеленгования. При достаточно большом отношении сигнал/помеха приемное устройство обеспечивает изменение наблюдаемого сигнала при малых изменениях угла. Это изменение, характеризуемое пеленгационной чувствительностью, равно нулю при совпадении максимума характеристики направленности с направлением на объект, что существенно ограничивает точность определения направления на цель при небольших соотношениях сигнал/помеха. Практически величина максимальной ошибки равна половине ширины характеристики направленности.

Поскольку ширина характеристики направленности для практически используемых соотношений рабочих частот и размеров антенн достаточно велика, достижение высоких точностей пеленгования при реализации этого метода затруднительно, что для разработки военной системы и не требуется.

Фазовый метод пеленгования основан на изменении разности фаз акустических колебаний (с длиной волны λ), принимаемых двумя антеннами, разнесенными в пространстве на расстоянии d . Выражение для пеленгационной характеристики имеет вид [8]:

$$u(\alpha) = k \cdot \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \sin \alpha\right), \quad (2)$$

где k – волновое число.

Зависимость напряжения от угла рассогласования определяется крутизной пеленгационной характеристики, которая при фазовом методе значительно выше, чем при амплитудном. Кроме того, достоинством фазового метода является возможность его использования в устройствах автоматического сопровождения целей по угловым координатам.

Фазоамплитудный метод является разновидностью фазового метода и отличается от последнего тем, что напряжения, имеющие разные фазы, преобразуются в синфазные с различными амплитудами, величина которых зависит от разности фаз колебаний.

Метод равносигнальной зоны заключается в том, что амплитудное пеленгование производится не по максимуму, а путем сравнения огибающих сигналов, полученных посредством формирования двух характеристик направленности, максимумы которых сдвинуты симметрично от равносигнального направления на угол смещения $\alpha_{см}$. Это осуществляется либо механически поворотом половины антенны на заданный угол, либо электрически. Одним из вариантов такого устройства является схема Гванеллы, представленная на рис. 3а [8].

На практике эта схема дополняется суммированием и вычитанием принятых колебаний с последующей обработкой. На выходе схемы Гванеллы формируется несимметричная корреляционная функция входных процессов $u(t)$ и $u(t + \tau)$, определяемой как [8]

$$R_{uu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} u(t) \cdot u^{\sphericalangle}(t + \tau) dt, \quad (3)$$

где знак \sphericalangle означает поворот всех фаз, составляющих спектра на угол 90° . Точность пеленгования определяется крутизной кривой $R_{uu}(\tau)$.

Корреляционный метод пеленгования основан на измерении взаимных корреляционных функций между напряжениями, возникающими на выходах двух или нескольких приемных антенн (рис. 3б).

Если полезный сигнал и помехи некоррелированы, а расстояния между приемными группами элементов такие, что помехи на выходе каждого приемника статистически независимы, напряжение на выходе интегрирующего устройства пропорционально значению корреляционной функции пеленгуемого сигнала

$$R_{uu}(\alpha) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} u(t) \cdot u\left(t + \frac{d}{c} \cdot \sin \alpha\right) dt. \quad (4)$$

Однако, благодаря конечности времени усреднения эффект на выходе корреляционного тракта является флуктуирующей величиной, поэтому в качестве отношения сигнал/помеха на выходе корреляционного пеленгатора целесообразно брать отношение квадрата корреляционной функции пеленгуемого сигнала к дисперсии флуктуаций выходного напряжения относительно своего среднестатистического значения.

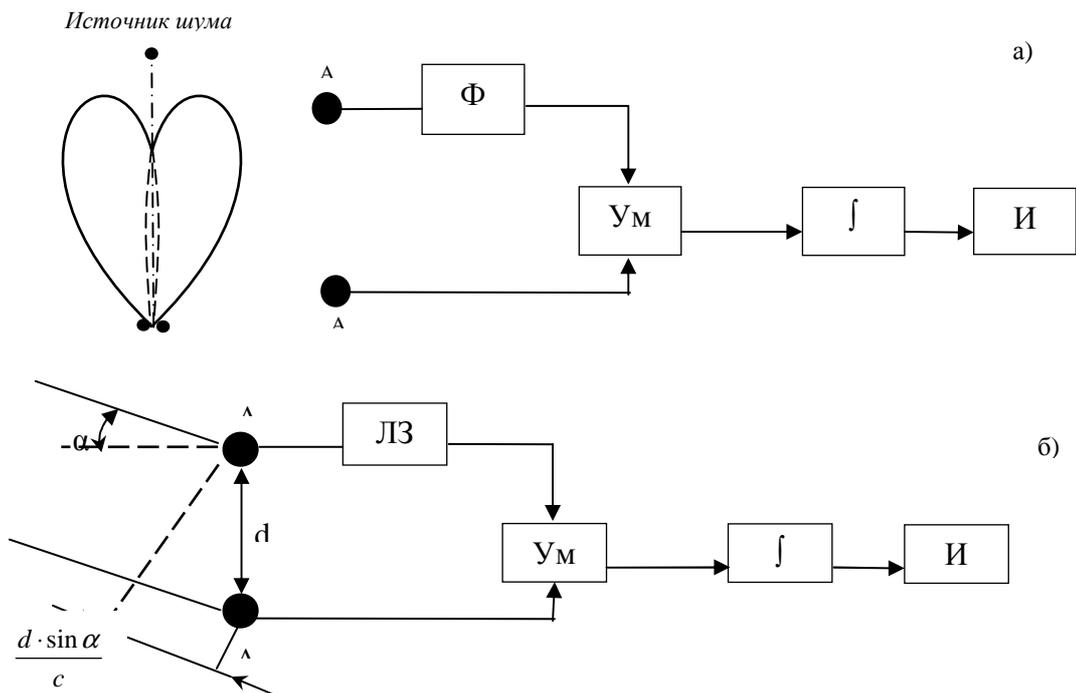


Рисунок 3 – Схемы пеленгаторов:

а) схема Гванеллы; б) корреляционного; Ф – фазовращатели, И – индикатор, УМ – умножитель, ∫ – интегратор, ЛЗ – линия задержки

С увеличением расстояния между приемниками базы и расширения полосы частот направленное действие при приеме проявляется лишь в небольшой части диапазона углов пеленгования, то есть антенна такого пеленгатора имеет достаточно острую характеристику направленности. Основные ошибки в корреляционных пеленгаторах обусловлены влиянием статистических связей помех, воздействующих на приемные антенны.

Таким образом, для определения направления на шумящий объект в технических средствах используются амплитудный, фазовый, фазоамплитудный, равносигнальный и корреляционный методы.

В заключение следует отметить, что на современном этапе развития техники военные действия не представляются возможными без применения роботов, в том числе беспилотных летательных аппаратов БПЛА [25–27].

Бурное развитие беспилотной авиации привело к созданию новых образцов БПЛА и целых беспилотных авиационных комплексов (БПАК), различающихся по множеству показателей: виду, типу, массе, продолжительности и дальности полета, целевому назначению и др. Так, согласно европейской классификации БПЛА делятся на разведывательные (тактические, стратегические) и специальные (боевые, фальшивые, стратосферные, космические), все они представляют определенную опасность для личного состава и БТТ [27–30].

Кроме того для РЛС поиск и ведение воздушной разведки (в см. диапазоне) низколетящих и малогабаритных БПЛА по ряду известных причин проблематично [31,32]. Поэтому использование ДОАСР позволит после обнаружения воздушной цели определить пеленг на цель и осуществить ее обслуживание.

Поэтому акустическое направление по выявлению и обнаружению БПЛА, БПАК позволит при получении акустических портретов БПЛА более оперативно идентифицировать их с целью уничтожения, что является актуальным, перспективным направлением [33] и будет рассмотрено в последующих публикациях.

Таким образом, необходимо отметить, что комплексный метод обнаружения и распознавания наземных целей на основе анализа и обработки цифровых изображений и регистрации акустических возмущений с использованием звуковых портретов БТТ необходим для решения задачи идентификации этих целей.

Ожидаемая дальность акустического обнаружения вооружения и БТТ определяется произведением энергетической дальности обнаружения шумящего объекта и коэффициента аномалии распространения звука в приземных слоях атмосферы. Энергетическая дальность определяется главным образом приведенным значением шумов конкретного военного объекта к расстоянию в один метр в полосе акустического приемного устройства и уровнем регионального акустического фона.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования приводят к выводу о необходимости разработки и создания дополнительной оптико-акустической системы разведки наземных целей на объектах БТТ, основанной на анализе цифровых изображений и регистрации акустических возмущений.

Литература

1. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю., Бусяк Ю.М. Комплексная проблема поиска и обнаружения наземных целей для поражения вооружением, установленным на объектах бронетехники. // Сбірник наукових праць. – Х.: Акад. ВВ МВС України. 2011. – № 2(18). – С. 43–47.
2. ISO 9613–2:1996. Acoustic – Attenuation of sound during propagation outdoors. – P. 21. General method of Calculation. – М.: MOD. 2006. – 39 p.
3. Гринченко В.Т. Основы акустики / В. Гринченко, И. Вовк, В. Маципура.– К.: Наук. думка, 2007.– 640 с.
4. Дидковский В.С. Акустическая экспертиза каналов речевой коммуникации / В.С. Дидковский, М.В. Дидковская, А.Н. Продеус. – К.: Наук. думка, 2008. – 420 с.
5. Вовк И.В. Звук, рожденный потоком. / И. Вовк, В. Гринченко. – К.: Наук. думка, 2010 – 221 с.
6. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю., Дивизинюк М.М. Акустичні властивості атмосфери. // Сбірник наукових праць. – Севастополь: СКУЯЕиП. 2010. – № 4 (36). – С. 239–244.
7. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю., Бусяк Ю.М. Звуковые портреты объектов бронетехники для обнаружения и распознавания целей. // Интегрированные технологии и энергосбережение. – Х.: НТУ “ХПИ”. 2011. – № 3. – С. 31–36.
8. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю. Малик В.А., Григорьева В.Н. Энергетическая дальность обнаружения шумящих объектов. // Сбірник наукових праць. – Севастополь: СКУЯЕиП.– № 1(37).– 2011. – С. 231–236.
9. Бирюков И.Ю. Акустическая компонента разведки наземных целей. Проблемы и решения. // Сбірник наукових праць.– Севастополь: СКУЯЕиП. – № 3(47). – 2013. – С. 98–102.
10. Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М., Магерамов Л.К. Модернизация танкового парка сухопутных войск – насущная задача в процессе реформирования вооруженных сил Украины // Интегрированные технологии и энергосбережение. – Х.: НТУ “ХПИ”. 2005.– № 2. – С. 101–104.
11. Бусяк Ю.М., Анипко О.Б., Заозерский В.В. От конкуренции – к интеграции: перспективные направления сотрудничества со странами НАТО в области бронетанковых и артиллерийских систем вооружения // Сбірник наукових праць. Х.: ХУПС. – 2006 – 2(8) – С. 37–39.
12. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М. Концептуальное проектирование объектов бронетанковой техники. Монография. Х.: НТУ “ХПИ”. 2008 – 196 с.
13. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М., Баулин Д.С., Цебрюк И.В. Анализ приоритетов и прогнозирования тенденций танкостроения. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х. НТУ „ХПИ”. 2011. – № 3. – С. 88–100.
14. Суворов С. "Легкая бронетехника. Модернизация по..." // М.: Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра. – 2005. – № 2. – С. 8–16.
15. Меньшаков Ю.К. Защита информации от технических средств разведки. М.: Российский государственный гуманитарный университет, 2002. – 399 с.
16. Разумовский И.Т. Оптика на военной службе. М.: Изд. ДОСААФ СССР, 1980 – 96 с.
17. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. – М.: Техносфера. 2005. – 1967 с.
18. Бирюков И.Ю. Маскировочная окраска наземных объектов и методы их распознавания. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ „ХПИ”. 2013. – № 2. – С. 101–109.
19. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю. Физические принципы разработки и создания комплексной оптико-акустической подсистемы обнаружения наземных целей объектами бронетехники. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ „ХПИ”. 2012. – № 3. – С. 48–54.
20. Бирюков И.Ю. Обработка цифровых изображений при распознавании наземных целей дополнительной оптико-акустической системой разведки объектов БТТ. // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС. 2013. – № 3. – С. 52–58.
21. Бирюков И.Ю., Анипко О.Б. Экспериментальне дослідження оптичної примітності об'єктів АБТТ для охорони периметра об'єкту (шифр – "Захист"). / Звіт про науково-дослідну роботу. // Х.: Акад. ВВ МВС України. – 2012. – 85 с.
22. Паспорт и техническое описание шумомера ШУМ – 1м30. ГОСТ 17187 – 71. – 17 с.
23. Урих Р.Д. Основы гидроакустики. Пер. с англ. – Л.: Судостроение. 1978. – 448 с.
24. Бирюков И.Ю., Спорышев К.А. Научно-экспериментальное исследование акустических портретов наземных объектов БТТ для перспективного комплекса разведки системы охраны периметра объекта (шифр – "Портрет"). / Звіт про науково-дослідну роботу. // Х.: Акад. ВВ МВС України. – 2013. – 107 с.

25. Бірюков І.Ю., Казіміров О.О. Аналіз досвіду ведення розвідки федеральними військами Росії у ході проведення контртерористичної операції. // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС. 2010. – № 1(21). – С. 221–224.
26. Матусевич А.Н. Советские беспилотные самолеты-разведчики первого поколения. М.: АСТ. – 2002. – 48 с.
27. Силков В.И. и др. Беспилотные летательные аппараты. // "Аванпост-прим". К.: Издательский дом. – 2009. – 302 с.
28. Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap, 2005–2030. Office of the Secretary of Defense.
29. Снегов А. Разведывательные беспилотные летательные аппараты стран НАТО. / А. Снегов, Г. Исаев // Зарубежное военное обозрение. – 1992. – № 2. – С. 34–43.
30. Харченко О.В. Класифікація та тенденції створення безпілотних летальних апаратів військового призначення. / О. Харченко, В. Кулешин, Ю. Коцуренко // Наука і оборона. – 2005. – № 1. – С. 47–54.
31. Тымчук В.Ю. Артиллерийские РЛС серии ТРО: Некоторые аспекты построения и работы, уроки модернизации. // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – К.: Уч. Изд. 2011. – № 1. – С. 12–19.
32. Лукин К.А. Получение радиолокационных портретов образцов военной техники с помощью наземного шумового радара с синтезированной апертурой. / К. Лукин, К. Васюта, Ф. Зоц, П. Выплавин, В. Кудряшев, С. Озеров, В. Паламарчук, П. Суценко, С. Лукин // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС. 2013. – № 4. – С. 87–91.
33. Бірюков І.Ю. Расчет средних ошибок, определяемых дополнительной акустической системой разведки наземных целей. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ „ХПІ”. 2014. – № 3. – С. 12–18.

Bibliography (transliterated)

1. Anipko O.B., Biryukov I.Yu., Busyak Yu.M. Kompleksnaya problema poiska i obnaruzheniya nazemnykh tseley dlya porazheniya vooruzheniem, ustanovlennym na ob'ekтах бронетехники. Sbornik naukovih prats. – H.: Akad. VV MVS UkraYini. 2011. – # 2(18). – P. 43–47.
2. ISO 9613–2:1996. Acoustic – Attenuation of sound during propagation outdoors. – P. 21. General method of Calculation. – M.: MOD. 2006. – 39 p.
3. Grinchenko V.T. Osnovyi akustiki. V. Grinchenko, I. Vovk, V. Matsipura. – K.: Nauk. dumka, 2007. – 640 p.
4. Didkovskiy V.S. Akusticheskaya ekspertiza kanalov recevoy kommunikatsii. V.S. Didkovskiy, M.V. Didkovskaya, A.N. Prodeus. – K.: Nauk. dumka, 2008. – 420 p.
5. Vovk I.V. Zvuk, rozhdennyiy potokom. I. Vovk, V. Grinchenko. – K.: Nauk. dumka, 2010 – 221 p.
6. Anipko O.B., Biryukov I.Yu., Divizinyuk M.M. Akustichni vlastivosti atmosferi. Zbirnik naukovih prats. – Sevastopol: SNUYaEiP. 2010. – # 4 (36). – P. 239–244.
7. Anipko O.B., Biryukov I.Yu., Busyak Yu.M. Zvukovyye portrety ob'ektov бронетехники dlya obnaruzheniya i raspoznaniya tseley. Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie. – H.: NTU “HPI”. 2011. – # 3. – P. 31–36.
8. Anipko O.B., Biryukov I.Yu. Malik V.A., Grigoreva V.N. Energeticheskaya dalnost obnaruzheniya shumyashchih ob'ektov. Zbirnik naukovih prats. – Sevastopol: SNUYaEiP. – # 1(37). – 2011. – P. 231–236.
9. Biryukov I.Yu. Akusticheskaya komponenta razvedki nazemnykh tseley. Problemy i resheniya. Zbirnik naukovih prats.– Sevastopol: SNUYaEiP. – # 3(47). – 2013. – P. 98–102.
10. Borisyuk M.D., Busyak Yu.M., Mageramov L.K. Modernizatsiya tankovogo parka suhoputnykh voysk – nasuschnaya zadacha v protsesse reformirovaniya vooruzhennykh sil Ukrainyi. Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie. – H.: NTU “HPI”. 2005.– # 2. – P. 101–104.
11. Busyak Yu.M., Anipko O.B., Zaozerskiy V.V. Ot konkurentsii – k integratsii: perspektivnyie napravleniya sotrudnichestva so stranami NATO v oblasti бронетанковyyih i artilleriyskiykh sistem vooruzheniya. Zbirnik naukovih prats. H.: HUPS. – 2006 – 2(8) – P. 37–39.
12. Anipko O.B., Borisyuk M.D., Busyak Yu.M. Kontseptualnoe proektirovanie ob'ektov бронетанковoy tehniki. Monografiya. H.: NTU “HPI”. 2008 – 196 p.
13. Anipko O.B., Busyak Yu.M., Baulin D.S., Tsebryuk I.V. Analiz prioritetov i prognozirovaniya ten-dentsiy tankostroeniya. Integrovani tehnologii ta energosberezhennya.– H. NTU „HPI”. 2011.– # 3.– P. 88–100.
14. Suvorov S. "Legkaya бронетехника. Modernizatsiya po...". M.: Tehnika i vooruzhenie vchera, segodnya, zavtra. – 2005. – # 2. – P. 8–16.
15. Menshakov Yu.K. Zashchita informatsii ot tehnikeskikh sredstv razvedki. M.: Rossiyskiy gosudarstvennyy gumanitarnyy universitet, 2002. – 399 p.
16. Razumovskiy I.T. Optika na voennoy sluzhbe. M.: Izd. DOSAAF SSSR, 1980 – 96 p.
17. Gonsales R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. Per. s angl. – M.: Tehnosfera. 2005. – 1967 p.

18. Biryukov I.Yu. Maskirovochnaya okraska nazemnykh ob'ektov i metody ih raspoznaniya. Integrovani tehnologii ta energozberezheniya. – H.: NTU „HPI”. 2013. – # 2. – P. 101–109.
19. Anipko O.B., Biryukov I.Yu. Fizicheskie printsipy razrabotki i sozdaniya kompleksnoy optiko-akusticheskoy podsistemy obnaruzheniya nazemnykh tseley ob'ektami bronetehniki. Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie. – H.: NTU „HPI”. 2012. – # 3. – P. 48–54.
20. Biryukov I.Yu. Obrabotka tsifrovyykh izobrazheniy pri raspoznanii nazemnykh tseley dopolnitelnoy optiko-akusticheskoy sistemoy razvedki ob'ektov BTT. Sistemi ozbroeniya i viyskova tehnika. – H.: HUPS. 2013. – # 3. – P. 52–58.
21. Biryukov I.Yu., Anipko O.B. Eksperimentalne doslidzhennya optichnoyi primitnosti ob'ektiv ABTT dlya ohoroni perimetra ob'ektu (shifr – "Zahist"). / Zvit pro naukovo-doslidnu robotu. H.: Akad. VV MVS Ukraini. – 2012. – 85 p.
22. Pasport i tehniche opisanie shumomera ShUM – 1m30. GOST 17187 – 71. – 17 p.
23. Urih R.D. Osnovyi gidroakustiki. Per. s angl. – L.: Sudostroenie. 1978. – 448 p.
24. Biryukov I.Yu., Sporyshev K.A. Nauchno-eksperimentalnoe issledovanie akusticheskikh portretov nazemnykh ob'ektov BTT dlya perspektivnogo kompleksa razvedki sistemoy ohranyi perimetra ob'ekta (shifr – "Portret"). / Zvit pro naukovo-doslidnu robotu. H.: Akad. VV MVS Ukraini. – 2013. – 107 p.
25. Biryukov I.Yu., Kazimirov O.O. Analiz dosvidu vedennya rozvidki federalnimi viyskami Rosiyi u hodi provedennya kontrterroristichnoyi operatsiyi. Sistemi ozbroeniya i viyskova tehnika. – H.: HUPS. 2010. – # 1(21). – P. 221–224.
26. Matusевич A.N. Sovetskie bespilotnyye samolety-razvedchiki pervogo pokoleniya. M.: AST. – 2002. – 48 p.
27. Silkov V.I. i dr. Bespilotnyye letatelnyye apparaty. "Avanpost-prim". K.: Izdatelskiy dom. – 2009. – 302 p.
28. Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap, 2005–2030. Office of the Secretary of Defense.
29. Snegov A. Razvedyivatelnyye bespilotnyye letatelnyye apparaty stran NATO. A. Snegov, G. Isaev. Zarubezhnoe voennoe obozrenie. – 1992. – # 2. – P. 34–43.
30. Harchenko O.V. Klasifikatsiya ta tendentsiyi stvorenniya bespilotnih letalnih aparativ viyskovogo priznachennya. / O. Harchenko, V. KulEshin, Yu. Kotsurenko. Nauka i oborona. – 2005. – # 1. – P. 47–54.
31. Tyimchuk V.Yu. Artilleriyskie RLS serii TRO: Nekotoryye aspektyi postroeniya i raboty, uroki modernizatsii. Artilleriyskoe i strelkovo-vooruzhenie. – K.: Uch. Izd. 2011. – # 1. – P. 12–19.
32. Lukin K.A. Poluchenie radiolokatsionnykh portretov obraztsov voennoy tehniki s pomoschyu nazemnogo shumovogo radara s sintezirovannoy aperturoy. K. Lukin, K. Vasyuta, F. Zots, P. Vyiplavin, V. Kudryashev, S. Ozerov, V. Palamarchuk, P. Suschenko, S. Lukin. Sistemi ozbroeniya i viyskova tehnika. – H.: HUPS. 2013. – # 4. – P. 87–91.
33. Biryukov I.Yu. Raschet srednih oshibok, opredelyaemykh dopolnitelnoy akusticheskoy sistemoy ra-zvedki nazemnykh tseley. Integrovani tehnologii ta energozberezheniya. – H.: NTU „HPI”. 2014. – # 3. – P. 12–18.

УДК 355.40; 534.79; 623.44

Аніпко О.Б., Бірюков І.Ю.

КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ЗНАХОДЖЕННЯ ТА РОСПІЗНАВАННЯ НАЗЕМНИХ ЦІЛЕЙ НА ОСНОВІ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ І РЕГІСТРАЦІЇ АКУСТИЧНИХ ЗБУРЕНЬ

В статті розглядається розробка комплексного методу знаходження та розпізнавання наземних цілей на основі аналізу цифрових зображень і реєстрації акустичних збурень типових цілей БТТ.

Anipko O.B., Biryukov I.Y.

KOMPLKSNY METHODS OF DTTEKTION AND IDENTIFICATION OF QROUND TARQETS BASED ON ANALYSIS OF DIQITAL IMAQES AND REGISTRATIION ACOUSTIC DISTURBANCES

The article is to develop a comprehensive method for ground targets and recognition based on digital image analysis and registration of acoustic disturbances model bronetehnika purposes.

ГЕРОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СЕРЕБРЯНО-ЦИНКОВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ТОРПЕДЫ СЭТ-65 В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ

Военно-морские силы Украины, в ходе раздела Черноморского флота СССР, получили огромное количество и разнообразие торпедного оружия. В дальнейшем из-за отсутствия материально-технической базы и предприятий промышленности способных производить ремонт и обслуживание образцов торпедного оружия, было принято решение о сокращении номенклатуры торпед до трех: СЭТ-65, СЭТ-72, 53-65К. Эти торпеды находятся на сроках хранения, превышающих срок службы. Для поддержания их технической готовности в Военно-морских силах (ВМС) Украины неоднократно проводились мероприятия по модернизации и продлению сроков эксплуатации торпедного оружия. Однако, из-за отсутствия надлежащего финансирования, мероприятия восстановления и создания неприкосновенных запасов материальных средств, обеспечение сохранности существующих запасов и их своевременное обновление (по срокам хранения) выполнить в полном объеме не удалось.

Наиболее существенно это сказывается на источниках питания противолодочных торпед, так как сроки их хранения и эксплуатации строго регламентированы руководящими документами. В свою очередь отсутствие методов прогнозирования изменения электротехнических свойств серебряно-цинковых аккумуляторных батарей (АБ) торпед, на сроках эксплуатации превышающих 10 лет, а также модели эксплуатации АБ торпед со сроками хранения превышающими гарантийный, требует проведения исследования их эксплуатационных характеристик и разработки путей повышения технических характеристик до декларируемых в тактико-технических характеристиках [9].

Имеющиеся серебряно-цинковые АБ торпед находятся на различных стадиях хранения (от 10 до 25 лет) и изменение их параметров, а так же процессы, протекающие в них, мало изучены. В условиях вынужденной эксплуатации, на послегарантийных сроках хранения, необходимо провести мониторинг состояния, что предполагает прогноз изменения основных электротехнических характеристик, с последующим проведением организационно-технических мероприятий, направленных на снижение вероятности проявления ненормального действия и проведения своевременной утилизации. В ВМС Украины у всех АБ торпед истек срок эксплуатации, что делает невозможным выдачу торпед на корабли и применение их по назначению [12].

В связи с этим определено влияние технической геронтологии на источники питания электрических торпед и связанными с этим изменениями основных тактико-технических характеристик (ТТХ) торпеды представляется практически важной задачей.

Известно, что вследствие геронтологических изменений, происходящих с серебряно-цинковыми АБ торпед, на сроках хранения превышающих срок службы, их емкость и напряжение существенно изменяется.

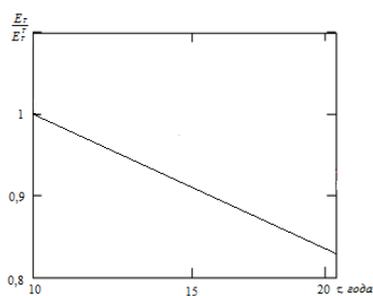


Рисунок 1 – Изменение дальности хода торпеды от времени хранения АБ в период $10 \leq \tau \leq 22$

В результате проведенных исследований [15] установлено, что на сроке хранения АБ торпеды равном 22 года, со снижением емкости на 20 %, существенно снижается время ее разряда и приобретает значения $t_{раз} = 0,18$ ч (10,8 мин), что не соответствует показателям этих величин декларируемых ТТХ (13 мин).

Определено влияние изменения времени разряда АБ на дальность хода торпеды, а так же изменение дальности хода торпеды E_T , от времени хранения АБ торпеды τ в виде выражения:

$$\frac{E_T}{E_T^0} = E_T - 0,007\tau, \tag{1}$$

где E_T^0 – значения дальности хода торпеды на гарантийных сроках хранения АБ; E_T^T – табличные значения дальности хода торпеды; τ – срок хранения.

Установлено, что на сроке хранения АБ торпеды, равном 22 годам, дальность хода торпеды снизится на 17 %, что соответствует 2,5 км.

Наличие данного факта приведет к изменению эллипса корабельного рассеивания торпеды по дальности, а так же внесет изменения при расчетах предельной дистанции торпедного залпа и условий дохождения торпеды до цели (догона цели).

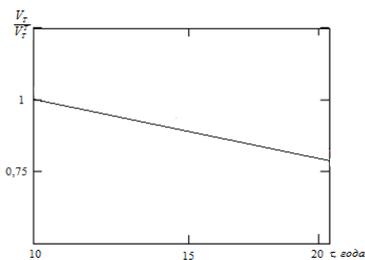


Рисунок 2 – Изменение скорости хода торпеды от времени хранения АБ в период $10 \leq \tau \leq 22$

На послегарантийных этапах эксплуатации, превышающих срок службы, напряжение АБ торпеды падает на 18 %, что соответствует 40 В [3, 4]. При таких значениях напряжения, показатели мощности электродвигателя торпеды принимают неудовлетворительные значения, равные $1,8 \cdot 10^5$ Вт, при которых электродвигатель не сможет обеспечить нужной скорости хода торпеды.

Определена зависимость в виде выражения:

$$\frac{V_T}{V_T^0} = V_0 - 0,009\tau, \quad (2)$$

где V_0 – значения скорости хода торпеды на гарантийных сроках хранения аккумуляторной батареи; V_T^0 – табличные значения скорости

хода торпеды; τ – срок хранения.

Установлено, что на сроке хранения АБ торпеды, равном от 10 до 22 лет, скорость торпеды снизится на 20 %, что соответствует 4 м/с (8 уз).

Наличие данного факта приведет к изменению эллипса корабельного рассеивания торпеды в боковом направлении, а так же внесет изменения при расчете угла встречи торпеды с расчетной точкой встречи торпеды с целью (угла упреждения).

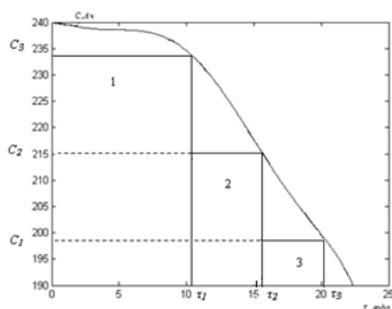


Рисунок 3 – Модель жизненного цикла АБ торпеды

На основании полученных данных разработана модель жизненного цикла АБ, которая описана полиномом шестой степени:

$$C = (-9,9888 e^{-6})\tau^6 + 0,0006057\tau^5 + (-0,01258)\tau^4 + 0,097436\tau^3 + (-0,25375)\tau^2 + (-0,22637)\tau + 239,98 \text{ (норма} = 1,9575). \quad (3)$$

Разработанная модель жизненного цикла включает в себя три периода: 1 – соответствует стадии, когда емкость АБ, как основная ее характеристика, остается практически неизменной. На этой стадии процессы старения, происходящие внутри АБ незначительны и скорость их протекания мала, что не оказывает существенного влияния на ее электротехнические свойства; 2 – емкость АБ резко снижается. Допустимое минимальное значение емкости может быть определено на основе минимально допустимой скорости и дальности хода торпеды; 3 – значения емкости АБ не смогут обеспечить необходимую скорость и дальность хода торпеды, а, следовательно, их использование не целесообразно.

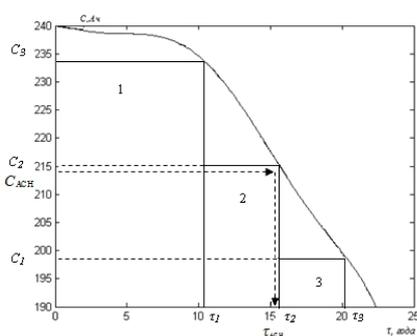


Рисунок 4 – Модель жизненного цикла АБ торпеды с учетом ограничения, связанного с условиями работы бортовой АСН

Модель жизненного цикла АБ торпеды позволяет прогнозировать изменения основных энергетических показателей АБ торпед от сроков хранения, а так же прогнозировать влияние этих изменений на основные тактические параметры торпеды – скорость и дальность хода. Это в свою очередь позволяет вводить поправки в исходные параметры торпедной стрельбы при боевом применении с учетом геронтологических изменений.

Произведена коррекция модели жизненного цикла АБ торпеды, с учетом ограничения, связанного с условиями работы бортовой аппаратуры самонаведения, для нормальной работы которой допускается падение напряжения не более чем на 10 %. Как ограничивающий фактор, эта величина еще в большей степени ограничивает срок эксплуатации АБ торпед с возможностью применения по назначению. Установлено, что срок целесообразной эксплуатации, исходя из этого ограничения, не превышает 16 лет.

Модель жизненного цикла АБ торпеды послужила основанием для разработки рекомендаций по возможным срокам хранения и переходу в предельное состояние.

Для подтверждения достоверности результатов полученных в ходе теоретических исследований, на предприятии ОАО НПФ «Луганский аккумулятор–1» проводились испытания трех батарей СЦА-240 (изд. А-187М) с заводскими номерами: №№ 81183П78, 81183П79, 8118380 [3, 4].

В результате проведенного экспериментального исследования выявлено, что в результате длительного хранения (более 17 лет), с серебряно-цинковыми АБ торпеды, произошли геронтологические изменения. Часть положительных электродов покрыта бурными пятнами, что свидетельствует о восстановлении электродов, которые изготовлены из оксида серебра. Это в свою очередь приводит к уменьшению общей рабочей поверхности пластин. В отрицательных электродах понижено содержание ртути, которая вводится в активную массу для обеспечения стабильности цинкового электрода в процессе хранения, и составляет 0,5 %, что не соответствует технической документации (1 %) [3].

Испытание положительных и отрицательных электродов на электрохимическую активность показали, что она понижена и не соответствует данным согласно технической документации.

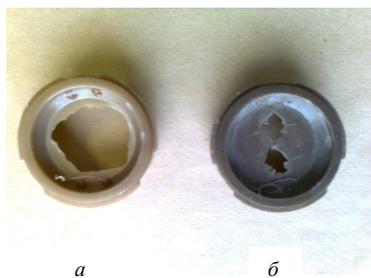


Рисунок 5 – Открытие диафрагм после подрыва электрозапалов:
 а – нормальное открытие;
 б – фактическое открытие

Установлено, что, положительные и отрицательные электроды, в результате длительного хранения, снизили свои электрические характеристики и находятся в пределах своих граничных значений. Время контрольного разряда положительных электродов различных элементов АБ составило от 48 до 44 минут, (45 минут согласно техническим условиям), а отрицательных от 19 до 16 минут, (17 минут согласно техническим условиям) [4].

В ходе эксперимента были получены дополнительные результаты, такие как: отсутствие подрыва электрозапалов одной из линии цепи взведения (38 ампул), а так же диафрагмы, после подрыва электрозапалов, имели самый низкий процент открытия (отверстия только вокруг запалов). Это может свидетельствовать о том, что полиамидная смола № 68, из которой изготовлены диафрагмы, а так же электрозапалы НХ-10Х1,5, вследствие геронтологических изменений, потеряли свои физико-химические свойства. Однако этот вопрос малоизучен и требует дополнительных исследований.

Исходя из вышеперечисленных данных, следует отметить, что серебряно-цинковые АБ торпед после длительного хранения (более 17 лет) не могут быть использованы по прямому назначению в связи со снижением своих электрических характеристик, а также потерей качества и надежности комплектующих деталей и узлов [16].

Эти результаты и выводы послужили основанием для разработки практических рекомендаций по коррекции эксплуатационной документации и выработке поправок в исходные данные торпедной стрельбы.

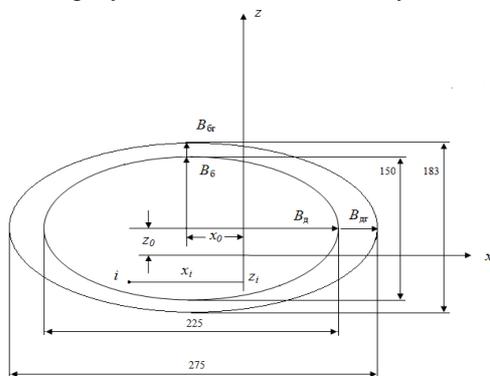


Рисунок 6 – Эллипс полигонного рассеивания торпед с учетом геронтологических изменений АБ

Произведя коррекцию исходных данных торпедной стрельбы с учетом геронтологических изменений АБ торпед, на основе разработанной методики установили, что для 50 % торпед корабельное рассеивание в боковом направлении B_b и корабельное рассеивание по дальности B_d будет превышать свои значения на 23 и 50 м соответственно. Для оставшихся 50 % торпед по нормальному закону распределения случайной величины эти значения будут в 6 раз больше ($6 \cdot B_{дг}$, $6 \cdot B_{гр}$) и будут равны 138 и 300 м соответственно, что составляет 1/2 длины радиуса реагирования активного канала АСН торпеды СЭТ-65 и перекрывает радиусы реагирования пассивного канала аппаратуры самонаведения (АСН) торпеды при скоростях ПЛ-цели от 9 до 18 узлов.

Установлено, что при одном и том же курсовом угле цели $q_{ц}$, угле встречи торпеды с целью θ и угле упреждения φ , значение общего пути торпеды проходимый ею от момента выстрела до момента встречи с целью $e_{об}$, вследствие геронтологических изменений АБ торпеды уменьшилось на 2174 м, что составляет 15 % от этого пути, а значение предельной дистанции торпедного залпа $D_{з,пр}$ уменьшилось на 1500 м, что составляет 15 % от ее номинального значения.

При определении угла расчетной точки встречи торпеды с целью φ получили, что данный угол, с учетом геронтологических изменений АБ торпеды φ_r , при одних и тех же условиях стрельбы, будет отличаться от истинного φ_n , и будет равен $\varphi_r = 9^0$, при $\varphi_n = 6,9^0$.

Таким образом, можно заключить, что геронтологические изменения, происходящие вследствие длительного хранения, с серебряно-цинковыми АБ торпед, приводят к необходимости вводить поправки в исходные параметры стрельбы, при решении задачи встречи торпеды с целью.

Разработанный метод введения поправки $\Delta\phi_2$, позволяет рассчитывать угол упреждения для других возможных условий торпедной стрельбы.

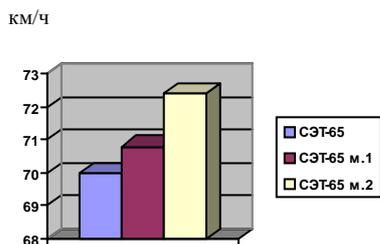


Рисунок 7 – Изменение скорости хода торпеды СЭТ-65 от изменения ее длины

Наряду с коррекцией исходных данных торпедной стрельбы и введением поправок на геронтологические изменения АБ торпед. Одним из приоритетных способов повышения ТТХ до уровня современных требований является модернизация основных базовых образцов торпед. Основными направлениями модернизации являются выявление наилучшего сочетания материалов электродов АБ, а также повышение электротехнических показателей, что приводит к уменьшению габаритов и массы торпеды.

Рассматривая возможность уменьшения длины аккумуляторного отсека торпеды СЭТ-65 на 100 мм и 500 мм, решили типовую задачу о возможности увеличения скорости хода торпеды за счет уменьшения гидравлического сопротивления, которое достигается путем уменьшения площади смачиваемой поверхности торпеды.

Для оценки влияния площади смачиваемой поверхности на скорость хода торпеды преобразовав выражение:

$$R_x = C_x \frac{\rho V_T^2}{2} S_T, \quad (4)$$

где ρ – массовая плотность воды; S_T – смачиваемая поверхность торпеды; C_x – коэффициент лобового сопротивления; V_T – скорость хода торпеды.

Получим:

$$V_T = \sqrt{\frac{2R_x}{C_x \rho S_T}}. \quad (5)$$

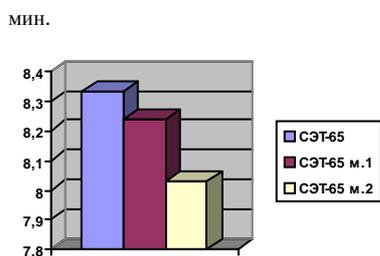


Рисунок 8 – Изменение времени прохождения торпедой СЭТ-65 пути под управлением прибора курса

Подставляя в выражение (5) измененные значения площади смачиваемой поверхности получили, что при уменьшении длины корпуса торпеды на 100 мм и 500 мм, скорость торпеды увеличится на 0,8 км/ч и 2,7 км/ч соответственно.

Увеличение скорости хода торпеды приведет к сокращению времени прохождения противолодочной торпедой пути (e_T), проходимого ею под управлением прибора курса от момента выстрела до момента обнаружения цели АСН что сокращает время противодействия корабля-цели.

Для определения изменения времени прохождения противолодочной торпедой пути, проходимого ею под управлением прибора курса от момента выстрела до момента обнаружения цели АСН решили типовую задачу встречи торпеды с целью [18] принимая путь e_T равным пути e_T – пути встречи прямоидущей торпеды с целью:

$$e_T = e_T = V_T t, \quad (6)$$

где e_T – путь проходимый противолодочной торпедой под управлением прибора курса от момента выстрела до момента обнаружения цели АСН; e_T – пути встречи прямоидущей торпеды с целью; V_T – скорость хода торпеды; t – время хода торпеды.

Подставляя в выражение (6) измененные значения скорости хода торпеды было установлено, что при прохождении торпедой одной и той же дистанции, равной 10000 м, время прохождения торпедой пути e_T уменьшилось на 30 секунд, что дает возможность скорейшему включению АСН и обнаружения ею цели, а так же оставляет цели меньше времени для маневрирования.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики торпеды СЭТ-65 базовой модели и модернизированной

Приведенные сравнительные данные служат основанием для разработки технического задания по модернизации торпеды СЭТ-65 путем уменьшения ее длины за счет применения АБ с большей плотностью заряда [13, 17].

Таблица 1 – Сравнительные характеристики торпеды СЭТ-65 базовой модели и модернизированной

Название торпеды	Длина торпеды, мм	Скорость торпеды, км/ч	Время прохождения пути до цели, мин
СЭТ-65	7800	72	8,33
СЭТ-65, модернизированная 1	7700	72,8	8,24
СЭТ-65, модернизированная 2	7300	74,7	8,03

Предложенный способ модернизации и конструктивные особенности АБ А-187М, позволяют в пределах базовой модели корректировать массу и габариты торпеды, а также влиять на основные тактико-технические характеристики торпеды – скорость и дальность.

Таким образом проведенное комплексное теоретическое и экспериментальное исследование позволяет определить сроки эксплуатации торпед СЭТ-65, а также корректировать исходные данные при стрельбе торпедами с геронтологическими изменениями АБ, а так же определить пути модернизации для, как минимум, обеспечения и возможного повышения скорости и дальности хода торпеды.

Литература

1. Кольшкін М.М. Противолодочное торпедное оружие – Л.: ВВМКУ им. М.В. Фрунзе, 1985. – 458 с.
2. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока – М.: «Советское радио», 1978. – 263 с.
3. Отчет исследования батарей А-187М, после длительного хранения и определение возможности их использования. – ОАО НПФ«Луганский аккумулятор», 2001. – 7 с.
4. Акт технического состояния батарей А-187М, поступивших для капитального ремонта в соответствии с договором № 35/20-61 от 10.12.2004 г.// ООО «Луганский аккумулятор», 2004. – 2 с.
5. Голубков В.А., Гвоздев Н.Г., Закаряевский К.А. Описание торпеды СЭТ-65, книга 1, торпедно-силовая часть и приборы управления – М.: Военное издательство МО СССР, 1967. – 279 с.
6. Подобрый Г.М., Белобородый В.С., Халимонов В.В., Носов А.И. Теоретические основы торпедного оружия – М.: Военное издательство МО СССР, 1969. – 359 с.
7. Косарев В.В., Садовников В.Н. Торпедное оружие. // Методические указания для самостоятельной работы по дисциплине «Боевые средства флота и их боевое применение». – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. – 48 с.
8. Савченко Г.Б. Двигатели двусредных аппаратов. – Самиздат. // Электронный интернет ресурс – <http://samizdat.net/mchat>.
9. Руководство по хранению и ремонту противолодочного, торпедного, минного, противоминного и противопоходно-диверсионного оружия и вооружения. – М.: Военное издательство МО СССР, 1986. – 279 с.
10. Мостков М.А., Гидравлический справочник – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1954. – 531 с.
11. Сборник работ по ХИТ, НИАИ, № 2, 1967, 92 с.
12. Аналіз та підсумки експлуатації озброєння та військової техніки Збройних сил України у 2011 році // Озброєння Збройних сил України. – Київ, 2012. – 67 с.
13. Кислов Ф.И. Основные тенденции развития торпедного оружия стран НАТО // Зарубежное военное обозрение. – М.: Красная звезда, 2002. Вып. 7, – С. 46–52.
14. Щепцов О.В., Комплексная модернизация торпедного оружия, как метод достижения современных требований к их тактико-техническим характеристикам. – Збірник наукових праць АВМС імені П.С. Нахімова, № 3, 2012.
15. Щепцов О.В., Влияние геронтологических изменений химических источников электрической энергии на основные энергетические показатели малоразмерных автономных подводных аппаратов. – Інтегровані технології та енергозбереження, №2, 2012.
16. Анипко О.Б., Редин Н.Н., Щепцов О.В., Экспериментальное исследование аккумуляторных батарей электрических торпед, находящихся на послегарантийных этапах эксплуатации. – Інтегровані технології та енергозбереження, №2, 2013.
17. Куренков В.О. Перспективы развития торпедного оружия ВМС зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. – М.: Красная звезда, 2008. Вып. 1, – С. 68–76.
18. Кольшкін М.М. Противолодочное торпедное оружие – Л.: ВВМКУ им. М.В. Фрунзе, 1985. – С. 458.

Bibliography (transliterated)

1. Kolyishkin M.M. Protivolodochnoe torpednoe oruzhie – L.: VVMKU im. M.V. Frunze, 1985. – 458 p.

2. Romanov V.V., Hashev Yu.M. Himicheskie istochniki toka – M.: «Sovetskoe radio», 1978. – 263 p.
3. Otchet issledovaniya batarey A-187M, posle dlitel'nogo hraneniya i opredelenie vozmozhnosti ih ispolzovaniya. – OAO NPF «Luganskiy akkumulyator», 2001. – 7 p.
4. Akt tehniceskogo sostoyaniya batarey A-187M, postupivshih dlya kapital'nogo remonta v sootvetstvii s dogovorom # 35/20-61 ot 10.12.2004 g. OOO «Luganskiy akkumulyator», 2004. – 2 p.
5. Golubkov V.A., Gvozdev N.G., Zakarzhvskiy K.A. Opisanie torpedy SET-65, kniga 1, torpedno-silovaya chast i pribory upravleniya – M.: Voennoe izdatel'stvo MO SSSR, 1967. – 279 p.
6. Podobriy G.M., Beloborodiy V.S., Halimonov V.V., Nosov A.I. Teoreticheskie osnovy torpednogo oruzhiya – M.: Voennoe izdatel'stvo MO SSSR, 1969. – 359 p.
7. Kosarev V.V., Sadovnikov V.N. Torpednoe oruzhie. Metodicheskie ukazaniya dlya samostoyatel'noy raboty po distsipline «Boevye sredstva flota i ih boevoye primeneniye». – SPb.: SPbGETU «LETI», 2000. – 48 p.
8. Savchenko G.B. Dvigateli dvusrednykh apparatov. – Samizdat. Elektronnyy internet resurs – <http://samizdat.net/mchat>.
9. Rukovodstvo po hraneniyu i remontu protivolodochnogo, torpednogo, minnogo, protivomin'nogo i protivopodvodno-diversionnogo oruzhiya i vooruzheniya. – M.: Voennoe izdatel'stvo MO SSSR, 1986. – 279 p.
10. Mostkov M.A., Gidravlicheskiy spravochnik – M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture, 1954. – 531 p.
11. Sbornik rabot po HIT, NIAI, # 2, 1967, 92 p.
12. Analiz ta pidsumki ekspluatatsiyi ozbroennya ta viyskovoyi tehniki Zbroynih sil Ukrayini u 2011 rotsi. Ozbroennya Zbroynih sil Ukrayini. – Kiyiv, 2012. – 67 p.
13. Kislov F.I. Osnovnyie tendentsii razvitiya torpednogo oruzhiya stran NATO. Zarubezhnoe voennoe obozrenie. – M.: Krasnaya zvezda, 2002. Vyip. 7, – P. 46–52.
14. Scheptsov O.V., Kompleksnaya modernizatsiya torpednogo oruzhiya, kak metod dostizheniya sovremennykh trebovaniy k ih taktiko-tehnicheskim harakteristikam. – Zbirnik naukovih prats AVMS Imeni P.S. Nahimova, # 3, 2012.
15. Scheptsov O.V., Vliyanie gerontologicheskikh izmeneniy himicheskikh istochnikov elektricheskoy energii na osnovnyie energeticheskie pokazateli malorazmernykh avtonomnykh podvodnykh apparatov. – Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya, #2, 2012.
16. Anipko O.B., Redin N.N., Scheptsov O.V., Eksperimentalnoe issledovanie akkumulyatornykh batarey elektricheskikh torped, nahodyaschihsya na poslegarantiynykh etapah ekspluatatsii. – Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya, #2, 2013.
17. Kurenkov V.O. Perspektivy razvitiya torpednogo oruzhiya VMS zarubezhnykh stran. Zarubezhnoe voennoe obozrenie. – M.: Krasnaya zvezda, 2008. Vyip. 1, – P. 68–76.
18. Kolyishkin M.M. Protivolodochnoe torpednoe oruzhie – L.: VVMKU im. M.V. Frunze, 1985. – P. 458.

УДК 623:946

Аніпко О.Б., Щепцов О.В.

ГЕРОНТОЛОГІЧНІ ЗМІНИ СРІБНО-ЦИНКОВИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ТОРПЕДИ SET-65 В ПРОЦЕСІ ТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ

Розроблено підхід до рішення задачі визначення зміни основних енергетичних показників акумуляторних батарей торпед на післягарантійних етапах експлуатації та їх вплив на основні тактичні характеристики торпедної зброї. На підставі проведених експериментальних досліджень акумуляторних батарей торпед, що знаходяться на післягарантійних етапах експлуатації, показані зміни, що відбуваються з елементами і складовими частинами акумуляторної батареї. Виконана корекція вихідних даних торпедної стрільби з урахуванням геронтологічних змін акумуляторних батарей торпед на основі введення поправок.

Anipko O.B., Shepcev O.V.

GERONTOLOGY CHANGES OF SILVER-ZINC STORAGE BATTERIES OF THE SET-65 TORPEDO IN THE PROCESS OF THE AFTER GUARANTEE STORAGE

A hike is developed to the decision of task of determination of change of basic power indexes of storage batteries of torpedoes on the after guarantee stages of exploitation and their influence on basic tactical descriptions of torpedoing weapon. On the basis of the conducted experimental researches of storage batteries of torpedoes being on the after guarantee stages of exploitation, the changes what is going on with elements and component parts of storage battery are shown. Correction of basic data of the torpedoing firing taking into account the gerontology changes of storage batteries of torpedoes on the basis of introduction of amendment is produced.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ЄМНОСТІ СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКУМУЛЯТОРІВ

Постановка науково-технічної задачі. Під час експлуатації свинцево-кислотних акумуляторів крім основних процесів, які відбуваються при зарядженні і розрядженні електродів, мають місце і інші процеси, які приводять до втрат ємності акумулятора. Серед цих процесів найбільш негативними є сульфатація електродів і їх саморозрядження. Відомо, що основною причиною сульфатації і саморозрядження є термодинамічна нестійкість металевого свинцю (негативний електрод) та діоксида свинцю (позитивний електрод). При цьому на електродах відбуваються наступні реакції: катодне відновлення діоксида свинцю $PbO_2 + 2e + H_2SO_4 + 2H^+ \rightarrow PbSO_4 + 2 H_2O$ та анодне відновлення молекул води $H_2O - 2e \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2H^+$.

Для визначення фактичного стану акумулятора в умовах, коли мають місце втрати його ємності, необхідно мати можливість визначити залишкову ємність акумулятора.

Аналіз літератури. В відомій літературі [1–3] питанням визначення залишкової ємності акумулятора приділяється багато уваги. Разом з тим, технічні рішення, які використовуються для визначення залишкової ємності, ґрунтуються на обчисленні в лічильниках ампер-годин кількості електрики, отриманої під час зарядження, за мінусом кількості електрики, що віддається під час розрядження. Визначена таким чином ємність акумулятора не має нічого спільного з його фактичною залишковою ємністю, оскільки отримане значення ємності не враховує ні корозію електродів, ні їх сульфатацію, ні їх саморозряд. До речі, невідомо також й те, яку кількість електрики накопичено в процесі зарядження акумулятора, оскільки кількість накопиченої електрики не дорівнює її кількості, отриманої в процесі зарядження. Мета статті обґрунтування можливості визначення залишкової ємності акумулятора.

Основний матеріал. Для визначення фактичної ємності акумулятора доцільно використовувати співвідношення Пейкерта [2], відповідно до якого добуток часу розряду t_p на силу розрядного струму I дорівнює

$$t_p I^{n_1} = b, \tag{1}$$

де n_1, b – постійні величини.

Використовуючи (1) та вводячи поняття номінальної ємності $Q_{НОМ}$, яка віддається номінальним струмом $I_{НОМ}$ за час $t_{НОМ}$, знайдемо ємність $Q(t)$, яка віддається за час t при розряді струмом I .

$$Q(t) = Q_{НОМ} \left(\frac{I_{НОМ}}{I} \right)^{n_1-1}. \tag{2}$$

З (1) маємо, що

$$\frac{I_{НОМ}}{I} = \left(\frac{t}{t_{НОМ}} \right)^{\frac{1}{n_1}}. \tag{3}$$

Нарешті,

$$Q(t) = Q_{НОМ} \left(\frac{t}{t_{НОМ}} \right)^{\frac{n_1-1}{n_1}}. \tag{4}$$

Таким чином, використовуючи співвідношення (4) можливо знайти кількість електрики, яка розходжується під час розряду t струмом I . Взявши похідну з (4) за часом, отримуємо співвідношення, яке визначає швидкість зміни ємності

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{Q_{\text{НОМ}} \cdot \frac{n_1 - 1}{n_1}}{t_{\text{НОМ}}^{\frac{n_1 - 1}{n_1}} \cdot \frac{1}{t^{n_1}}}. \quad (5)$$

З (5) слідує, що процеси, які супроводжують втрати ємності спочатку йдуть більш інтенсивно, а в подальшому поступово затримуються.

Визначені за допомогою виразу (4) втрати ємності не враховують процеси саморозрядження. Для встановлення втрат ємності під час саморозрядження використаємо закон Фарадея, відповідно до якого для забезпечення ємності $Q(t)$ теоретично потрібна маса m активних речовин повинна становити

$$m = KeIt = KeQ(t), \quad (6)$$

де Ke – електрохімічний еквівалент.

Число Фарадея $Fe = 96490 \frac{\text{Кул}}{\text{г-екв}}$, тобто 96490 Кулон створюються одним грам-еквівалентом свинцю. Оскільки атомна вага свинцю дорівнює 207,2 г, а його валентність дорівнює 2, то еквівалентна вага свинцю дорівнює 103,6 г. З зазначених міркувань слідує, що при протіканні струму, рівного 1 А на протязі даного часу, кількість розходуемого свинцю у негативного електрода дорівнює 3,66 г. При цьому на позитивному електроді повинно бути витрачено 4,463 г двооксида свинцю.

Таким чином, теоретично можлива ємність акумулятора Q_T визначається масою активної речовини

$$Q_T = \frac{m}{Ke}. \quad (7)$$

Сульфат свинцю, який утворюється в процесі роботи акумулятора звужує доступ активного матеріалу та ускладнює дифузію електроліту до електродів, що не дозволяє повністю використовувати активну масу. Особливо інтенсивно сульфатація відбувається при збільшенні сили розрядного струму, коли кристалічний сульфат свинцю накопичується в поверхневому прошарку активної маси з утворенням щільного твердого прошарку сульфата свинцю. Процес сульфатації електродів можливо оцінити, вводючи для цього поняття дефіциту активної маси Δm . При цьому фактична ємність акумулятора Q_Φ стає менше теоретичного значення

$$Q_\Phi = \frac{m - \Delta m}{Ke}. \quad (8)$$

Безпосереднє визначення дефіциту активної маси практично неможливо, а тим самим дуже складно визначити втрати ємності акумулятора за час його саморозрядження. При з'ясуванні величини втрат ємності доцільно виходити з наступних міркувань. Вважаючи, що процеси розрядження і саморозрядження носять сталий характер та визначивши експериментально час повного саморозрядження $t_{\text{ср}}$, можливо знайти втрати ємності, використовуючи співвідношення (4), в якому замість $t_{\text{НОМ}}$ слід підставити значення $t_{\text{ср}}$. Знайдені таким чином величини втрат ємності можуть суттєво відрізнятися від реальних втрат ємності за час експлуатації акумулятора. Більш точні результати можуть бути отримані іншим шляхом. При сульфатації електродів змінюється їх активний опір $R_{\text{ел}}$ та електрична ємність $C_{\text{ел}}$. Для визначення залежностей $Q(t) = f(R_{\text{ел}}, C_{\text{ел}})$ необхідно експериментально отримати амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики, подаючи на вхід акумулятора змінну напругу інфранизької частоти. Такі харак-

теристики потрібно знімати на протязі всього часу експлуатації акумуляторів і по результатам їх обробки обчислювати $Q(t)$.

Висновки

1. Величина ємності, що втрачається за час розрядження акумулятора, визначається за допомогою співвідношення Пейкерта, яке пов'язує поточне значення ємності з його номінальним значенням й часом розрядження.

2. Фактична ємність акумулятора завжди не перевищує її номінального значення, яке залежить від маси активних речовин, накопичених на електродах акумулятора.

3. За час експлуатації кислотних акумуляторів внаслідок сульфатизації їх електродів ємність акумуляторів зменшується, що пов'язується з явищами саморозряду, які приводять до зменшення маси активних речовин (дефекту маси).

4. Для визначення залишковою ємності кислотних акумуляторів доцільно експериментально отримати їх амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики, які слід знімати в діапазоні інфранизьких частот.

Література

1. Системы автономного электроснабжения. Учебник. Б.Ф. Самойленко, Б.Т. Кононов, Ю.А. Скворцов, Н.И. Григоров, В.Г. Михайловский. МО СССР, 1990. – 317 с.
2. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока. – М.: Сов. радио, 1978. – 328 с.
3. Дасоян М.А., Агур И.А. Современная теория свинцового аккумулятора. – Л.: Энергия, 1975.– 297 с.

Bibliography (transliterated)

1. Sistemyi avtonomnogo elektrosnabzheniya. Uchebnik. B.F. Samoilenko, B.T. Kononov, Yu.A. Skvortsov, N.I. Grigorov, V.G. Mihaylovskiy. MO SSSR, 1990. – 317 p.
2. Romanov V.V., Hashev Yu.M. Himicheskie istochniki toka. – M.: Sov. radio, 1978. – 328 p.
3. Dasoyan M.A., Agur I.A. Sovremennaya teoriya svintsovogo akkumulyatora.– L.: Energiya, 1975.– 297 p.

УДК 541.35

Кононов Б.Т.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ЕМКОСТИ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

В статье рассматриваются методы определения емкости аккумуляторов, основанные на использовании зависимости Пейкерта и снятие амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик аккумуляторов.

Kononov B.T.

DETERMINATION OF THE RESIDUAL CAPACITY OF LEAD-ACID BATTERIES

Methods for determining battery capacity based on the use and removal of correlations Peukerta amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of batteries were considered

Борисюк М.Д., Александров Е.Е., Александрова Т.Е.

**К ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ ИНВАРИАНТНОГО СТАБИЛИЗАТОРА КАНАЛА
ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВЕДЕНИЯ ОСНОВНОГО ВООРУЖЕНИЯ ТАНКА**

Система наведения и стабилизации танковой пушки, являющейся основным вооружением танка, содержит два независимых канала – канал вертикального наведения, в котором поворот пушки осуществляется относительно оси цапф, и канал горизонтального наведения, в котором поворот пушки вместе с башней осуществляется относительно оси поворота башни. Танковая башня неуравновешена относительно ее оси поворота, в связи с тем, что эта ось не совпадает с главной центральной вертикальной осью инерции, проходящей через центр масс башни. При повороте танка возникает центробежная сила, приложенная к центру масс башни, вызывающая поворот башни относительно ее оси поворота и, следовательно, отклонение оси канала ствола относительно линии прицеливания. Для придания системе наведения и стабилизации свойства инвариантности к действию внешних возмущений в канал горизонтального наведения танковой пушки помимо гироскопических датчиков угла и угловой скорости введен также датчик линейных ускорений, ось чувствительности которого параллельна главной центральной боковой оси инерции танковой башни [1]. При входе танка в поворот к его неуравновешенной башне прикладывается момент возмущения

$$M_{\sigma\sigma}(t) = m_{\sigma} \cdot ha_y(t), \tag{1}$$

где m_{σ} – полная масса башни с пушкой; h – расстояние между осью поворота башни и ее главной центральной вертикальной осью инерции; $a_y(t)$ – центробежное ускорение, измеренное датчиком линейных ускорений и определяемое формулой:

$$a_y(t) = \frac{v^2(t)}{R(t)}, \tag{2}$$

где $v(t)$ – мгновенная скорость движения центра масс танка; $R(t)$ – текущий радиус поворота.

Алгоритм стабилизации танковой пушки в канале горизонтального наведения имеет следующий вид

$$U_{\psi}(t) = k_{\psi}\psi(t) + k_{\dot{\psi}}\dot{\psi}(t) + k_a a_y(t), \tag{3}$$

где $\psi(t)$ – угловое рассогласование оси канала ствола танковой пушки и линии прицеливания; $\dot{\psi}(t)$ – угловая скорость поворота башни; k_{ψ} , $k_{\dot{\psi}}$ и k_a – варьируемые константы алгоритма (3).

Алгоритм стабилизации (3) реализует комбинацию двух известных принципов управления – принцип управления по отклонению, который реализуют два первых слагаемых правой части (3) и принцип управления по возмущению, который реализует третье слагаемое правой части (3). Такая комбинация доставляет замкнутой системе стабилизации свойство инвариантности к действию внешнего возмущения. Это объясняется тем, что сигнал на выходе датчика линейных ускорений $a_y(t)$ появляется на входе системы стабилизации, реализующей алгоритм (3), еще до начала увода оси канала ствола от линии прицеливания, иными словами, до появления выходного сигнала $\psi(t)$ гироскопического датчика угла и выходного сигнала $\dot{\psi}(t)$ гироскопического датчика угловой скорости. Такая система начинает реагировать не на результат действия внешнего возмущения, а собственно на внешнее возмущение (1), что приводит к улучшению его обработки системой.

Танковая пушка уравновешена относительно оси цапф. Кроме того, прицельный огонь из основного вооружения танка ведется в пределах прямой видимости цели при малых углах возвышения пушки. При этом внешнее возмущение, действующее на танковую пушку в канале вертикального наведения при повороте танка, определяемое формулой

$$M_{\sigma n}(t) = m_c l a_y(t) \sin \varphi_0(t), \tag{4}$$

считается малым вследствие малости текущего угла возвышения $\varphi_0(t)$. В (4) через m_c обозначена масса ствола танковой пушки, а через l – расстояние от оси цапф до центра тяжести ствола. Малость момента (4) объяснят отсутствие требования инвариантности к системе наведения и стабилизации танковой пушки в канале вертикального наведения.

Вместе с тем, при ведении танком боевых действий в горных районах угол возвышения танковой пушки может достигать значительных величин. В этом случае пропорционально-дифференциальный алгоритм стабилизации

$$U_{\varphi}(t) = k_{\varphi}\varphi(t) + k_{\dot{\varphi}}\dot{\varphi}(t), \quad (5)$$

реализуемый в канале вертикального наведения не обеспечивает требуемого качества обработки внешнего возмущения (4). Для повышения точности стабилизации оси канала ствола относительно линии прицеливания целесообразно в канале вертикального наведения танковой пушки обеспечить системе наведения и стабилизации свойство инвариантности к действию внешних возмущений

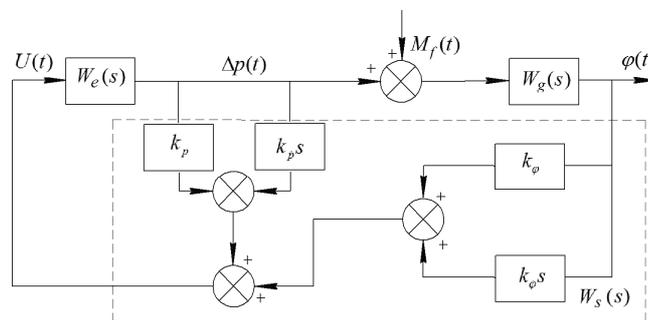


Рисунок 1 – Структурная схема замкнутой инвариантной системы наведения и стабилизации танковой пушки

В работе [2] авторами разработана структурная схема инвариантного стабилизатора канала вертикального наведения танковой пушки, представленная на рис. 1, где приняты обозначения: $\varphi(t)$ – угловое рассогласование оси канала ствола и линии прицеливания; $\beta(t)$ – угол поворота якоря электромагнита электрогидравлического усилителя; $\Delta p(t)$ – разность давлений рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра; $M_f(t)$ – внешнее возмущение, действующее на танковую пушку; $U_{\varphi}(t)$ – выходной сигнал электронного блока стабилизации; k_{φ} , $k_{\dot{\varphi}}$, k_p , $k_{\dot{p}}$ – варьируемые параметры алгоритма стабилизации, формируемого электронным блоком стабилизатора

$$U_{\varphi}(t) = k_{\varphi}\varphi(t) + k_{\dot{\varphi}}\dot{\varphi}(t) + k_p\Delta p(t) + k_{\dot{p}}\dot{\Delta p}(t); \quad (6)$$

$W_e(s)$ – передаточная функция электрогидравлического усилителя (ЭГУ), являющегося исполнительным органом системы наведения и стабилизации в канале вертикального наведения; $W_g(s)$ – передаточная функция танковой пушки; $W_s(s)$ – передаточная функция электронного блока стабилизатора.

Внешнее возмущение (4), действующее на танковую пушку в канале вертикального наведения, приводит к изменению разности давлений рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра, поэтому третье и четвертое слагаемое в алгоритме (6) должны доставлять системе наведения и стабилизации свойство инвариантности к действию возмущения (4).

В работе [3] приведена математическая модель танковой пушки как объекта стабилизации с ЭГУ в канале вертикального наведения, которая записывается в виде системы дифференциальных уравнений

$$I_g \ddot{\varphi}(t) = k_m \Delta p(t) + M_f(t); \quad (7)$$

$$T_d \Delta \dot{p}(t) + \Delta p(t) = k_d \beta(t); \quad (8)$$

$$T_1^2 \ddot{\beta}(t) + T_2 \dot{\beta}(t) + \beta(t) = k_u U_{\varphi}(t), \quad (9)$$

где I_g – момент инерции пушки относительно оси цапф; T_d – постоянная времени гидравлической части ЭГУ; T_1, T_2 – постоянные времени электрической части ЭГУ; k_m, k_d, k_u – коэффициенты пропорциональности.

Из системы дифференциальных уравнений (7)–(9) имеем:

$$W_e(s) = \frac{k_d k_u}{(T_d s + 1)(T_1^2 s^2 + T_2 s + 1)}; \quad W_g(s) = \frac{k_m}{I_g s^2}. \quad (10)$$

Точность стабилизации оси канала ствола танковой пушки будем оценивать величиной интегрального квадратичного функционала [3]

$$I = \int_0^T [\beta_1^2 \varphi^2(t) + \beta_2^2 \dot{\varphi}^2(t)] dt, \quad (11)$$

где β_1 , и β_2 – весовые коэффициенты, подлежащие выбору.

В работе [4] изложена методика решения задачи параметрического синтеза замкнутой системы стабилизации (7)–(9), (5), состоящей в отыскании значений варьируемых параметров k_φ и $k_{\dot{\varphi}}$ алгоритма стабилизации (5), доставляющих на решениях замкнутой системы (7)–(9), (5) минимум аддитивному функционалу (11). Эта методика включает также выбор весовых коэффициентов функционала (11) в соответствии с материалами статьи [5]. В статье [6] показано, что решение сформулированной выше задачи параметрического синтеза единственно, иными словами, функционал (11) в области устойчивости замкнутой системы (7)–(9), (5) имеет единственный глобальный минимум и не имеет минимумов локальных, что значительно облегчает получение решения задачи параметрического синтеза с использованием программных продуктов Minimize пакета MathCAD или Optimization Toolbox пакета MatLAB. Однако использование изложенной в работе [4] методики встречает определенные трудности при решении задачи параметрического синтеза замкнутой инвариантной системы стабилизации (7)–(9), (6), которая включает помимо отыскания параметров k_φ и $k_{\dot{\varphi}}$ также отыскание параметров k_p и $k_{\dot{p}}$. Эти трудности связаны с тем, что значения переменных состояния объекта стабилизации (7)–(9) весьма различны. Так переменные $\varphi(t)$ и $\dot{\varphi}(t)$ могут достигать значений $\varphi_{\max} = 1$ рад; $\dot{\varphi}_{\max} = 4$ с⁻¹, переменные $\beta(t)$ и $\dot{\beta}(t)$ значений $\beta_{\max} = 0,1$ рад; $\dot{\beta}_{\max} = 1$ с⁻¹, а переменные $\Delta p(t)$ и $\Delta \dot{p}(t)$ значений $\Delta p_{\max} = 9 \cdot 10^6$ Па; $\Delta \dot{p}_{\max} = 10^9$ Па · с⁻¹. При этом матрицы, используемые программными продуктами Minimize или Optimization Toolbox, являются плохо обусловленными, что приводит к значительным погрешностям решения задачи параметрического синтеза в части отыскания варьируемых параметров k_p и $k_{\dot{p}}$.

В соответствии с вышеизложенным, в данной работе предлагается значения варьируемых параметров k_p и $k_{\dot{p}}$ алгоритма (6) отыскивать из условия достижения максимального порядка инвариантности замкнутой системы стабилизации к действию внешних возмущений, а варьируемые параметры k_φ и $k_{\dot{\varphi}}$ – из условия минимума функционала (11), вычисляемого на решениях замкнутой системы (7)–(9), (6) при выбранных значениях параметров k_p и $k_{\dot{p}}$.

В соотношениях (10) введем обозначения:

$$k_d k_u = k_y; \quad \frac{k_m}{I_g} = k_g.$$

Используя схему, представленную на рис. 1, запишем соотношения для передаточной функции разомкнутой системы и характеристического полинома замкнутой системы стабилизации:

$$W_r(s) = \frac{k_y k_g (k_\varphi + k_{\dot{\varphi}} s)}{s^2 [T_d T_1^2 s^3 + (T_1^2 + T_d T_2) s^2 + (T_d + T_2 + k_y k_{\dot{p}}) s + 1 + k_y k_p]}; \quad (12)$$

$$A(s) = T_d T_1^2 s^5 + (T_1^2 + T_d T_2) s^4 + (T_d + T_2 + k_y k_{\dot{p}}) s^3 + (1 + k_y k_p) s^2 + k_y k_g k_{\dot{\varphi}} s + k_y k_g k_{\varphi} \quad (13)$$

Из рассмотрения соотношения (12) можно сделать заключение о том, что порядок астатизма и порядков инвариантности системы стабилизации равен двум. Для повышения порядка инвариантности системы повысим порядок ее астатизма положив

$$1 + k_y k_p = 0. \quad (14)$$

При выполнении условия (14) передаточная функция разомкнутой системы принимает вид

$$W_e(s) = \frac{k_y k_g (k_{\varphi} + k_{\dot{\varphi}} s)}{s^3 [T_d T_1^2 s^2 + (T_1^2 + T_d T_2) s + T_d + T_2 + k_y k_{\dot{p}}]}, \quad (15)$$

что свидетельствует о повышении порядка астатизма системы до трех.

Из условия (14) следует, что значение варьируемого коэффициента k_p , при котором происходит повышение порядка инвариантности системы, составляет

$$k_p = -\frac{1}{k_y}. \quad (16)$$

Зададим изменение по времени внешнего возмущения системы $M_f(t)$ в виде, представленном на рис. 2, а значения конструктивных параметров объекта стабилизации (7)–(9) положим равными: $J_g = 736,9 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$; $k_m = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Па}^{-1}$; $T_d = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $k_d = -1,238 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $k_u = 10^{-1} \text{ В}^{-1}$; $T_1 = 0,01 \text{ с}$; $T_2 = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}$.

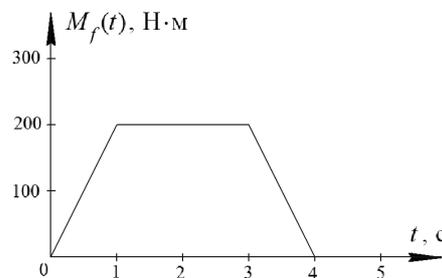


Рисунок 2 – Внешнее возмущение $M_f(t)$

Значения варьируемых параметров k_p и $k_{\dot{p}}$ алгоритма (6) положим равными нулю, а значения параметров k_{φ} и $k_{\dot{\varphi}}$ получим с помощью использования методики решения задачи параметрического синтеза, изложенной в работе [4]. При этом полученные оптимальные значения варьируемых параметров k_{φ} и $k_{\dot{\varphi}}$, доставляющие минимум функционалу (11), составляют $k_{\varphi}^* = 249 \text{ В}$; $k_{\dot{\varphi}}^* = 125 \text{ В} \cdot \text{с}$. Минимальное значение функционала (11) при полученных оптимальных значениях варьируемых параметров k_{φ} и $k_{\dot{\varphi}}$ составляет $J^* = 2,24$.

Затем, полагая равным нулю значение варьируемого параметра $k_{\dot{p}}$, будем изменять значение параметра k_p и вычислять при этом значение функционала (11), зависимость которого от значений параметра k_p приведена на рис. 3.

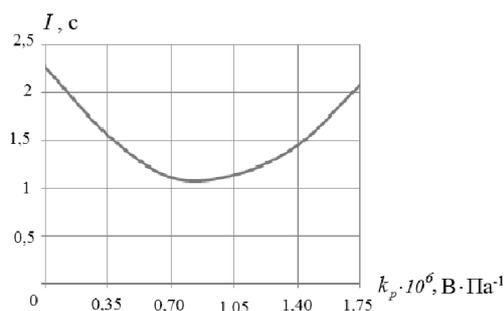


Рисунок 3 – Зависимость функционала (11) от значения коэффициента k_p

Из анализа рис. 3 можно сделать заключение, что минимум функционала (11) достигается при значении варьируемого параметра k_p , определяемом формулой (16), а именно $k_p^* = 0,736 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1}$.

Вместе с тем, выполнение условия (14) приводит к обращению в нуль коэффициента при четвертом слагаемом характеристического полинома замкнутой системы (13), что соответствует выходу замкнутой системы на границу области устойчивости. Возрастание значения функционала при $k_p > k_p^*$ происходит вследствие выхода замкнутой системы за пределы области устойчивости. Таким образом между свойством инвариантности к действию внешних возмущений и устойчивостью системы существует противоречие, устранение которого возможно с помощью компромисса между порядком инвариантности и запасом устойчивости замкнутой системы. Так, значение варьируемого параметра k_p следует выбирать в интервале

$$0 < k_p \leq k_p^*. \quad (17)$$

На рис. 4 приведены процессы наведения и стабилизации танковой пушки при различных значениях варьируемого параметра k_p .

Анализ этих процессов подтверждает известный вывод о том, что повышение порядка инвариантности системы приводит к улучшению процессов обработки внешних возмущений, действующих на объект стабилизации.

Если еще более повысить порядок астатизма системы и помимо условия (14) положить

$$T_d + T_2 + k_y k_p = 0, \quad (18)$$

то передаточная функция разомкнутой системы принимает вид

$$W_r(s) = \frac{k_y k_g (k_\phi + k_\phi s)}{s^4 (T_d T_1^2 s + T_1^2 + T_d T_2)}$$

При этом порядок астатизма системы повышается до четырех и замкнутая система становится абсолютно инвариантной к действию внешних возмущений. В то же время система полностью теряет устойчивость в связи с тем, что выполнение условий (14) и (18) приводит к выходу системы за пределы области устойчивости вследствие равенства нулю коэффициентов при третьем и четвертом членах характеристического полинома.

Положим в алгоритме (6) значения варьируемых параметров равными $k_\phi = k_\phi^*$; $k_\phi = k_\phi^*$; $k_p = k_p^*$ и построим зависимость функционала (11), вычисленного на решениях замкнутой системы (7)–(9), (6) при различных значениях варьируемого параметра k_p . Такая зависимость приведена на рис. 5, из рассмотрения которой можно заключить, что минимум функционала (11) достигается при $k_p = 0$, поэтому введение обратной связи по производной разности давления рабочей жидкости $\Delta \dot{p}(t)$ не только не приводит к

повышению точности замкнутой системы наведения и стабилизации, а наоборот, приводит к ее снижению.

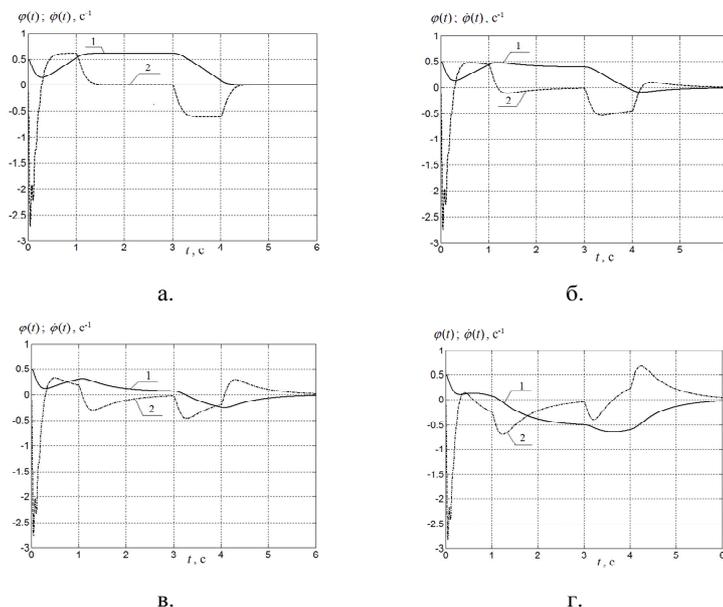


Рисунок 4 – Процессы отработки внешнего возмущения:

1 – $\phi(t)$; 2 – $\dot{\phi}(t)$; а. – $k_p = 0$; б. – $k_p = 0,3 \cdot 10^{-6} B \cdot Па^{-1}$; в. – $k_p = 0,736 \cdot 10^{-6} B \cdot Па^{-1}$; г. – $k_p = 1,2 \cdot 10^{-6} B \cdot Па^{-1}$

Таким образом, алгоритм стабилизации, реализуемый инвариантной системой наведения и стабилизации танковой пушки в канале вертикального наведения, целесообразно выбирать в виде

$$U_{\phi}(t) = k_{\phi}^* \phi(t) + k_{\dot{\phi}}^* \dot{\phi}(t) + k_p \Delta p(t),$$

где значение варьируемого параметра k_p выбирается из условия (17).

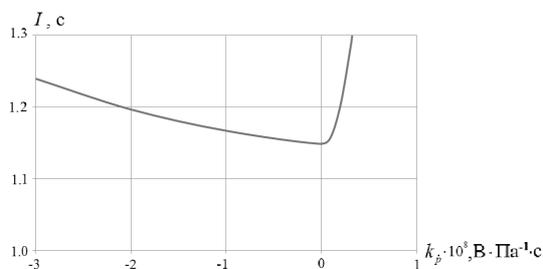


Рисунок 5 – Зависимость функционала (11) от варьируемого параметра k_p

Литература

1. Ледовский А.Д., Свердлов Р.И. Анализ возмущающих воздействий неуровновешенной танковой башни // Вестник бронетанковой техники. – 1969. – № 1. – С. 7–10.
2. Пат. UA 83903 від 10.10.2013, Україна. МПК F41G 5/00. Стабілізатор танкової гармати / Александрова Т.Е., Лазаренко А.О. НТУ "ХПУ". Заявка № 201300690 від 21.01.13. Бюл. №19.
3. Александрова Т.Е., Лазаренко А.А. Параметрический синтез инвариантного стабилизатора танковой пушки // Интегровані технології та енергозбереження. – 2013. – №2. – С. 11–46.
4. Александрова Т.Е., Истомин А.Е., Костяник И.В. Параметрический синтез оптимального стабилизатора танковой пушки // Механіка та машинобудування. – 2012. – №2. – С. 203–210.
5. Александров Е.Е., Александрова Т.Е. Выбор оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза систем стабилизации // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2004. – №2(11). – С. 23–26.

6. Александрова Т.Е. О единственности решения задачи параметрического синтеза линейной динамической системы с интегральным квадратичным критерием оптимальности // Системы обработки информации: сборник научных работ. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил. – 2013. – Вип. 7(114). – С. 116–120.

Bibliography (transliterated)

1. Ledovskiy A.D., Sverdlov R.I. Analiz vozmushchayuschih vozdeystviy neuravnoveshennoy tankovoy bashni. Vestnik bronetankovoy tehniki. – 1969. – # 1. – P. 7–10.
2. Pat. UA 83903 vid 10.10.2013, Ukrayina. MPK F41G 5/00. Stabilizator tankovoyi garmati. Aleksandrova T.E., Lazarenko A.O. NTU "HPU". Zayavka # 201300690 vid 21.01.13. Byul. #19.
3. Aleksandrova T.E., Lazarenko A.A. Parametricheskii sintez invariantnogo stabilizatora tankovoy pushki. Integrovani tehnologii ta energozberezheniya. – 2013. – #2. – P. 11–46.
4. Aleksandrova T.E., Istomin A.E., Kostyanik I.V. Parametricheskii sintez optimalnogo stabilizatora tankovoy pushki. Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2012. – #2. – P. 203–210.
5. Aleksandrov E.E., Aleksandrova T.E. Vyibor optimiziruemogo funktsionala v zadachah parametricheskogo sinteza sistem stabilizatsii. Artilleriyskoe i strelkovoє vooruzhenie. – 2004. – #2(11). – P. 23–26.
6. Aleksandrova T.E. O edinstvennosti resheniya zadachi parametricheskogo sinteza lineynoy dinamicheskoy sistemy s integralnym kvadrachnym kriteriem optimalnosti. Sistemi obrabki informatsiyi: zbirnik naukovih prats. – Н.: Harkivskiy universitet Povitryanih Sil. – 2013. – Vip. 7(114). – P. 116–120.

УДК 519.81:681.51

Борисюк М.Д., Александров Є.Є., Александрова Т.Є.

ДО ЗАДАЧІ ПОБУДОВИ ІНВАРІАНТНОГО СТАБІЛІЗАТОРА КАНАЛУ ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВЕДЕННЯ ОСНОВНОГО ОЗБРОЄННЯ ТАНКА

В роботі розглядається задача вибору значень варійованих параметрів алгоритму стабілізації, що формується електронним блоком інваріантного стабілізатора каналу вертикального наведення танкової гармати, і пропонується відшукувати їх з умови досягнення необхідного ступеня інваріантності замкнутої системи стабілізації до дії зовнішніх збурень. Доведено, що алгоритм стабілізації, реалізований інваріантною системою наведення і стабілізації танкової гармати в каналі вертикального наведення, доцільно вибрати без урахування зворотного зв'язку по похідною різниці тиску робочої рідини.

Borysyuk M.D., Alexandrov Ye.Ye., Alexandrova T.Ye.

TO THE PROBLEM OF CONSTRUCTING AN INVARIANT STABILIZER OF THE CHANNEL VERTICAL GUIDANCE OF THE TANK'S MAIN ARMAMENT

The problem of choosing the values of variable parameters stabilization algorithm generated electronic unit invariant stabilizer channel vertical guidance tank gun and offers retrieve them from the condition of the desired degree of invariance of a closed system to stabilize the action of external perturbations is considered. We prove that the stabilization algorithm implemented invariant system guidance and stabilization tank gun in the channel vertical guidance, it is advisable to choose without feedback from the derivative of the difference of pressure of the working fluid.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ В ПЛАСТИНЧАТЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЯХ САХАРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Вступление. Образование отложений или твердого депозита при работе оборудования сахарной промышленности более детально изучалось для выпарных аппаратов. В настоящее время произошла замена кожухотрубчатых подогревателей продуктов на пластинчатые подогреватели. Поведение аппаратов такого класса в условиях образования загрязнений изучено не достаточно. Поэтому задача анализа процессов образования отложений в пластинчатых подогревателях сахарной промышленности и их математическое моделирование является актуальной и имеет практическую ценность.

Осаждение твердых отложений в подогревателях сахарной промышленности относят к процессам образования и роста кристаллов в перенасыщенных растворах солей, которые происходят в пристенном слое гофрированных пластин. Кристаллизация на теплопередающей поверхности пластин происходит при значительных перенасыщениях растворов и зависит от таких факторов рабочего процесса, как скорость, температура, концентрация загрязняющих веществ.

Состояние проблемы и формулировка задачи. Формирование слоя отложений в пластинчатых подогревателях происходит в условиях интенсивного гидродинамического воздействия потока. Основная часть отложений образуется в начальный период (после некоторого времени работы оборудования). Как правило, слой загрязнений достаточно рыхлый и неплотный. Далее происходит изменение структуры свойств и увеличивается механическая прочность отложений. Считается, что если прочность слоя отложений превышает касательное напряжение сдвига на стенке, то скорость роста отложений определяется скоростью кристаллизации и будет иметь место рост слоя отложений. В противоположном случае происходит размыв отложений, и их толщина уменьшается.

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. 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 [9–12].

Цель работы. Целью настоящей работы является анализ и математическая обработка результатов натуральных 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. При модернизации сахарного завода в г.Валуйки сотрудниками научно-производственной компании «Теплокомплект» был запроектирован пластинчатый теплообменный аппарат для первой ступени подогрева очищенного сахарного сока конденсатом из первого корпуса выпарной станции. Исходные данные для расчета принимались следующими. По стороне сахарного сока: расход – 350 м³/ч; входная температура – 88 °С; выходная температура – 93,3 °С; потери давления не более 50 кПа. По стороне греющего конденсата: расход – 87,4 м³/ч; входная температура – 112 °С; выходная

температура – 92 °С; потери давления не более 50 кПа. Запас по поверхности принимался равным 30 %. В результате проектирования к установке был принят пластинчатый теплообменный аппарат марки M15M производства «Альфа Лаваль» с двумя входами-выходами по стороне сахарного сока и пакетом из 150 пластин.

Для этого теплообменника во время эксплуатации были проведены измерения технологических параметров его работы в течение 13 дней с момента пуска выпарной станции. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты измерений технологических параметров работы теплообменника

Параметры	Время, ч				
	96	144	216	264	312
Расход сока, м ³ /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 ³ /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

Первое измерение было проведено после пусковых работ, которые заняли продолжительный период и сопровождались остановками в работе аппарата. Было принято, что устойчивый режим функционирования теплообменника наступил примерно по достижению 96 ч эксплуатации. Расчетным путем сравнения данных работы реально работающего аппарата и его чистого аналога были получены значения величины фактора загрязнения R_f , представленные в табл. 2. Значение фактора загрязнения R_f рассчитывались на основе экспериментального значения коэффициента теплопередачи с учетом отложений K_f и расчетного коэффициента теплопередачи для чистого теплообменника K , используя соотношение

$$R_f = \frac{1}{\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K}}$$

где K – значение чистого коэффициента теплопередачи.

Таблица 2 – Результаты расчета фактора загрязнения и коэффициента теплопередачи теплообменника

Время τ , ч	Фактор загрязнения $R_f \cdot 10^4$, м ² /(К·Вт)	Коэффициент теплопередачи K (чистый), Вт/(м ² ·К)	Коэффициент теплопередачи K_f (fouling), Вт/(м ² ·К)	$K_f/K \cdot 100\%$
96	0,27	2673	2493	93,3
144	1,10	2220	1784	80,4
216	1,55	2668	1887	70,7
264	1,67	2686	1853	69,0
312	1,9	2382	1640	68,8

Изменение фактора загрязнения и относительного коэффициента теплопередачи ($K/K_f \cdot 100\%$) во времени с учетом прогнозирования на весь период работы вплоть до остановки на чистку (примерно 960 ч) показано на рис. 1.

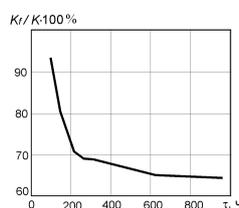


Рисунок 1 – Экспериментальное (<324 ч) и прогнозируемое изменение во времени относительного коэффициента теплопередачи

Анализ полученных результатов показывает, что изменение фактора загрязнения и, как следствие, коэффициента теплопередачи во времени носит асимптотический характер. Прогнозируемое уменьшение коэффициента теплопередачи ожидается не более 60 % от исходного чистого коэффициента теплопередачи.

Теоретические положения. Для теоретического описания закономерностей изменения фактора загрязнения и коэффициента теплопередачи и построение математической модели предлагается использовать методику учета динамики развития отложений, предложенную в работах [13,14]. Согласно положениям этих работ большинство моделей, описывающих механизм образования отложений, основан на предсказании уровня образования отложений как разницы между интенсивностью осаждения отложений φ_d и интенсивностью удаления отложений φ_r :

$$\frac{d\delta}{dt} = \varphi_d - \varphi_r, \quad (1)$$

где δ – толщина отложений, мм; t – время, с.

Было принято допущение о том, что φ_r пропорционально касательному напряжению на стенке, возведенному в степени m и толщине отложений δ

$$\varphi_r = b \cdot \tau_w^m \cdot \delta, \quad (2)$$

где b – коэффициент пропорциональности, [1/(Па·с)].

Тогда изменение фактора загрязнения во времени можно записать в виде

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{\varphi_d}{\lambda_f} - b \cdot \tau_w \cdot R_f, \quad (3)$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности загрязнений.

Интегрирование дифференциального уравнения (3) дает решение

$$R_f(t) = \frac{\varphi_d}{b \cdot \tau_w \cdot \lambda_f} \cdot [1 - \exp(-b \cdot \tau_w \cdot t)]. \quad (4)$$

Для определения касательного напряжения на стенке гофрированного поля межпластинных каналов используется выражение

$$\tau_w = \zeta_s \cdot \psi \cdot \rho \cdot w^2 / 8, \quad (5)$$

где ζ_s – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления единицы относительной длины канала (учитывающий потери от трения на стенке и от гидродинамического сопротивления формы); ρ – плотность, кг/м³; w – скорость в канале, м/с. Для каналов сетчато-поточного типа пластинчатых теплообменников этот коэффициент определялся согласно формуле

$$A = 380 / [tg(\beta)]^{1.75}; \text{ для } Re > A \quad \psi = \left(\frac{Re}{A} \right)^{-0.15 \cdot \sin(\beta)}; \text{ для } Re \leq A \quad \psi = 1, \quad (6)$$

где β – угол наклона гофр к продольной оси пластины; Re – число Рейнольдса.

Для вычисления величины образования отложений φ_d было использовано выражение

$$\varphi_d = \frac{A_m \cdot C_f \cdot u \cdot T_s^{2/3} \cdot \rho^{2/3} \cdot \mu^{-4/3}}{1 - B_m \cdot u^3 \cdot C_f^2 \cdot \rho^{-1/3} \cdot \mu^{-1/3} \cdot T_s^{2/3} \cdot \exp(E / (R \cdot T_s))}, \quad (7)$$

где T_s – температура поверхности, К; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; $R=8,314$ Дж/(Моль·К) – универсальная газовая постоянная; C_f – коэффициент трения Фаннинга; u – средняя скорость потока, м/с.

Результаты и обсуждения. Используя соотношения (5)–(7) было рассчитаны значения фактора загрязнения для исходных данных, представленных в табл. 1 для очищенного сахарного сока. Значения расчетных параметров, которые дают наилучшее согласование с экспериментальными данными принимались следующие:

$$E=52100 \text{ Дж/Моль}; A_m=1,9 \cdot 10^{-11} \text{ кг}^{2/3} \text{ К}^{1/3} \text{ м}^{5/3} (\text{КВТ})^{-1} \text{ с}^{-1/3} \text{ ч}^{-1}; B_m=1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{13/3} \text{ кг}^{-2/3} \text{ с}^{8/3} \text{ К}^{-2/3}; b = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/(Па·с)}.$$

Заключення. Предложенная методика позволяет достаточно точно прогнозировать качественно и количественно величину фактора загрязнения и ее изменение во времени. Предложенный подход может быть использован при проектировании пластинчатых подогревателей очищенного сахарного сока перед выпариванием. Приведенные оценки позволяют заранее на стадии проектирования определить падение величины коэффициента теплопередачи и спрогнозировать примерное время остановки аппарата на чистку. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с распространением использованной методики для расчета пластинчатых теплообменников на других позициях сахарного производства и в различных отраслях промышленности.

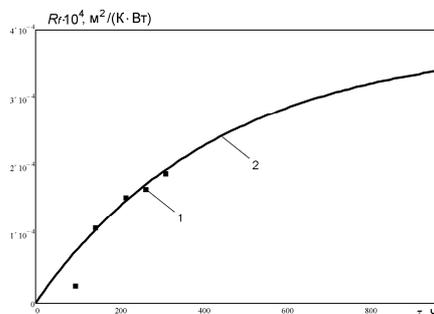


Рисунок 2 – Экспериментальное (<324 ч) и прогнозированное изменение расчетных величин во времени фактора загрязнения: 1 – по данным измерений из рис. 1; 2 – расчетное по формуле (4)

Підтримка

Автор благодарит за финансовую поддержку ЕС FP7 проект “Distributed Knowledge-Based Energy Saving Networks” – DISKNET, Grant Agreement No: PIRSES-GA-2011-294933 and ЕС проект “Efficient Energy Integrated Solutions for Manufacturing Industries” – EFENIS, Grant Agreement No. ENER/FP7/296003/EFENIS.

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 / Арсеньева О.П., Бабак Т.Г., Демирский А.В., Хавин Г.Л. // 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. Практическая реконструкция системы подогревателей сахарного сока перед выпариванием / Товажнянский Л.Л., Арсеньева О.П., Демирский А.В., Хавин Г.Л. // Інтегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2012, №2.– С. 99–102.
10. 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.
11. 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.
12. Анализ работы систем подогревателей сахарного сока с учетом загрязнений теплообменной поверхности / Демирский А.В., Товажнянский Л.Л., Арсеньева О.П., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. // Інте-

гровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013, №.2.– С. 14–17.

13. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers // O. Arsenyeva, B. Crittenden, M. Yang, P. Kapustenko // Applied Thermal Engineering. 2013. – 61. – P. 53–59.

14. Mitigation of Fouling in Plate Heat Exchangers for Process Industries / O. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko // Chemical Engineering Transaction, 2012. – 29. – P. 1441–1446.

Bibliography (transliterated)

1. Platinchatyie teploobmenniki v promyishlennosti. L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, G.L. Havin, O.P. Arseneva. – Harkov: NTU «HPI», 2004.– 232 p.

2. Modernizatsiya sistemyi posledovatelno ustanovlennykh podogrevateley sahnogo soka. Arseneva O.P., Babak T.G., Demirskiy A.V., Havin G.L. Naukovi pratsi ONAHT.– Odesa: 2011, Vip.39.– Tom.2.– P. 151–155.

3. Arseneva O.P., Demirskiy A.V., Havin 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 sahnoy 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. Voprosy nakipeobrazovaniya.– K.: Vischa shkola, 1987.– 179 p.

8. Issledovanie vliyaniya skorosti dvizheniya soka na koeffitsient nakipeobrazovaniya v podogrevatelyah sahnogo promyishlennosti. Tobilevich N.Yu., Sagan I.I., Garyazha V.T., Knyazev A.A. Pischevaya promyishlennost.– Kiev, 1965. – P. 132–135.

9. Prakticheskaya rekonstruktsiya sistemyi podogrevateley sahnogo soka pered vyiparivaniem. Tovazhnyansky L.L., Arseneva O.P., Demirskiy A.V., Havin G.L. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal. – Harkiv: NTU "HPI". – 2012, #2.– P. 99–102.

10. Analiz raboty platinchatogo podogrevatelya sahnogo soka s uchetom otlozheniy. Arseneva O.P., Babak T.G., Kapustenko P.A., Havin G.L. Naukovi pratsi ONAHT.– Odesa: 2012, Vip.41.– Tom. 2.– P. 173–177.

11. Tovazhnyansky L.L., Demirskiy A.V., Havin G.L. K opredeleniyu velichiny zagryazneniya teploperedayuschey poverhnosti platinchatykh teploobmennikov. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal. – Harkiv: NTU "HPI". – 2012, #4. – P. 99–104.

12. Analiz raboty sistem podogrevateley sahnogo soka s uchetom zagryazneniy teploobmennoy po-verhnosti. Demirskiy A.V., Tovazhnyansky L.L., Arseneva O.P., Kapustenko P.A., Havin G.L. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal.– Harkiv: NTU "HPI".– 2013, #.2.– P. 14–17.

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

14. Mitigation of Fouling in Plate Heat Exchangers for Process Industries. O. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko. Chemical Engineering Transaction, 2012. – 29. – P. 1441–1446.

УДК 66.045.01

Демірський О.В.

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ВІДКЛАДЕНЬ У ПЛАСТИНЧАТИХ ПІДГРІВНИКАХ ЦУКРОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Розглянуто питання прогнозування роботи пластинчатого теплообмінного апарату на позиції підігріву чистого сульфатованого цукрового соку перед випаровуванням. На основі безпосередніх натурних вимірювань та їх математичної обробки запропоновано математичну модель прогнозування зміни фактора забруднення у часі як функції дотичного напруження на стінці пластини і товщини забруднення. Одержані експериментальні та розрахункові результати показали наявне добре погодження.

Demirskyy A.

THE ANALYSIS OF DEPOSITS CREATION IN PLATE HEATERS OF SUGAR INDUSTRY

The problem of prediction of plate heat exchanger unit operation for the preheating of purified sulfated sugar juice before the evaporation is considered. Based on the experimental measurements and their mathematical treatment, a mathematical model for the fouling factor prediction during the time as a function of wall shear stress and plate thickness is proposed. The experimental and calculated results showed good agreement.

Бурдо О.Г., Бандура В.Н., Ружицкая Н.В.

ПРИНЦИПЫ АДРЕСНОГО ПОДВОДА ЭНЕРГИИ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ

Введение. Одним из серьезных достижений классических НТ является организация адресной доставки отдельных компонентов в нужную точку пространства с помощью специальных наноконтейнеров. В [1] сформулирована гипотеза о возможности аналогичной доставки энергии к отдельным элементам пищевого сырья. Такие подходы предлагается классифицировать как наноэнерготехнологии, которые входят в более широкое направление – СЭД-технологии. Причем, технологические аппараты, реализующие такие технологии, не требуют сложных манипуляторов, необходимо обеспечить соответствующие градиенты физических и электрофизических полей для самоорганизации пищевой системы, инициирования процессов переноса в нужном направлении.

СЭД – технологии – это технологии направленного, селективного действия на элементы пищевого сырья и биологические объекты [1]. СЭД-нанотехнологии отличаются тем, что направление энергетического действия – наномасштабные объекты, микро- и наномасштабные структуры. И в первом, и во втором случаях задачей селективного энергетического воздействия является управление полями, сложение направлений силовых воздействий слабых полей, организация потока из микро- и нанокпиллярной структуры, формирование состава этих потоков, направление силовых воздействий на оболочки клеточной структуры микробиологических объектов и т.п. Для пищевых систем снижение количества потребленной энергии не только повысит энергетический КПД процесса и снизит себестоимость продукта, но и уменьшит уровень термического воздействия на продукт. Это приведет к сохранению биологически активных компонентов пищевого сырья. Пищевые продукты и кулинарные изделия, полученные по НТ, станут отвечать требованиям функционального питания [2].

Научные направления развития пищевых нанотехнологий. Поскольку пищевые системы это сложнейшие биологические комплексы, то нанотехнологический подход должен основываться на междисциплинарной основе, комплексном анализе химических, физических и биотехнологических явлений. Будущее пищевых технологий – это глубокое согласование фундаментальных основ физики, химии и биотехнологии. А такой подход отвечает определению НТ. Считается, что нанотехнологии – это совокупность приемов и методов, применяемых при изучении, проектировании, производстве и использовании наноструктур, устройств и систем, включающих целенаправленный контроль и модификацию формы, размера, взаимодействия и интеграции составляющих их наномасштабных элементов (до 100 нм), для получения объектов с новыми химическими, физическими, биологическими свойствами [3]. При этом развитие пищевых НТ должно проводиться с глубокой оценкой рисков и потенциальных опасностей для общества.

Определено три направления нанотехнологий в пищевых производствах [3]. Первое направление (упаковка, мониторинг, маркировка) достаточно часто обсуждается в печати. По второму (ингредиенты продуктов питания или добавки к ним) и третьему (инженерия продуктов питания, производство молекулярной пищи) направлениям сведения ограничиваются, в основном, процессами измельчения сырья и продукта до наноразмерных частиц. Вместе с тем, именно пищевые нанотехнологии имеют серьезную специфику, которая может предопределить их бурное развитие.

Специфика пищевых НТ определяется как задачами процессов переработки пищевого сырья, так и особенностями самого сырья. Пищевые НТ могут развиваться по двум направлениям. Первое – это манипулирование с наномасштабными элементами для «сборки» искусственных продуктов (молока, мяса и пр.). Такие технологии основаны на механизме «снизу–вверх». Это достаточно сложное и спорное направление. К первому направлению можно отнести и модификации отдельных комплексов и придание им новых свойств. Второе – это управление процессами переноса на уровне наномасштабных объектов пищевого сырья, совершенствование традиционных процессов производства, продуктов и их применений с помощью полного использования квантовых свойств и поверхностных явлений на наномасштабе. Это новое и перспективное научное направление.

Парадигма пищевых наноэнерготехнологий (ПНЭТ). Предметом исследований в ПНЭТ являются уже созданные природой наноразмерные структуры. Это – микроорганизмы (размер от 7 нм), нанопоры

и нанокапилляры растительного сырья (от 5 нм), оболочки клеток (7...30 нм), белок (10...100 нм), полисахариды (1...10 нм) и молекулы воды ($\approx 0,15$ нм). Именно на эти объекты нацелены основные этапы пищевых технологий. Поэтому процессы биотехнологий, стерилизации, экстрагирования, сушки, сокоотдачи и пр. можно организовывать на наномасштабном уровне. Принципы, которые могут быть реализованы при переводе пищевых производств на нанотехнологии, позволят существенно снизить энергоемкость, уровень термического воздействия на сырье и продукт, получить принципиально новые продукты. Задача исследователя ПНТ заключается не в синтезе новых наномасштабных структур, а организация условий, при которых необходимые процессы переноса на границе раздела фаз пищевой системы и наноразмерного объекта будут реализовываться с предельной эффективностью. Схема исследований в таких условиях следующая: «выдвижение ряда гипотез – разработка методов их проверки – постановка серии экспериментов – подтверждение правильной гипотезы». Вместе с тем, основы аналитической модели переноса в условиях микроволнового поля сформулированы [1, 2].

Тепломеханические модели клеточной структуры. Задачей технологий при переработке сырья растительного происхождения является активирование сырья – разрушение структуры клеток с целью извлечения и дальнейшей переработки ценных компонентов. Основными процессами технологии являются: деструкция, экстракция и сушка. Реакция оболочки клетки рассмотрена при последовательном подводе к ней энергии, выдержке и резкого сброса давления на третьем этапе. В основе анализа непрерывно – гетерогенная модель системы. На первом этапе изменение объема клетки V_k , температуры T_k , давления P_k и концентрации в ней растворимых компонентов C_k , представляются комбинированным воздействием эффектов массопереноса, инфильтрации и теплопередачи. Тепловой поток, передаваемый клетке, расходуется на нагрев "сухой" части, нагрев и частичное испарение жидкости. На третьем этапе происходит резкий сброс давления, что приводит к интенсивному выходу содержимого через поры клеточной оболочки, следствием чего является интенсификация процесса последующего экстрагирования. Степень разрыва клеточных оболочек во всей реакционной массе определяет степень активации. При определенных условиях возможно увеличение диаметра пор в клеточных стенках, а также частичный либо полный разрыв оболочки. В этом случае задачу можно представить в виде известной модели напряженного состояния сферической оболочки со сквозными отверстиями [2].

Механизм бародиффузионных процессов переноса. Содержимое клеток является главной целью технологии. Однако модель должна отражать кинетику переноса и на границе клетки и среды, внутри поры, капилляра. Понимание таких закономерностей является основанием для интенсификация процессов, реализации принципиально новых технологий пищевых производств. Особенно интересный результат можно ожидать при резком изменении параметров в объеме, при импульсном вводе энергии, при комбинированном протекании процессов. Опыт, полученный в ОНАПТ, показывает, что при волновом подводе энергии иницируются бародиффузионные потоки из наномасштабных каналов сырья, а интенсивность процессов переноса возрастает на 2...3 порядка [3,4]. Такие комбинированные подходы можно характеризовать как волновые бародиффузионные технологии (ВБДТ).

Исходя из термодинамической схемы нанопроцесса и тепломеханической модели клеточной структуры механизм комбинированного нано- и макропереноса влаги (и других компонентов) из волокнистой структуры в поток подробно рассмотрен в работах [3,4].

Механодиффузионный эффект массопереноса. В результате исследований в ОНАПТ накоплены факты, объяснять которые можно только с позиций нанонаук (изменения и трансформации структуры вкусовых и ароматических комплексов продукта, стерилизация микроорганизмов при пониженных температурах и т.п.). Причина этих фактов общая – действие электромагнитного поля [2–5, 12–15]. Ряд выявленных несоответствий с принятыми положениями заключаются в том, что при экстрагировании в системе «древесина – водно-спиртовые растворы» в экстракт перешло практически в 2 раза больше древесины, чем в справочной литературе, для системы «зерна кофе – вода» – на 10 % больше. При экстрагировании зерен амаранта спиртом в полученном масле амаранта обнаружили до 4 % сквалена, хотя известно, что спирт практически не растворяет сквален. Во всех образцах отмечено повышенное содержание ароматических компонентов. Вывод можно сделать однозначный: в раствор переходит большее количество компонентов, чем может быть растворено экстрагентом.

Объясняются эти факты тем, что в условиях электромагнитного поля можно организовать специфичный поток, который содержит хорошо растворимые компоненты твердой фазы (диффузионный поток), и

практически не растворимые компоненты твердой фазы, связи которой с ней слабые. Это могут быть силы ван-дер-ваальсовы, слабые химические, механические и пр. Механизм процесса поясняется схемой (рис. 1) и электродиффузионной моделью (рис. 2).

Представляется, что в общем, мы имеем дело с новым явлением, новым эффектом, название которому можно дать «механодиффузионный эффект при безградиентном волновом подводе энергии к полярным молекулам электромагнитным полем». В результате генерации паровых пузырьков (2) в глубине микрокапилляра (1) повышается давление, возникает гидравлический поток, который увлекает с собой экстракт из пограничного слоя (5), нерастворимые (3) и слаборастворимые (4) компоненты (рис. 1).

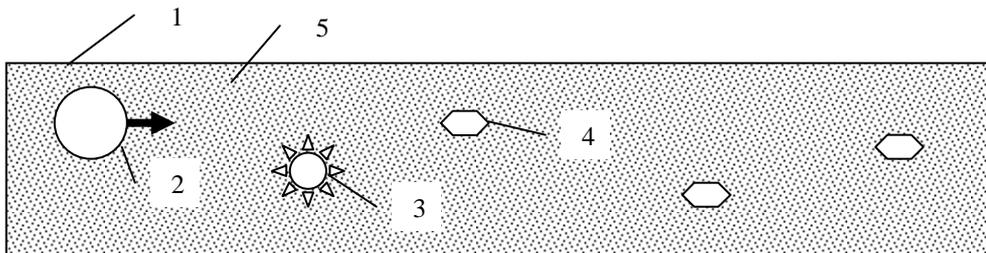


Рисунок 1 – Физическая схема взаимодействия компонентов и потока

1 – стенка капилляра, 2 – паровой пузырь, 3 – нерастворимые в жидкости компоненты, 4 – слаборастворимые компоненты, 5 – диффузионный пограничный слой

Таким образом, из капилляра (1) выходит диффузионный поток экстракта, который дополняется потоком целого комплекса компонентов не характерных вообще для диффузионных процессов, либо для экстрагирования конкретным экстрагентом.

Структура потока из капилляра (1) поясняется эквивалентной электрической схемой (рис. 2), где $Y_{(t)}$ и $Y_{Г}$ – соответственно, текущее в твердой фазе и граничные значения концентрации растворимых компонентов; X_{Σ} – суммарное значение всех перенесенных в экстракт компонентов; $C_{С}$ и $C_{Н}$ – соответственно, концентрации в твердой фазе слаборастворимых и нерастворимых в экстрагенте компонентов; $X_{С}$ и $X_{Н}$ – то же, но в экстракте.

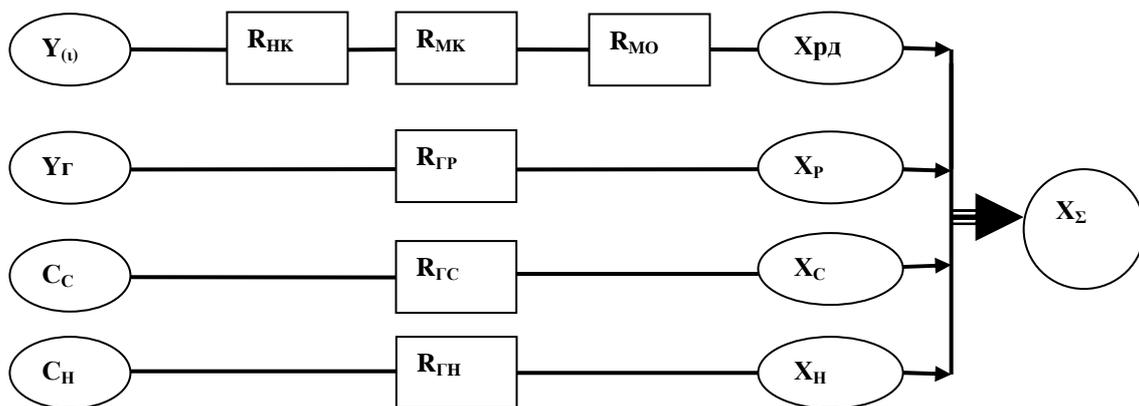


Рисунок 2 – Эквивалентная электродиффузионная схема сопряженных процессов переноса гидро- диффузионными потоками в системе «твердая фаза – жидкость – электромагнитное поле»

Последовательная цепочка диффузионных сопротивлений состоит из суммы: $\Sigma R = R_{НК} + R_{МК} + R_{МО}$. Процесс конвективной массоотдачи от поверхности продукта в поток имеет наименьшее диффузионное сопротивление ($R_{МО}$). Влага перемещается в микрокапиллярах к поверхности продукта, преодолевая диффузионное сопротивление ($R_{МК}$). Это конвективная диффузия в стесненных условиях (поток j_1).

Диффузионное сопротивление нанокапилляров обозначено ($R_{НК}$). Это наибольшее диффузионное сопротивление, поскольку, стесненность диффузионных процессов в нанокапиллярах максимальна.

При воздействии импульсного электромагнитного поля инициируется поток жидкости из капилляров (j_2). Ранее [3, 4] этот процесс представлялся как бародиффузия. Однако это не классическая бародиффузия определенная А.В. Лыковым [6, 7]. Процесс возникает из-за растущего в капиллярах давления P_K (рис. 1). Отдельные капилляры, где достигнуты условия для генерации паровой фазы, начинают периодически выбрасывать в поток жидкость из капилляров. Жидкость из нанокапилляров выбрасывается в микрокапилляры и далее в среду преодолевая сопротивление ($R_{ГР}$). По сути, это гидравлическое сопротивление. Частота таких выбросов и число функционирующих капилляров растет с ростом N - мощности излучения.

Параллельно с потоками (j_1) и (j_2) происходит перемещение слаборастворимых (поток j_3) и нерастворимых (поток j_4) компонентов. Этот поток характеризуется механическими параметрами движущей силы, разностью давлений в капилляре и среды. Последняя может возникать в результате избирательного поглощения энергии электромагнитного источника полярными молекулами, перехода в паровую фазу наиболее летучего компонента, повышения давления в глубине капилляра. В результате появляется мощная движущая сила, гидравлический потенциал для потока из капилляра. Это сугубо механический поток, мощность которого определяется как самой разностью давлений, так и динамикой изменения давлений. Такой поток можно инициировать, им можно управлять параметрами электромагнитного поля.

Механизмы процессов переноса и соответствующие модели сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Механизмы переноса компонентов из капиллярной межклеточной структуры

Характеристика потока	Движущая сила	Сопротивление потоку	Масса перемещенного компонента	Модель процесса
Конвективный диффузионный массоперенос	Разность концентраций $Y - X_{PD}$	Диффузионное сопротивление, R_D	M_{P1} (поток j_1)	$\frac{dM_{P1}}{Fd\tau} = \frac{Y - X_{PD}}{R_D}$
Механический перенос растворимых веществ из пограничного слоя	Разность давлений $P_K - P_0$	Гидравлическое сопротивление, $R_{ГР}$	M_{P2} (поток j_1)	$\frac{dM_{P2}}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{ГР}}$
Механический перенос слаборастворимых веществ из капилляров	Разность давлений $P_K - P_0$	Сопротивление, $R_{ГС}$	M_C (поток j_3)	$\frac{dM_C}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{ГС}}$
Механический перенос нерастворимых веществ из капилляров	Разность давлений $P_K - P_0$	Сопротивление, $R_{ГН}$	M_H (поток j_4)	$\frac{dM_H}{\rho S d\tau} = \frac{P_K - P_0}{R_{ГН}}$

Суммарный поток всех компонентов в интегральной форме определится:

$$\Sigma M_I = (M_{P1} + M_{P2} + M_C + M_H)F^{-1} = \frac{Y - X_{PD}}{R_D} + \rho \left[\frac{P_K - P_0}{R_{ГР}} + \frac{P_K - P_0}{R_{ГС}} + \frac{P_K - P_0}{R_{ГН}} \right]. \quad (1)$$

Согласование текущей концентрации растворимых веществ в твердой фазе (Y) и в экстракте (X_{PD}) проводится по углу наклона рабочей линии процесса (в технологии связан с гидромодулем).

По схеме (рис.1) процесс переноса осложнен вихревой диффузией из каналов твердой фазы, импульсным характером поля (ИЭМ), которое определяет число и производительность центров точечного массопереноса [5]. Задачи такого плана решаются на основе экспериментального моделирования. Методом “анализа размерностей” определена структура уравнения в безразмерных переменных. Предложено число энергетического воздействия: $Bu = N (r w d^2 \rho)^{-1}$ для учета влияния действия ИЭМ. Физический смысл

числа Bu заключається в том, що устанавлюється соотношение между энергией излучения и той энергией, которая необходима для преобразования в пар всей воды, которая находится в продукте. В соотношении (r – теплота фазового перехода, а ρ – плотность воды).

Чем ближе число Bu к 1, тем больше образовывается паровой фазы, тем больше градиент давлений, тем интенсивнее выбросы влажного насыщенного пара из глубины капилляров. Растет турбулизация пограничного слоя, но увеличиваются нагрев твердой фазы и расход энергии. Число Bu характеризует микро- и нанокинетику массопереноса бародиффузией [5, 6]. Интенсивность бародиффузии определяется давлением, возрастающим в капилляре. Частота выбросов и количество функционирующих капилляров увеличивается пропорционально электрофизическому воздействию.

Именно этот эффект объяснил многие парадоксы, которые авторы наблюдали при экспериментальном моделировании.

Комбинированные процессы нано – и макрокинетики при экстрагировании. Эти процессы в современных пищевых технологиях производства сахара, масел, растворимого кофе, коньячных спиртов является ключевым, определяющими как качество, так и экономические показатели предприятия. Однако, как правило, это достаточно трудоемкий и низкоэффективный процесс. Например, в коньячных технологиях процесс экстрагирования продолжается годами. Использование ПНТ позволит существенно интенсифицировать процесс экстрагирования за счет эффекта комбинированного электрофизического воздействия (ИЭМП). Установлена зависимость в процессах экстрагирования числа Шервуда (Sh) от чисел Рейнольдса (Re), Шмидта (Sc) и числа (Bu) при $Re < 2300$:

$$Sh = 36,58 (Re)^{0,33} (Sc)^{0,33} (Bu)^{1,54}. \quad (2)$$

Анализ результатов опытов показал, что удельные затраты энергии связаны с диапазоном изменения температур, особенно в режиме продувки (фильтрационной сушки) продукта. И, действительно, такая корреляция обнаружена, что позволяет сделать вывод, что достигнутый в опытах уровень энергетических затрат ниже удельной теплоты фазового перехода для воды. Установлены режимы, в которых на 1 кг удаленной влаги затрачивалось только 1,9 МДж энергии. Так подтверждена гипотеза о возможности в условиях ИЭМ обезвоживания без обязательного полного парообразования [6].

Достигнутый прикладной результат. На сегодняшнее время имеются факты, объяснять которые можно только с позиций нанонаук [4–7]. К таким фактам, полученным на кафедре процессов и аппаратов ОНАПТ, относятся: изменения и трансформации структуры вкусовых и ароматических комплексов продукта, стерилизация микроорганизмов при пониженных температурах и т.п. Причина этих фактов общая – действие электромагнитного поля. Информация о результатах исследований и перспективы их развития приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Направления нанотехнологических проектов в АПК

№	проект	параметр	Традиционный подход	Результат ВБДТ	
				Достигнутый	Ожидаемый
1	Низкотемпературный наностерилизатор	Энергоемкость, МДж/кг продукта Температура, °С КПД, %	0,2 80...100 0,004	0,02 30 0,04	$2 \cdot 10^{-5}$ 10...20 20...40
2	экстрактор	Степень интенсификации массопереноса, раз	1	100	10000
3	зерносушилка	Энергоемкость, МДж/кг влаги	4...6	1,9	0,1...0,2

Исследовались перспективность ВБДТ для производств растворимого кофе и коньяков. Современные технологии экстрагирования из зерен кофе характеризуются противоречиями. С одной стороны, стоит задача максимального извлечения ценных компонентов из зерен. Эффективным приемом решения такой задачи является повышение температуры процесса, т.е. повышение давления в аппарате и ступенчатым экстрагированием. С другой стороны, из-за высоких давлений в аппарате затруднено применение про-

точных схем и, даже, мешалок. В результате – современная технология экстрагирования из зерен кофе характеризуется громоздкостью, трудоемкостью, энергоемкостью [5]. Резервы у традиционных подходов при экстрагировании из зерен кофе практически исчерпаны.

Создан образец экстрактора на основе ВБДТ. Комбинированное электрофизическое воздействие в процессе экстрагирования позволяет интенсифицировать процесс массопереноса в несколько раз. Реализует интенсивные и мягкие режимы экстрагирования [5]. Степень извлечения компонентов из зерен повышается на 15 %. Обеспечивается атмосферное давление в аппарате, температура процесса не выше 100 °С. Энергетические затраты снижаются на 50 %. Опытные образцы растворимого жидкого 60 % концентрата кофе «ЖИКО» имеют высокие вкусовые характеристики [5].

В условиях коньячного производства прошли испытания экстрактора с электромагнитным интенсификатором. В различных режимах эксплуатации интенсивность массопереноса возрастала в десятки и тысячи раз. Результаты испытаний подтвердили предложенный механизм комбинированного процесса экстрагирования и перспективность технологии. Дегустаторы отметили положительные структурные изменения в продукте, в первую очередь ароматических компонентов. Появляется возможность на наномасштабном уровне строить букет коньячного спирта.

Представляется, что механизмы бародиффузии способны существенно интенсифицировать процессы активации сырья и инактивации микроорганизмов [7]. Использование нанотехнологических подходов позволило получить чистую воду с содержанием солей менее 4мг/кг [8], экологически чистый концентрат жидкого дыма [9].

Возможны и другие принципиальные решения при реализации ВБДТ в условиях микроволнового либо высокочастотного электромагнитного поля.

Изучением отдельных наномасштабных объектов (вирусов, клеток, белков и т.п.) в ОНАПТ занимаются уже десятилетия. Концепции самоорганизации, передачи и хранения биологической информации, молекулярного узнавания были сформулированы еще на этапах предыдущего развития наук. Но анализ этих проблем с использованием нанотехнологических подходов, расширение рамок проблемы до междисциплинарного уровня даст новый мощный импульс в исследованиях. Именно, благодаря серьезному фундаменту в понимании химических, микробиологических и биотехнологических явлений в пищевых системах, пищевые нанотехнологии имеют серьезные основания стать наиболее перспективной сферой современного этапа развития науки и технологий.

На основе изложенных подходов в ОНАПТ проведены исследования принципиально новых лабораторных образцов нанопастеризатора, экстрактора, пиролизера, сушилки. Предложенные гипотезы подтверждены практически, имеются факты, объяснять которые можно только с позиций нанонаук. К таким фактам относятся: изменения и трансформации структуры вкусовых и ароматических комплексов продукта, стерилизация микроорганизмов при пониженных температурах, и т.п.

Представляется, что, в качестве перспективных направлений фундаментальных нанотехнологических исследований в АПК, можно выделить следующие проекты. Во-первых, это проблемы формирования комплексов вкуса и аромата продукта, т.е. сборка с помощью НТ нужных и оригинальных комплексов. Это направление соответствует классическим подходам в НТ. Во-вторых, это исследование механизмов процессов клеточного переноса, предпосевная биостимуляция семян, интенсификация процессов переноса, увеличение выхода целевых компонентов, снижение энергоемкости. В-третьих, это разработка наносенсоров вкуса, состава, запаха, порчи. Нанометки и наносенсоры обеспечат объективный и оперативный технологический контроль, защиту интересов потребителя. В-четвертых, это бионанотехнологии, направленные на модификацию биообъектов, создание „лаборатории на чипе”, создание искусственных ферментов и антител.

Сформулированные гипотезы подтверждены многочисленными экспериментами. Применение волновых механодиффузионных технологий интенсифицировало процессы экстрагирования в коньячных технологиях в 10^3 – 10^4 раз, при производстве масел – в 10–20 раз, кофе – в 3–5 раза. Продолжительность процессов сушки сокращалась на порядок.

Литература

1. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях // Инженерно-физический журнал. Минск, т.78, № 1.–2005. – С. 88–93.
2. Бурдо О.Г. Пищевые наноэнерготехнологии.

3. Рынок нано: от нанотехнологий к нанопродуктам / Г.Л.Азоев [и др.]; под.ред. Г.Л. Азоева.– М.: БИНОМ, 2011. – 319 с.
4. Бурдо О.Г. Мікро- і нанотехнології – новий напрямок в АПК // Наукові праці ОНАХТ – Випуск 29. – Одеса: Одеська національна академія харчових технологій. –2006.– С. 3–9.
5. Бурдо О.Г., Ряшко Г.М. Экстрагирование в системе «кофе- вода».– Одесса, 2007.– 176 с.
6. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368 с.
7. Бурдо О.Г., Рыбина О.Б. Процессы инактивации микроорганизмов в микроволновом поле – Одесса: Полиграф, 2010 – 200 с.
8. Бурдо О.Г., Милинчук С.И., Мордынский В.П., Харенко Д.А. Техника блочного вымораживания – Одесса: Полиграф, 2011 – 294 с.
9. Бурдо О.Г., Рибіна О.Б., Сталиббовская А.С. Энергетическая эффективность пищевых нанотехнологий. / Интегровані технології та енергозбереження – Харьков: НТУ „ХПІ” 2006.– №2.
10. Бурдо О.Г. Нанотехнологии. Флагманские, перспективные и фундаментальные проекты в АПК // Наук. праці Од. націон. акад. харчових технологій. – Одеса: 2006. – Вип.28, Т2. – с. 242–251.

Bibliography (transliterated)

1. Burdo O.G. Nanomasshtabnyie efektyi v pischevyih tehnologiyah. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. Minsk, t.78, # 1.–2005. – P. 88–93.
2. Burdo O.G. Pischevyie nanoenergotehnologii.
3. Ryinok nano: ot nanotehnologiy k nanoproduktam. G.L.Azoev [i dr.]; pod.red. G.L. Azoeva.– М.: БИНОМ, 2011. – 319 p.
4. Burdo O.G. Мікро- і нанотехнології – новий напрямок в АПК. Naukovi pratsi ONAHT – Vipusk 29. – Odesa: Odeska natsionalna akademiya harchovih tehnologiy. –2006.– P. 3–9.
5. Burdo O.G., Ryashko G.M. Ekstragirovanie v sisteme «kofe–voda».– Odessa, 2007.– 176 p.
6. Burdo O.G. Evolyutsiya sushilnyih ustanovok – Odessa: Poligraf, 2010 – 368 p.
7. Burdo O.G., Ryibina O.B. Protsessyi inaktivatsii mikroorganizmov v mikrovolnovom pole – Odessa: Poligraf, 2010 – 200 p.
8. Burdo O.G., Milinchuk S.I., Mordynskiy V.P., Harenko D.A. Tehnika blochnogo vyimorazhivaniya – Odessa: Poligraf, 2011 – 294 p.
9. Burdo O.G., Ribina O.B., Stalimbovskaya A.S. Energeticheskaya effektivnost pischevyih nanotehnologiy. Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya – Harkov: NTU „HPI” 2006.– #2.
10. Burdo O.G. Nanotehnologii. Flagmanskіe, perspektivnyie i fundamentalne proektyi v APK. Nauk. pratsi Od. natsion. akad. harchovih tehnologiy. – Odesa: 2006. – Vip.28, T2. – p. 242–251.

УДК 664-022.532

Бурдо О.Г., Бандура В.Н., Ружицкая Н.В.

ПРИНЦИПИ АДРЕСНОГО ПІДВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

В роботі вперше вирішується завдання енергетичного аспекту нанотехнологій. Причому, енергетика є не тільки характеристикою, а й інструментом організації технології, засобом управління кінетикою процесів переносу в наномасштабних елементах харчових систем. Наведено класифікацію наноенерготехнологій. Обговорюються механізми і принципи математичного і експериментального моделювання. Наведено результати експериментальних досліджень процесів масопереносу з використанням наноенерготехнологій.

Burdo O.G., Bandura V.N., Ruzhytskaya N.V.

THE PRINCIPLES OF ADDRESS ENERGY SUPPLY IN FOOD RAW TREATMENT

The pioneer development on energy aspects of nanotechnologies is proposed. The classification of nanotechnologies is carried out. The methods of simulation and experimental. Investigations are discussed. The results of mass transfer investigations with use of Nanotechnologies are considered.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СОНЯЧНОГО АДСОРБЦІЙНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА НА ОСНОВІ КОМПОЗИТНОГО СОРБЕНТУ «СИЛКАГЕЛЬ/Na₂SO₄»

Широкомасштабне використання традиційних енергоресурсів призводить до значного забруднення повітряного, водного басейнів і біосфери в цілому. Крім цього нестабільність цінової політики на енергоносії стимулює розвиток альтернативної енергетики в Україні. Глобальна доступність і екологічність робить найбільш перспективним нетрадиційним поновлюваним джерелом енергії – сонячну енергію. Світовий досвід використання сонячної енергії свідчить про широкі можливості перетворення цього виду енергії як в теплову енергію, з подальшим її застосуванням для опалення, гарячого водопостачання та інших технологічних потреб, так і для кондиціонування повітря. Спроби створення сонячних адсорбційних холодильних машин беруть свій початок з кінця ХХ століття. Суттєвою перешкодою на їх шляху є висока температура регенерації та низька сорбційна ємність типових сорбентів [1]. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є створення композитних сорбентів [2], які поєднують у одній структурі високу сорбційну ємність, яка характерна для масивних солей, та добрі технологічні властивості стандартних адсорбентів.

Метою роботи є створення та дослідження адсорбційного холодильника на основі композитного сорбенту «силкагель/Na₂SO₄» з температурою регенерації до 70 °С та сорбційною ємністю на рівні 0,45 г/г.

Експериментальна частина

Сонячний адсорбційний холодильник (рис. 1) складається з адсорбера (1), на лицьовій стороні якого встановлено прозорий стільниковий полікарбонатний пластик (товщиною 8 мм) з інтегральним коефіцієнтом пропускання на рівні 0,88 (10) [3]. У нижній частині розташований сорбційний композитний матеріал (3) та вмонтовано гідравлічний контур (2) що сполучає адсорбер (1) з теплоакмулювальним баком (11). Холодильник також включає випарник (4), конденсатор (5) та холодильну камеру (6) з водяним акумулятором холоду (7). Випарник (4) та конденсатор (5) з'єднано між собою трубою (8) з краном (9). В якості сорбційного матеріалу використано композитний сорбент на основі системи «силкагель/Na₂SO₄», температура регенерації якого складає 60–70 °С що повністю покривається за рахунок енергії сонця. Умови синтезу та результати дослідження основних характеристик сорбенту наведено в [4].

Площа сонячного адсорбера-колектора складала 1 м². В адсорбер завантажено 3,5 кг сорбенту, у випарник – 4,5 літри дистильованої води, в теплоакмулювальний бак – 30 літрів звичайної води.

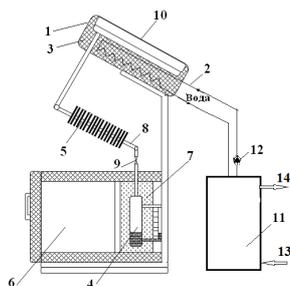


Рисунок 1 – Адсорбційний холодильник: 1 – адсорбер; 2 – змійовик; 3 – сорбційний матеріал; 4 – випарник; 5 – конденсатор; 6 – холодильна камера; 7 – водяний акумулятор холоду; 8 – труба; 9 – кран; 10 – прозорий стільниковий полікарбонатний пластик; 11 – теплоакмулювальний бак; 12 – насос; 13 – підведення холодної води; 14 – відведення нагрітої води до споживача

Адсорбційний холодильник працює згідно з термодинамічним циклом, який зображено на рис. 2. Тиск водяної пари при сорбції складає 9 мбар, при десорбції – 30 мбар. За цикл 1 г композитного сорбенту «силкагель/Na₂SO₄» обмінює 0,24 г води, що відповідає питомій енергії циклу 0,5 кДж/г.

Робота здійснюється в два етапи. Перший етап – отримання холоду (лінія 3-4-1 – адсорбція та випарування води). Відкривають кран (8). Пари води починають дифундувати через конденсатор до адсорбера. За рахунок сорбції води сорбційним матеріалом відбувається її випарування у випарнику (4), що створює холодильний ефект в холодильній камері (6). Оскільки в стінках холодильника міститься великий об'єм води холод в камері (6) підтримується на рівні 5–10 °С протягом 10–20 годин, до наступного циклу. При поглинанні води сорбційним матеріалом (3) температура в адсорбері (1) істотно підвищується-

ся за рахунок виділення теплоти сорбції. Для відбору цієї теплоти по змійовику (2) пускають холодну воду. При сприятливих погодних умовах нагріта вода догрівається в теплоакумулювальному баку (11) після чого подається споживачу в систему гарячого водопостачання або опалювання. Якщо погодні умови не сприятливі – використовується для регенерації сорбційного матеріалу на другому етапі роботи холодильника.

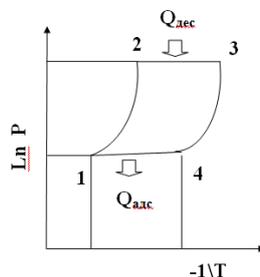


Рисунок 2 – Робочий цикл адсорбційного холодильника

Другий етап – регенерація адсорбенту (лінія 1-2-3 – десорбція та конденсація води). Закривають кран 4. Нагрівають сорбційний матеріал (3), використовуючи сонячну енергію або пропускаючи по змійовику (2) гарячу воду, нагріту на першому етапі. Це дозволило зменшити вплив погодних умов на час регенерації матеріалу. Вода збирається в конденсаторі (5) далі зливається у випарник (4) і починається процес отримання холоду.

Згідно з [5] середньодобова питома холодильна потужність прямо пропорційна різниці максимального нічного та мінімального денного вологовмісту ΔW

$$P = \frac{H \cdot \Delta W}{\tau}, \quad (1)$$

де $H = 2420$ кДж/кг – теплота випару води; $\tau = 8$ – час циклу роботи установки; $\Delta W = 44$ %.

Холодильний коефіцієнт сонячного адсорбційного холодильника розраховується за формулою [5]:

$$\eta = \frac{\Delta H \cdot \Delta W}{C \cdot (T_1 - T_2) + \Delta H_{дес} \cdot \Delta W}, \quad (2)$$

де $C = 1,4$ кДж/(кг·°C) – ефективна теплоємність адсорбента, води та елементів конструкції; T_1 – максимальна температура, що досягається при десорбції сорбційного матеріалу, °C; T_2 – мінімальна температура в адсорбері, °C; $\Delta H_{дес} = 2850$ кДж/кг – теплота десорбції води.

Результати та їх обговорення

Результати дослідження сонячного адсорбційного холодильника з водяним акумулятором холоду представлені на рис. 3 у вигляді графічної залежності зміни температури в холодильній камері від часу. Мінімальна температура, яку було отримано через 6 годин після початку сорбції, склала 3 °C. Протягом майже 14 годин підтримувалася температура в холодильній камері нижче 10 °C. Користуючись рекомендаціями [5], температура в конденсаторі підтримувалася на рівні 30 °C. При середньодобовій питомій потужності в 15,125 кВт було отримано холодильний коефіцієнт 0,849.

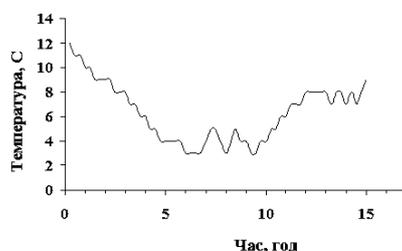


Рисунок 3 – Графік зміни температури в холодильній камері під час випаровування води у випарнику

Висновки

Було розроблено та досліджено сонячний адсорбційний холодильник з адсорбером на основі прозорого стільникового полікарбонатного пластику та композитного сорбційного матеріалу «сіліка-

гель/ Na_2SO_4 ». Представлений холодильник зовсім не споживає електроенергію та є цілком екологічно безпечним за рахунок використання водяного акумулятору холоду. При цьому розроблена конструкція не містить рухомих деталей, а тому практично безшумна. Введення в конструкцію теплоакумуляційного баку дозволило зменшити вплив погодних умов на час регенерації сорбційного матеріалу, та дає можливість будь-коли використовувати нагріту воду для побутових або технологічних потреб. Середньодобова холодильна потужність склала 15,13 кВт, а холодильний коефіцієнт – 0,85. Протягом 14 годин в холодильній камері підтримується температура на рівні 3–9 °С. Отримані результати роблять даний пристрій привабливим для використання в промисловості і побуті.

Література

1. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники / Кельцев Н.В. – М.:Химия, 1984. – 592 с.
2. Аристов Ю.И. Композитные сорбенты «соль в порах матрицы»: синтез свойства применение. /Аристов Ю.И., Гордеева Л.Г., Токарев. М.М. – Новосибирск: СО РАН, 2008. – 362 с.
3. Фотометричні дослідження стільникових полікарбонатних пластиків з метою їх ефективного використання в якості конструктивних елементів сонячних колекторів / Я.М. Козлов, М.П. Сухий, К.М. і др // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – 2010. – № 4 – С. 17.
4. Structure and adsorption properties of the composites ‘silicagelesodium sulphate’, obtained by solegel method/ Kostyantyn M. Sukhyu, Elena A. Belyanovskaya, Yaroslav N. Kozlov, Elena V. Kolomiyets, Mikhaylo P. Sukhyu // Applied Thermal Engineering. – 2014. – № 64. – p. 408–412.
5. Анализ цикла работы солнечных адсорбционных холодильных установок /О.С. Попель, С.Е. Фрид, С.С. Шаронов// Теплоенергетика. – 2007. – № 8. – с. 24–29.

Bibliography (transliterated)

1. Keltsev N.V. Osnovy adsorbtsionnoy tehniki. Keltsev N.V. – М.: Himiya, 1984. – 592 p.
2. Aristov Yu.I. Kompozitnyie sorbentyi «sol v porah matritsyi»: sintez svoystva primeneniye. Aristov Yu.I., Gordeeva L.G., Tokarev. M.M. – Novosibirsk: SO RAN, 2008. – 362 p.
3. Fotometrichni doslidzhennya stilnikovih polikarbonatnih plastikiv z metoyu yih effektivnogo vikoristannya v yakosti konstruktivnih elementiv sonyachnih kolektoriv. Ya.M. Kozlov, M.P. Suhyy, K.M. i dr. Tehnichna teplofizika ta promislova teploenergetika. – 2010. – # 4 – P. 17.
4. Structure and adsorption properties of the composites ‘silicagelesodium sulphate’, obtained by solegel method. Kostyantyn M. Sukhyu, Elena A. Belyanovskaya, Yaroslav N. Kozlov, Elena V. Kolomiyets, Mikhaylo P. Sukhyu. Applied Thermal Engineering. – 2014. – # 64. – P. 408–412.
5. Analiz tsikla raboty solnechnyih adsorbtsionnyih holodilnyih ustanovok. O.S. Popel, S.E. Frid, S.S. Sharonov. Teploenergetika. – 2007. – # 8. –P. 24–29.

УДК 662.997

Коломиец Е.В., Козлов Я.Н., Сухой К.М., Сухой М.П., Беляновская Е.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОГО АДСОРБЦИОННОГО ХОЛОДИЛЬНИКА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНОГО СОРБЕНТА «СИЛИКАГЕЛЬ/ Na_2SO_4 »

Создан и исследован адсорбционный холодильник на основе композитного сорбента «силикагель / Na_2SO_4 » с водяным аккумулятором холода. Регенерация адсорбента осуществляется только за счет солнечной энергии. Среднесуточная холодильная мощность составила 15,13 кВт, а холодильный коэффициент – 0,85. В течение 14 часов в холодильной камере поддерживается температура на уровне 3–9 °С.

Kolomiyets E.V., Kozlov J.N., Sukhyu K.M., Sukhyu M.P., Belyanovskaya E.A.

THE STUDY OF THE SOLAR ADSORPTION CHILLER BASED ON A COMPOSITE SORBENT «SILICA / Na_2SO_4 »

The adsorption refrigerator based on a composite sorbent «silica / Na_2SO_4 » with water cold accumulator was developed and studied. Regeneration of the adsorbent is carried out only by means of solar energy. Daily average cooling power is 15,13 kW and cooling coefficient is 0,85. A temperature in the refrigerator compartment is maintained to be 3–9 °C during 14 hours.

МЕТОДИКА ТА СТРАТЕГІЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ ІНЕРЦІЙНО-ФІЛЬТРУЮЧОЇ СЕПАРАЦІЇ У ВИСОКОЕФЕКТИВНОМУ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОМУ ГАЗОСЕПАРАЦІЙНОМУ ОБЛАДНАННІ З ЗАСТОСУВАННЯМ ІНТЕГРОВАНИХ SCADA ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ КОМПЛЕКСІВ

Вступ. Технології переробки нафти і газу традиційно дуже інерційно реагують на технічний прогрес і залишаються дуже енергозатратними та екологічно небезпечними. У процесі транспортування і переробки природного чи попутного нафтового газів багаторазово змінюється термодинамічний стан газу. За умов конденсації в технологічних системах утворюються гідрати, що закупорюють трубопроводи і трансферні лінії апаратів. При вмісті в газах водяної пари і сірчистих з'єднань створюються умови, які сприяють корозії металів. Тому однією з актуальних проблем, що стоять перед нафто-газовою промисловістю, є вдосконалення та оптимізація технологій і техніки сепарації вуглеводневих газоконденсатних систем, так як все існуюче сепараційне обладнання поєднує одне – низькі ефективність очищення та ступінь розділення, що не перевищує 70 % та забезпечує лише грубе очищення газів [1]. Причому в більшості випадків такі низькі показники обумовлені відхиленням робочих режимних параметрів від їх оптимальних проектних значень. При цьому постає актуальною задача застосування сучасних систем комп'ютерної математики та інженерних розрахунків, аналізу, статичного та динамічного моделювання, симуляції, оптимізації та синтезу хіміко-технологічних процесів (ХТП) та, відповідно, розробки та впровадження сучасних ефективних інтегрованих автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСУ ТП). Традиційно управління ХТП взагалі та, зокрема, процесами сепарації проводиться в «ручному» режимі або з застосуванням систем автоматичного управління/регулювання (САУ/САР) на базі застарілої щитової автоматики та пневматичних засобів автоматизації [2, 3]. Та нині настала епоха широкого впровадження інтегрованих САУ/САР-систем, що охоплюють основні етапи дослідження та моделювання ХТП, а також проектування відповідного апаратного оформлення цих процесів.

Одним з перспективних способів підготовки природного газу до транспортування є інерційно-фільтруюча сепарація, що поєднує переваги як інерційного, так і фільтруючого методів розділення газорідних систем [1]. Ефективність проведення експериментальних досліджень процесів інерційно-фільтруючої сепарації багато в чому залежить від своєчасного та точного збору інформації про протікання цих процесів, її обробки та відображення для аналізу та оптимізації. Тому передбачається доцільним і перспективним при фізичних термодинамічних моделюваннях метод автоматизованого управління складними динамічними процесами сепарації, заснований на застосуванні сучасних SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) програмно-апаратних комплексів.

Отже, метою роботи є створення методики досліджень процесів інерційно-фільтруючої сепарації при динамічному їх моделюванні, а також оптимізація процесів, що відбуваються в газосепараційному обладнанні з використанням інтегрованих SCADA програмно-апаратних комплексів.

Аналіз впливу факторів і параметрів процесу сепарації на ефективність розділення газорідних сумішей. Розглядаючи питання оптимізації та можливості управління процесами розділення газорідних сумішей, перш за все необхідно розглянути всі основні параметри, що впливають на процес в цілому та на ефективність розділення зокрема.

Цільовою функцією при проектуванні хімічного виробництва взагалі – є критерій ефективності, який залежить від конструктивних і режимних змінних, структури виробництва та управління ним, зовнішніх і внутрішніх випадкових або невизначених факторів (параметрів).

В якості основного критерію ефективності розділення газорідних сумішей прийнято використовувати долю сепарації дисперсної фази з суцільної [4, 5]. Але з точки зору управління процесом сепарації цей показник не є зручним, так як в реальних умовах контролювати витрати дисперсної фази (особливо в вихідних сумішах) дуже складно. Цей параметр є нерегульованим.

Отже, для реалізації задачі регулювання процесу розділення газорідних сумішей, важливо проаналізувати всі регульовані параметри роботи системи та визначити їхні оптимальні значення. При роботі сепараційного обладнання такими параметрами є: температура газу t , тиск газу P , об'ємна витрата газу V , що надходить в сепаратор, конструкція та геометричні розміри сепараційних елементів.

Зміна температури має не прямо пропорційний вплив на ступінь вилучення цільових компонентів з газорідної суміші [6]. При зниженні температури до певного значення ступінь конденсації та вилучення інтенсивно збільшується, а при температурах нижче цього значення, швидкість конденсації знижується.

ся. Також при регулюванні значенням температури необхідно враховувати середню молекулярну масу газу, тобто чим легшим є газ тим нижча температура потрібна для досягнення точки роси та вилучення цільового компонента [7].

Зміна тиску має аналогічний вплив [6]. Так, в області низьких тисків інтенсивність конденсації змінюється навіть при незначній його зміні. Однак при подальшому зростанні тиску інтенсивність конденсації зменшується.

Отже, існують певні оптимальні області значень режимних параметрів процесу, при яких можна досягти максимальної ефективності сепарації газоконденсатної системи. З цього випливає, що для управління та оптимізації процесів інерційно-фільтруючої сепарації, необхідно вміти комплексно контролювати та регулювати параметри, які безпосередньо впливають на ефективність.

Також на ефективність сепарації суттєвий вплив мають конструктивні особливості та геометричні розміри сепараційних пристроїв. При проектуванні інерційно-фільтруючих сепараторів необхідно враховувати, що при не великих радіусах кривизни гофр на жалюзійних пластинах ефективність сепарації висока, але при цьому також велика ймовірність зриву вловленої плівки рідини і вторинного бризковинесення. Якщо радіус гофр досить великий, то зрив вловленої плівки мінімізується, але ефективність уловлювання крапель рідини також невисока. Зміна кроку встановлення жалюзійних пластин впливає головним чином на швидкість руху газокраплинного потоку сепараційними секціями. Зменшення ширини каналів призводить до збільшення швидкості руху газу сепараційними каналами, тобто до збільшення інерційних сил, що діють на дисперсні частки, що збільшує ефективність сепарації. Але при перевищенні деякого критичного значення швидкості починається зрив вловленої плівки рідини та вторинне бризковинесення, тобто різке зниження ефективності процесу.

Зміна витрати газової суміші також впливає на зміну швидкості руху газу сепараційними пристроями, а отже на можливість вторинного бризковинесення та ефективність процесу розділення в цілому. Взагалі втрати цінної сировини через парове і краплинне винесення вуглеводнів є істотною проблемою технології сепарації. Зменшення крапельного винесення дозволяє добувати додатково десятки тисяч тонн газового конденсату на рік, при цьому зростає рентабельність розробки газоконденсатних родовищ. Таким чином, важливим моментом інтенсифікації технології сепарації є вдосконалення конструкцій сепараторів, зокрема модифікація краплеуловлюючих елементів і коагуляторів аерозолу з метою зменшення крапельного виносу вуглеводневої рідини. Ефективність роботи тієї або іншої конструкції сепаратора надійно визначається тільки експериментальним шляхом.

Стратегія оптимізаційних досліджень та моделювань процесів інерційно-фільтруючої сепарації з застосуванням інтегрованих SCADA програмно-апаратних комплексів. Як говорилося вище, для ефективного проведення оптимізаційних моделювань та досліджень хіміко-технологічних процесів важливим є своєчасний та точний збір інформації про протікання цих процесів, її обробки та відображення. Такі можливості надають сучасні інтегровані SCADA програмно-апаратні комплекси, що призначені для забезпечення роботи в реальному часі систем збору, обробки, відображення та архівації інформації про об'єкт моніторингу або управління [8]. Основні властивості таких комплексів: відкритість, багатоплатформеність, модульність, масштабованість. Інтегровані SCADA-системи виконують такі функції: введення вихідних даних; опитування датчиків; контроль достовірності та фільтрація показань датчиків аналогових сигналів, спеціальна обробка сигналів для забезпечення необхідної точності вимірювань, масштабування і технологічний контроль; автоматичне управління технологічним процесом; противарійний захист процесу; архівування інформації про протікання процесу; операторський інтерфейс (відображення інформації на схемах та оглядовій панелі, видач трендів параметрів, формування журналу оператора, формування і видача підсумкової інформації про результати проведення експериментів).

Перейдемо до розгляду задачі оптимального моделювання, в якій конструктивні змінні і режимні (керуючі) змінні повинні бути обрані таким чином, щоб мінімізувати приведені витрати, що включають вартість реалізованого проекту (капітальні витрати) і експлуатаційні витрати. Для ефективного вирішення поставлених задач досліджень розроблено стратегію оптимізаційних моделювань та систему автоматизованого управління експериментальним стендом. Блок-схема розробленої стратегії представлена на рис. 1. У відповідності до даної методології оптимізаційних моделювань ітераційно вирішуються три основних задачі: 1) розробка фізичної моделі процесу розділення газорідинних сумішей та проведення аналізу всіх параметрів, що впливають на систему та на ефективність її роботи; 2) вибір типів сепараційних пристроїв та їх геометричних розмірів для кожного ступеня сепарації, які задовольняють умовам отримання необхідного рівня ефективності проведення процесу; 3) вирішення задачі оптимізації процесів сепарації в умовах різних видів моделювань та визначення комплексного критерію ефективності процесу інерційно-фільтруючої сепарації.

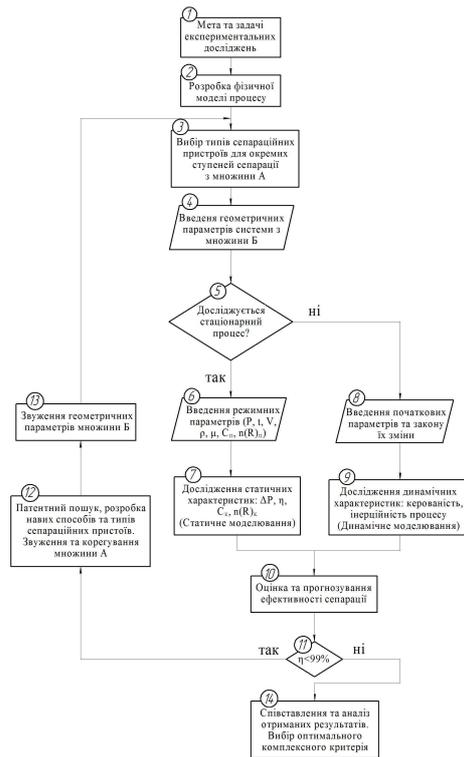


Рисунок 1 – Стратегія оптимізаційних моделювань процесів інерційно-фільтруючої сепарації

Методика експериментальних досліджень. Найбільший вплив на підвищення ефективності процесу розділення газорідних сумішей мають системи автоматизованого керування, які дозволяють не тільки оптимізувати режими роботи системи, але й реалізувати завдання дистанційного керування об'єктом.

Отже, метою експериментальних досліджень процесів інерційно-фільтруючої сепарації є аналіз впливу конструкційних особливостей секційних сепараторів на гідродинаміку та ефективність процесу, дослідження режимних параметрів роботи обладнання для оптимізації процесу сепарації газорідних сумішей. Також важливим є дослідження гідродинамічних характеристик інерційно-фільтруючої секції сепаратора та визначення їх основної геометричної характеристики – необхідної кількості гофр на жалюзійних пластинах.

Для досягнення поставленої мети досліджень послідовно розв'язуються наступні задачі:

- дослідження гідродинаміки сепараційних пристроїв верхнього блоку газосепаратора за ступенями сепарації;
- визначення гідравлічного опору сепараційних вузлів газосепаратора;
- визначення ефективності сепараційних вузлів за ступенями сепарації та сумарної ефективності сепарації газосепаратора;
- визначення розподілу температур та зон максимальної конденсації повздовж криволінійних каналів інерційно-фільтруючої секції сепаратора.

Для проведення експериментальних досліджень гідрогазодинаміки руху газової суміші з вмістом краплинної рідини, визначення ефективності сепарації запропонованої конструкції блочного сепаратора та оптимізації процесу розроблено експериментальну установку, схема та фото якої представлена на рис. 2.

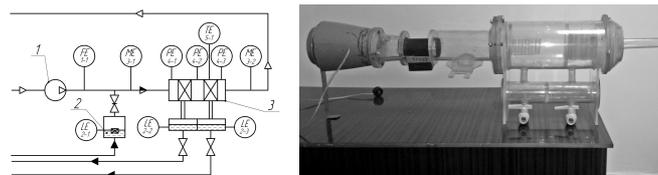


Рисунок 2 – Схема та фото експериментальної установки для дослідження гідродинаміки і ефективності сепарації
1 – газодувка, 2 – парогенератор, 3 – модель блочного сепаратора

У дослідах на моделі змінено (порівняно з промисловими умовами) масштаб установки. Геометрична подібність дотримується рівністю констант і інваріант подібності. Також передбачається, що обов'язково дотримується схожість руху відповідних часток і їх траєкторій в промислових умовах і в моделі.

Основні геометричні параметри експериментального стенду та моделі газосепаратора: тип сепаратора – блочний; висота $H = 300$ мм; діаметр корпусу верхнього блоку $D = 145$ мм, нижнього блоку $d = 60$ мм; розміри жалюзійного пакету $a \times b = 90 \times 75$ мм; кількість сепараційних каналів $N = 4$ шт; ширина сепараційних каналів $t = 12$ мм; радіус гофр жалюзійних пластин $R = 10$ мм (рис. 3).

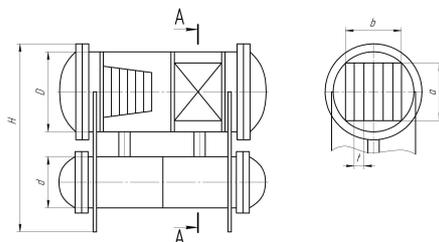


Рисунок 3 – Схема моделі блочного газосепаратора та основні геометричні розміри

Як зазначалося вище, основною метою досліджень є не лише контроль за параметрами процесу, а можливість управління процесом сепарації, для виявлення оптимальних режимних параметрів інерційно-фільтруючої сепарації та отримання максимальної ефективності процесу при мінімальних енерговитратах.

При виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт «Дослідження гідродинамічних та масотеплообмінних характеристик пристроїв з вихровими та високотурбулізованими одно та двофазними потоками» (ДР №0110U002632) кафедрою процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв факультету технічних систем та енергоефективних технологій та «Багатовимірні системи управління технічними і технологічними об'єктами» (ДР №0113U004134) кафедрою комп'ютерних наук факультету електроніки та інформаційних технологій Сумського державного університету в рамках міжфакультетського/міжкафедрального проекту для контролю та управління параметрами процесу установку з дослідно-демонстраційним експериментальним стендом для моделювання та дослідження процесів сепарації газорідних потоків, оптимізації конструкцій та випробувань сепараційних вузлів було обладнано сучасним SCADA програмно-апаратним комплексом на основі мікропроцесорної комп'ютерної техніки для обробки сигналів від таких контрольно-вимірювальних приладів: витрата повітря, що надходить до стенду сепаратора – датчик масової витрати повітря (ДМРВ) Siemens VDO 5WK 9 6351 (принцип роботи датчика побудований на принципі терморезистивного анемометра); рівень рідини у парогенераторі та прийомному баку сепаратора – ультразвуковий далекомір HC-SR04; для вимірювання температури в криволінійних каналах інерційно-фільтруючої секції – датчик температури DS18B20 (принцип роботи якого заснований на порівнянні частоти двох генераторів з різними температурними коефіцієнтами зміни частоти); для вимірювання вологості газу на вході та на виході з сепаратора - датчик вологості DHT22 (діапазон вимірювання вологості 0 %...100 %); для вимірювання тиску – датчик тиску MPX4080D (діапазон вимірюваного тиску 0...80 кПа, тип вимірюваного тиску – диференційний).

Експериментальні дослідження процесів інерційно-фільтруючої сепарації проводяться у відповідності до розробленої методики експериментальних досліджень:

1. Вмикається газодувка 1, при цьому газовий потік проходить через ДМРВ (поз. 1–1), за допомогою якого фіксується і регулюється необхідна витрата повітря;

2. Вмикається парогенератор 2, за допомогою якого отримується дисперсна волога. Витрата води регулюється засувкою, а вимірюється і контролюється ультразвуковим далекоміром (поз. 2–1). Далі потік дисперсної вологи змішується з потоком повітря. Для вимірювання вологості отриманого потоку встановлений датчик вологості (поз. 3–1).

3. Газорідний потік потрапляє до блочного сепаратора 3, де відбувається уловлювання дисперсних частинок. Для вимірювання гідравлічного опору сепараційних елементів встановлені три датчики тиску (поз. 4–1, 4–2, 4–3). Розподіл температур та зони максимальної конденсації повздовж криволінійних каналів інерційно-фільтруючої секції сепаратора визначаються датчиком температури (поз. 5–1).

4. Вловлена рідина відводиться з сепаратора у вигляді плівки і по дренажних каналах потрапляє в приймальний бак блочного сепаратора. Витрата вловленої води вимірюється і контролюється ультразвуковими далекомірами (поз. 2–2, 2–3).

5. Очищений газ направляється в атмосферу, але перед цим вимірюється його залишкова вологість датчиком вологості (поз. 3–2).

6. Вихідні сигнали всіх датчиків фіксуються та архівуються мікропроцесорним блоком. Схема дослідження представлена на рис. 4 [11]:

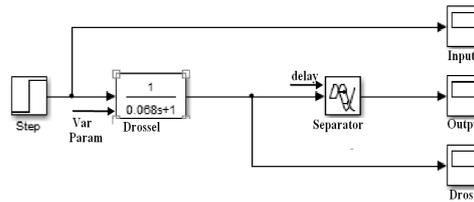


Рисунок 4 – Схема оцінки характеристик процесу сепарації

Методика визначення числа напівхвиль криволінійних каналів інерційно-фільтруючих газосепараторів. Однією з найважливіших геометричних характеристик інерційно-фільтруючих газосепараторів є необхідне число напівхвиль на гофрованих жалюзійних пластинах для забезпечення заданої ефективності роботи сепараційного пристрою. Одним із способів визначення ефективності є інтегрування розподілу часток за розмірами на вході в сепараційний пристрій і після кожної напівхвилі криволінійних сепараційних каналів. Після інтегрування отримуємо кількість рідини, що вловлюється після кожної гофри. Розподіл на вході в канал піддається логарифмічно-нормальному закону [9], а розподіл часток для півкілець знаходимо виходячи з континуальної моделі криволінійної течії газу [10]:

$$n(R_i) = \frac{\rho_1 v \cdot e^{-\frac{4\tau_1 \varphi (2v(R_{cp} - r)) + C\varphi(3r^2 - 6R_{cp}r + R_1R_2 + 2R_{cp}^2)}{R_2 - R_1}}}{v - \frac{2C\varphi(r - R_{cp})}{R_2 - R_1}}, \quad (1)$$

де C – розподіл часток по радіусу каналу; μ – в'язкість рідини; v – швидкість газу на вході в апарат, м/с; ρ_1 – щільність розподілу частинок на вході в гофру; r, φ – радіус і кут на якому ведеться розрахунок.

Якщо задатися необхідною ефективністю розділення газодисперсної суміші, то проведені розрахунки доводять раніше висловлені припущення, що для уловлювання крапель рідини розмірами $2R \geq 10 \mu\text{м}$ досить 3–4 гофри.

В рамках виконуваного міжкафедрального/міжфакультетського проекту, для перевірки та підтвердження математичних розрахунків експериментально, було впроваджено сучасний спосіб виміру дисперсного складу газорідинної суміші. Метод вимірювань базується на вимірюванні інтенсивності кутового розсіювання плоскої монохроматичної електромагнітної хвилі на частках аерозолі [12].

Типова схема реалізації даного методу вимірювань представлена на рис. 5.

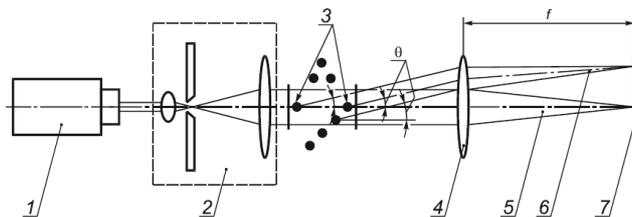


Рисунок 5 – Схема реалізації вимірювання дисперсного складу газорідинної суміші

1 – джерело електромагнітного випромінювання (лазер), 2 – блок формування променя, 3 – частки аерозолі, 4 – лінза, 5 – нерозсіяне випромінювання, 6 – розсіяне випромінювання, 7 – фотоаналізатор; θ – кут розсіювання, f – фокусна відстань лінзи

Лазер 1 випромінює електромагнітну хвилю, яка, пройшовши блок формування променя 2, потрапляє в зону, де знаходяться частки газорідинної суміші 3, дисперсний склад якої необхідно визначити. При цьому промінь лазера переломлюється і розсіюється. На основі індикатриси розсіювання, яку фіксує фотоаналізатор 7, вирішується зворотна задача розсіювання для моделей часток сферичної форми та знаходиться середній розмір часток аерозолі та розрахункова концентрація.

Оцінка розподілу часток за розмірами на вході і після окремих криволінійних ділянок наведена на рисунку 6.

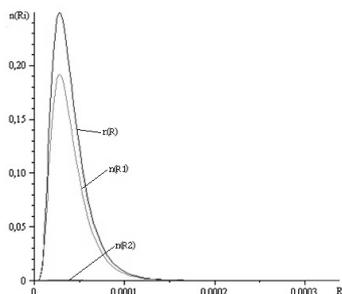


Рисунок 6 – Криві розподілу часток за гофрами криволінійного каналу

Висновок. В результаті проведеної роботи, на основі аналізу основних факторів та параметрів процесу розділення газорідинних сумішей, розроблено стратегію оптимізаційних моделювань інерційно-фільтруючої сепарації з використанням інтегрованих SCADA програмно-апаратних комплексів, а також розроблено та впроваджено методику експериментальних досліджень розділення газорідинних сумішей.

Основним завданням подальших досліджень у цьому напрямку залишається проведення експериментальних і оптимізаційних досліджень та обробка їх результатів з використанням SCADA програмно-апаратних комплексів, на основі чого буде проведено вибір оптимального комплексного критерію ефективності роботи інерційно-фільтруючого газосепараційного обладнання.

Література

1. Ляпощенко О.О. Підвищення ефективності сепараційного устаткування компресорних установок нафтогазової промисловості / Ляпощенко О.О., Склабінський В.І. // Вісник Сумського державного університету. – 2005. – №1(73). – с. 58–68.
2. Худович И.М. Современные системы автоматизированного моделирования химико-технологических процессов в нефтепереработке и нефтехимии / И.М. Худович. – Новополюцк : Полоцкий государственный университет, 2008. – 110 с.
3. Ляпощенко А.А. Проектирование объектов химических, нефтеперерабатывающих и пищевых производств с применением современных САПР / А.А.Ляпощенко, В.М.Маренок // Стратегия качества в промышленности и образовании: Материалы III Международной конференции. – Днепропетровск-Варна: "Фортуна"-ТУ-Варна, 2007.
4. Мильштейн Л.М., Бойко С.И., Запорожец Е.П. Нефтегазопромысловая сепарационная техника.– Справочное пособие под ред. Мильштейна Л.М.– М.: Недра.– 1992.– 236 с.
5. Синайский Э.Г. Разделение двухфазных многокомпонентных смесей в нефтегазопромысловом оборудовании. – М.: Недра, 1990.– 272 с., ил.
6. Берлин М.А., Гореченков В.Г., Волков Н.П. Переработка нефтяного и природного газа. – М.: Химия, 1981. – 472 с.
7. Николаев В.В., Бусыгина Н.В., Бусыгин И.Г. Основные процессы физической и физикохимической переработки газа. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 1998. – 184с.: ил.
8. Ляпощенко О.О. Динамічне моделювання процесів осушування природного газу із застосуванням SCADA-технологій АСУ ТП Газліфтної КС Анастасівського родовища / О.О.Ляпощенко, О.С.Хобта // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів ф-ту ТеСЕТ. – Суми: СумДУ, 2013. – Ч.2. – С. 135.
9. Склабінський В.І., Ляпощенко О.О. Механізми формування вискодисперсної краплинної рідини у потоці природного газу. – Сборник "Физика аэродисперсных систем". – 2004. – С. 7–15.
10. Буров А.А., Буров А.И., Гамолич В.Я. Континуальная модель запыленного криволинейного течения газа, Труды Одесского политехнического университета 2 (2004).– С. 1–3.
11. Г.В. Кулінченко, П.В. Леонтъев, О.О. Ляпощенко Ідентифікація моделі процесу низькотемпературної сепарації природного газу.
12. ГОСТ Р 8.777-2011 Дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения. – Москва, Стандартинформ, 2012.

Bibliography (transliterated)

1. Lyaposchenko O.O. Pidvishchennya effektivnosti separatsiynogo ustatkuvannya kompresornih ustanovok naftogazovoyi promislivosti. Lyaposchenko O.O., Sklabinskiy V.I. Visnik Sumskogo derzhavnogo universitetu. – 2005. – #1(73). – p. 58–68.

2. Hudovich I.M. Sovremennyye sistemyi avtomatizirovannogo modelirovaniya himiko-tehnologicheskikh protsessov v neftepererabotke i neftehimii. I.M. Hudovich. – Novopolotsk : Polotskiy gosudarstvenniy universitet, 2008. – 110 p.
3. Lyaposchenko A.A. Proektirovanie ob'ektov himicheskikh, neftepererabatyivayuschih i pischevyih proizvodstv s primeneniem sovremennyih SAPR. A.A. Lyaposchenko, V.M. Marenok. Strategiya kachestva v promyshlennosti i obrazovanii: Materialyi III Mezhdunarodnoy konferentsii. – Dnepropetrovsk-Varna: "Fortuna"-TU-Varna, 2007.
4. Milshteyn L.M., Boyko S.I., Zaporozhets E.P. Neftegazopromyislovaya separatsionnaya tehnika.– Spravochnoe posobie pod red. Milshteyna L.M.– M.: Nedra.– 1992.– 236 p.
5. Sinayskiy E.G. Razdelenie dvuhfaznykh mnogokomponentnykh smesey v neftegazopromyislovom oborudovanii. – M.: Nedra, 1990.– 272 p., il.
6. Berlin M.A., Gorechenkov V.G., Volkov N.P. Pererabotka neftyanogo i prirodnogo gaza. – M.: Himiya, 1981. – 472 p.
7. Nikolaev V.V., Busyigina N.V., Busyigin I.G. Osnovnyie protsessyi fizicheskoy i fizikohimicheskoy pererabotki gaza. – M.: OAO «Izdatelstvo «Nedra», 1998. – 184 p.: il.
8. Lyaposchenko O.O. Dinamichne modelyuvannya protsesiv osushuvannya prirodnogo gazu iz zastosuvanniam SCADA-tehnologiy ASU TP Gazliftnoyi KS Anastasivskogo rodovischa. O.O. Lyaposchenko, O.S. Hobta. Suchasni tehnologiyi u promislovomu virobnitstvi: materialy naukovu-tehnichnoyi konferentsiyi vikladachiv, spivrobotnikiv, aspirantiv i studentiv f-tu TeSET. – Sumi: SumDU, 2013. – Ch.2. – P. 135.
9. Sklabinskiy V.I., Lyaposchenko O.O. Mehanizmi formuvannya visokodispersnoti kraplinnoti ridini u pototsi prirodnogo gazu. – Sbornik "Fizika aerodispersnykh sistem". – 2004. – P. 7–15.
10. Burov A.A., Burov A.I., Gamolich V.Ya. Kontinualnaya model zapyilennogo krivolineynogo techeniya gaza, Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta 2 (2004).– P. 1–3.
11. G.V. Kulinchenko, P.V. Leontev, O.O. Lyaposchenko Identifikatsiya modeli protsesu nizkotemperaturnoti separatsiyi prirodnogo gazu.
12. GOST R 8.777-2011 Dispersnyiy sostav aerozoley i vzvesey. Opredelenie razmerov chastits po difraktsii lazernogo izlucheniya. – Moskva, Standartinform, 2012.

УДК 66.074.1:66-5+681.5

Склабинский В.И., Ляпощенко А.А., Настенко О.В.

МЕТОДИКА ТА СТРАТЕГІЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ІСЛІДОВАНИЙ ПРИ ДИНАМІЧЕСКОМУ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ ІНЕРЦІОННО-ФІЛЬТРУЮЩОЇ СЕПАРАЦІЇ В ВИСОКОЕФЕКТИВНОМУ ЕНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМУ ГАЗОСЕПАРАЦІЙНОМУ ОБОРУДОВАННІ С ПРИМЕНЕННЯМ ІНТЕГРОВАННИХ SCADA ПРОГРАМНО-АППАРАТНИХ КОМПЛЕКСІВ

Разработана стратегия исследований, которая позволяет проводить оптимизационное проектирование и моделирование процессов разделения газожидкостных смесей. На основании стратегии разработана и внедрена методика проведения экспериментальных исследований процессов инерционно-фильтрующей сепарации и дисперсного состава газожидкостных систем. При использовании предложенных стратегии и методики исследований представляется возможным определять комплексные критерии эффективности процессов и оборудования сепарации.

Sklabinskiy V.I., Liaposhchenko A.A., Nastenko O.V.

METHODOLOGY AND STRATEGY OF OPTIMIZATION STUDIES IN DYNAMIC MODELING OF INERTIAL-FILTERING SEPARATION PROCESSES IN HIGHLY EFFICIENT ENERGY SAVING GAS-SEPARATION EQUIPMENT USING INTEGRATED SCADA SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEMS

This article deals with the new research strategy which allows carrying out optimization designing and modeling of gas-mixture separation processes. On the basis of this strategy there is developed and implemented a methodology for research of the inertia-filtering separation process and particulate composition of the gas-liquid systems. When using the proposed research strategy and methodology one can define complex criteria of the processes efficiency and separation equipment.

**ДЕФЕКТЫ СТЫКОВОЧНОЙ ЛЕНТЫ УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ КИЛЯ
К ПОДКИЛЕВОЙ НАДСТРОЙКЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ,
ПРИВОДЯЩИЕ К НИМ**

Введение. Планер летательного аппарата (ЛА) и его элементы являются основой несущей конструкции самолёта. Прочность и жёсткость этой конструкции обеспечивает устойчивость её к воздействиям различных факторов в полёте. Изменения механических свойств планера как конструкции приводит как к поломке отдельных элементов планера, так и к более существенным разрушениям.

Выявление причин и факторов приводящих к изменению механических свойств планера – одна из важнейших задач проектирования ЛА.

Однако, не все факторы, особенно эксплуатационные можно учесть на этапе разработки. Многие из них выявляются в процессе эксплуатации, иногда в результате расследования катастроф и лётных происшествий. Кроме того, дефекты могут быть обнаружены как при выполнении периодических, регламентных работ, контрольных и целевых осмотров эксплуатирующей организации, так и при надзоре разработчиков (изготовителей) за эксплуатацией ЛА [1].

Изложение основного материала. Многообразие и стохастический характер воздействия различных факторов на ЛА приводят к тому, что при одной и той же наработке, или продолжительности эксплуатации ЛА имеют различные технические состояния.

Так, после катастрофы 2008 года ЛА МиГ-29 (разрушение вертикального оперения планера) на основании дополнения к методике от 06.02.2009 года осмотра накладок (стыковочная лента) 5.12.3410.2301.98, 5.12.3410.2401.98 крепления киля к подкилевой надстройке МиГ-29 с применением методов неразрушающего контроля (визуально и ультразвуковым толщиномером), разработанной научно-исследовательским центром «ОКБ им. А.И. Микояна», Государственным предприятием Министерства обороны Украины «Львовский государственный авиационный ремонтный завод» проведён осмотр всего парка МиГ-29. По результатам осмотра выявлено наличие трещин и расслоения металла в силовых элементах планеров и разрушение заклёпок обшивки, в результате коррозии металла, у 30 % МиГ-29 одного года выпуска, имеющих минимальный запас назначенного срока службы и наработкой 10 % от назначенного ресурса.

На фотографиях (рисунок 1) представлены элементы конструкции вертикального хвостового оперения планера ЛА со сроком эксплуатации более 18 лет и наработке около 250 часов, на котором видны трещины, расслоение металла, разрушение заклёпок обшивки, выявленные при оптико-визуальном осмотре места крепления киля к килевой надстройке с применением лупы 4-х кратного увеличения.

При выполнении диагностики элементов, стыковочной ленты, конструкции крепления киля к подкилевой надстройке ЛА, рисунок 2, неразрушающим методом контроля при помощи ультразвукового толщиномера, выявлено отклонения заданных параметров конструкции в зонах контроля, рисунок 3.

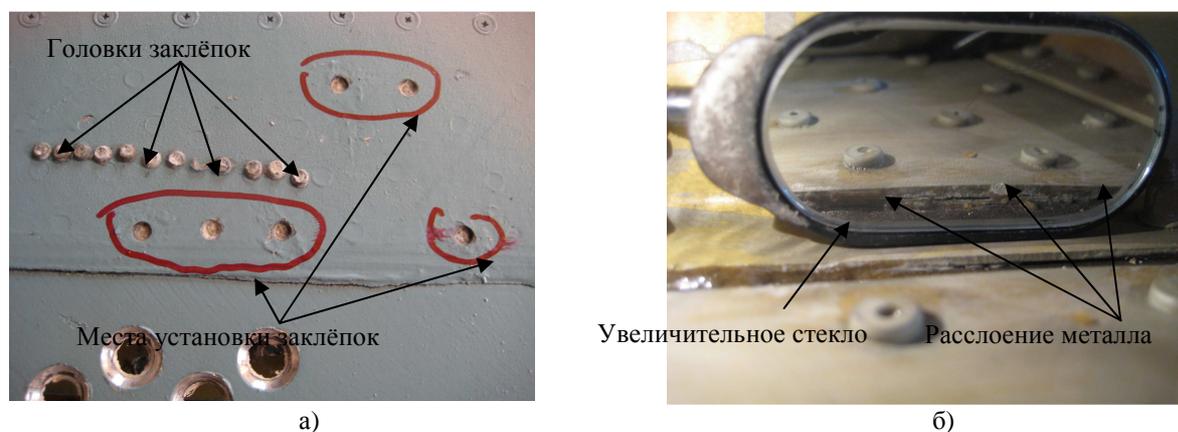


Рисунок 1 – Дефекты, выявленные при визуальном осмотре места крепления киля к подкилевой надстройке ЛА:
а) – разрушение заклёпок; б) – расслоение металла

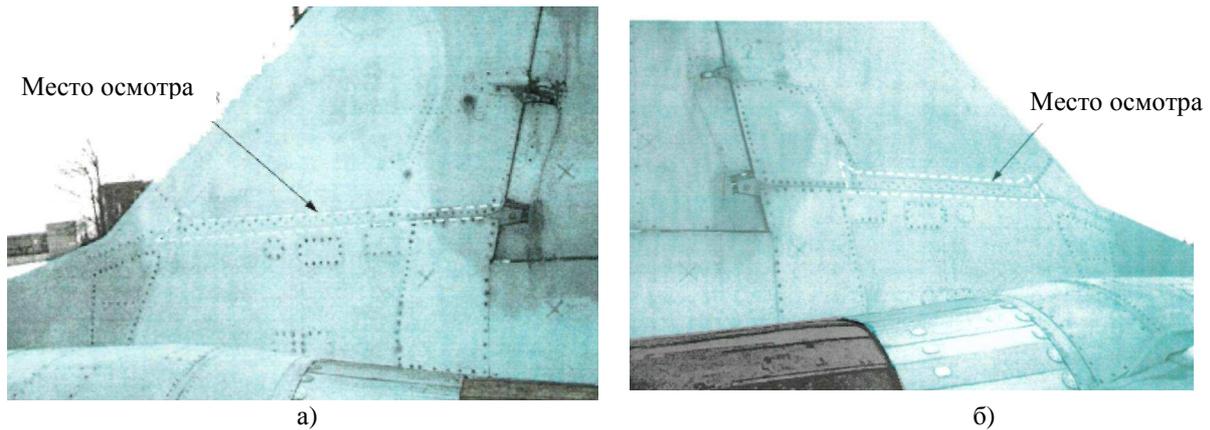


Рисунок 2 – Зона визуального контроля (стыковочная лента обведена штриховой линией) места крепления киля к килевой надстройке ЛА:
а) – левая стыковочная лента; б) – правая стыковочная лента

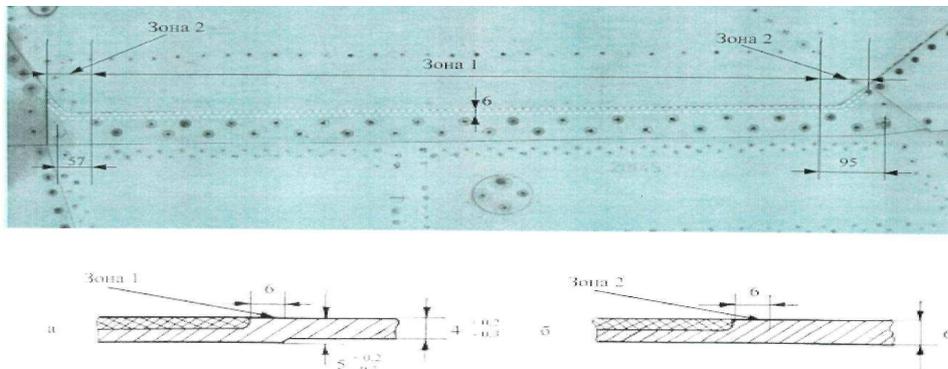


Рисунок 3 – Зона контроля при помощи ультразвукового толщиномера

Рассматривая более углубленно вопрос об изменении заданных параметров, рисунок 4, а именно толщины изделия $\delta_{\text{задан}}$ в контрольных зонах, толщина $\delta_{\text{узд}} < \delta_{\text{задан}}$ после измерения ультразвуковым толщиномером. При этом производились измерения толщины, тех же зон электронным штангенциркулем $\delta_{\text{штанг}} = \delta_{\text{задан}}$, было выявлено зону основного очага коррозии, рисунок 5, в области которого находится заклёпочное соединение.

Уменьшение толщины деталей приводит к снижению механических свойств конструкции планера ЛА, образованию зазоров и люфтов [2–4], что впоследствии может привести к необратимым последствиям.

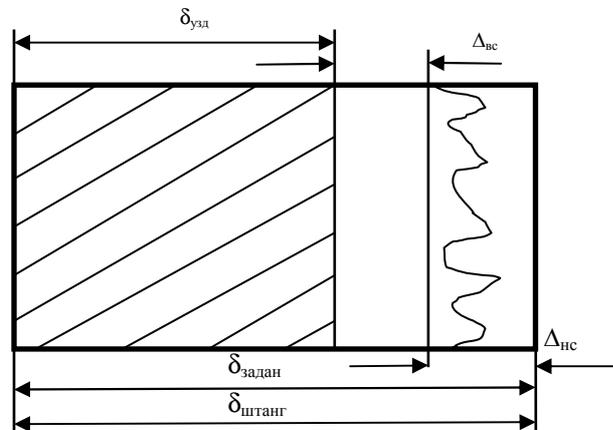


Рисунок 4 – Изменения толщины металла при диагностике ультразвуковым толщиномером

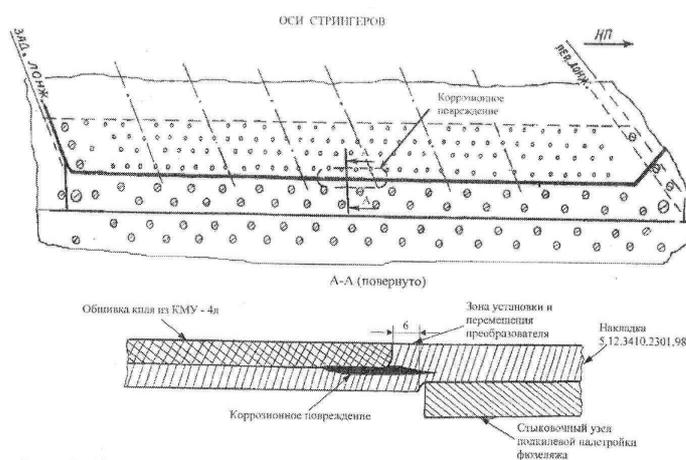


Рисунок 5 – Зона выявленного очага коррозии

Физическая картина процессов, которые могут привести к выявленному состоянию стыковочной ленты крепления киль к подкилевой надстройке, может быть представлена следующим образом.

Стыковочная лента крепления киль к подкилевой надстройке приклеена и прикреплена по нижней стороне киль к панелям киль, которые изготовлены из композиционного материала КМУ-4л. Место стыка панели и стыковочной ленты залито герметиком. Стыковочная лента изготовлена из алюминиевого сплава Д19чАТ. С её помощью киль крепится к полкам бортовой нервюры подкилевой надстройки двухрядным винтовым соединением на анкерных гайках [5] и находится в газовой негерметичной среде.

На земле во время длительной стоянки (хранения) на стыковочную ленту крепления киль к подкилевой надстройке воздействуют параметры атмосферы T_v , P , $d(\varphi)$. При этом влажность воздуха $\varphi \neq 0$, т.е. воздух всегда влажный. Также на неё воздействуют атмосферные факторы, такие как потоки газа, жидкости, твёрдых частиц, которые приводят к эрозии (разрушению) поверхностного защитного слоя элементов конструкции планера. На фотографии (рисунок б) показано нарушение герметичного слоя в районе стыка панели киль и стыковочной ленты крепления киль к подкилевой надстройке и образование зоны очага коррозии, показано на рисунке 5.



Рисунок 6 – Место стыка панели киль и стыковочной ленты крепления киль к подкилевой надстройке

При совершении полёта T_v понижается, причём начиная с высоты 1500 м $T_v < T_d$, где T_d – температура точки росы, что приводит к конденсации влаги на поверхностях конструкции. $T_{ла} \leq T_d$, также в полёте ЛА может попасть в зону атмосферных осадков в зависимости от метеорологических условий [6,7].

Эти капли влаги находятся на всей поверхности планера ЛА (фюзеляж, крыло, вертикальное и горизонтальное оперение, gondoly авиационных двигателей, воздухозаборники). В результате нарушения защитного слоя элементов конструкции планера, дальнейший процесс взаимодействия капель влаги и

поверхности определяется химической и электрохимической активностью конструкционных материалов [8] из которых изготовлены элементы конструкции планера. В данном случае нарушение защитного слоя в месте стыка обшивки и стыковочной ленты крепления киля к подкилевой надстройке привело к попаданию капель влаги под обшивку, и дальше к заклёпкам заклёпочного соединения. Кроме того эти свойства могут определить условия механического сопротивления материалов в узлах крепления [9]. За счёт механического воздействия при образовании люфтов и зазоров в местах контакта элементов конструкции разрушается оксидная плёнка не только стыковочной ленты крепления киля к подкилевой надстройке, но и заклёпок заклёпочного соединения, а также место проклейки и герметизации крепления к панели киля.

Низкая плотность и механическая прочность в сочетании с удовлетворительной стойкостью к коррозии делают алюминий конструкционным материалом, который широко используется в авиационной промышленности.

Коррозионная стойкость алюминия [10] в значительной степени зависит от содержания примесей других металлов. Как известно, при контакте двух металлов, погруженных в среду электролита, образуется гальваническая пара, где более активный металл становится анодом, а менее активный – катодом. В результате электрохимической реакции анод разрушается, рисунок 7.

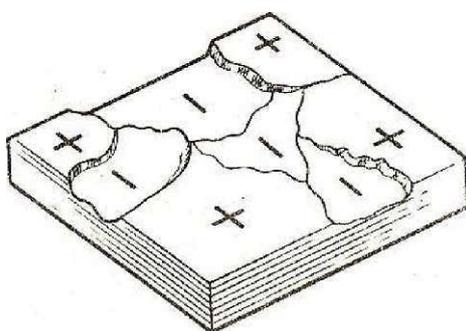


Рисунок 7 – Коррозионная повреждаемость самолётной обшивки

Большинство примесей (за исключением металлов, более активных, чем алюминий) играют роль катода по отношению к алюминию, т.е. способствуют его разрушению. По этой причине алюминий высокой чистоты отличается более высокой коррозионной стойкостью, чем технический металл, который, в свою очередь, более устойчив к коррозии, чем сплавы алюминия. Кроме того, коррозионная стойкость алюминия зависит от характеристик окружающей среды и от химических реакций, вызываемых этой средой в алюминии.

В присутствии окислителей поверхность алюминия покрывается защитным слоем оксида алюминия.

Защитный слой $\Delta_{кор}$ (Al_2O_3), в свою очередь, состоит из двух слоев, рисунок 4,8:

- внутреннего слоя $\Delta_{вс}$, который образуется при непосредственной реакции кислорода с металлом. Внутренний слой оксида прочно прилегает к металлу основы, а его структура и толщина зависят от температуры окисления.

- наружного слоя $\Delta_{нс}$, образующегося в результате реакции внутреннего слоя с внешней средой, в основном, с водой. Толщина этого слоя зависит от времени протекания коррозии и концентрации агрессивных веществ в окружающей среде. Увеличение толщины наружного слоя происходит за счет окисления металла основы. Наружный слой порист, он пропускает воздух и влагу.

В том случае, если герметичность оксидной плёнки не нарушена, алюминиевый сплав полностью защищён от воздействия воздуха и влаги. Но после образования хотя бы одного центра коррозии (химической, электрохимической) процесс коррозии происходит уже под оксидной плёнкой.

По электрохимическому механизму корродируют металлы в контакте с растворами электролитов (морская вода, растворы кислот, щелочей, солей). В обычных атмосферных условиях металлы корродируют также по электрохимическому механизму, т.к. на их поверхности имеются капли влаги с растворенными компонентами воздуха, которые проникают через $\Delta_{нс}$. Электрохимическая коррозия является гетерогенным и многостадийным процессом. Её причиной является термодинамическая неустойчивость металлов в данной коррозионной среде [11].

В техническом алюминии (или в его сплавах) содержатся примеси металлов в виде отдельных вкраплений (магний, титан, железо, марганец и др.) Благодаря наличию таких вкраплений сплав, погруженный в электролит, представляет собой совокупность большого количества микроскопических гальванических очагов. В результате электрохимической реакции, возникающей в этих очагах, металл, выступающий в

роли анода (а в нашем случае это основной компонент сплава, алюминий), растворяется, в то время как на микрокатодах выделяется водород, рисунок 9.

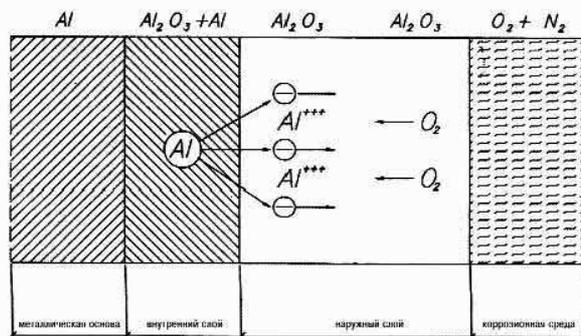


Рисунок 8 – Механизм образования слоя Al_2O_3

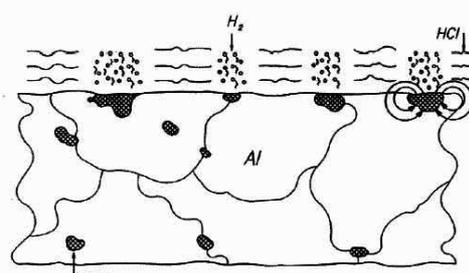


Рисунок 9 – Механизм электрохимической реакции в поверхностном слое алюминиевого сплава

Электрохимические реакции происходят также и при атмосферной коррозии, которая является наиболее распространенным видом коррозии разрушения металлов.

Основной причиной атмосферной коррозии является тонкий слой влаги, который образуется на поверхности металла, если его температура находится ниже температуры точки росы. С понижением температуры или при увеличении содержания водяного пара в воздухе конденсат оседает в виде капель воды. Если поверхность негладкая, покрыта пылью и слоями продуктов коррозии, то значительно раньше достигается температуры точки росы во всех углублениях, порах и трещинах конденсируется пар и образуется слой воды (так называемые центры конденсации или фазовых превращений), рисунок 10.

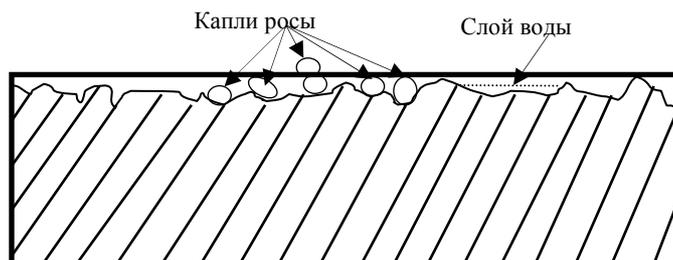


Рисунок 10 – Образование капель росы и слоя воды на поверхности металла

Некоторые газообразные вещества, содержащиеся в атмосфере, такие как оксиды азота, серы, хлорид водорода и другие, растворяются в конденсированной влаге, образуя кислоты. Поскольку растворимость этих веществ в воде очень высока, они концентрируются в слое воды даже тогда, когда их содержание в воздухе сравнительно невелико.

Скорость коррозии зависит как от характеристик коррозионной среды (внешних факторов), так и от свойств самого металла (внутренних факторов).

К внешним факторам относятся: состав среды; температура; атмосферное давление; ветровые нагрузки; блуждающие токи.

К внутренним факторам относятся: химический состав сплава; структура металла; внутренние напряжения; особенности конструкции планера и его элементов.

Влияние атмосферы на процесс коррозии зависит от климатической зоны, уровня развития промышленности в регионе и загрязненности атмосферы. Наиболее существенными факторами, определяющими коррозионные свойства атмосферы, являются, содержание пыли, газов, влажность и температура. Влиянием этих факторов объясняется различная скорость процесса коррозии. Так, чем ближе к морю, тем больше в воздухе солей, ускоряющих коррозию, особенно NaCl. В промышленных регионах в воздухе повышенное содержание соединений SO₂, NO₂ [12,13]. Отметим, что скорость коррозии на воздухе, как правило, значительно ниже, чем в пресной воде или почве.

На границе раздела двух разнородных фаз происходит переход заряженных частиц – ионов или электронов из одной фазы в другую, следовательно, возникает разность электрических потенциалов, распределение упорядоченных электрических зарядов, т.е. образование двойного электрического слоя.

Возникновение межфазового скачка потенциала можно объяснить следующими основными причинами, которые приводят к коррозии металлов, а именно:

- переход катионов металла из электролита на металл (электродный потенциал);
- адсорбция анионов электролита на металле (адсорбционный потенциал);
- возникновение ионно-адсорбционного потенциала за счёт одновременной адсорбции поляризуемого атома кислорода и перехода катионов из металла в электролит.

По известным причинам, абсолютное значение межфазовой разности потенциалов измерить нельзя, эту величину можно измерить относительно другой величины, и тогда за точку отсчета принимается стандартный водородный потенциал. Эта величина составляет 1,663 В относительно стандартного водородного электрода. Более полную картину можно представить, используя метод построения диаграмм рН – электродный потенциал.

Однако, диаграммы электрохимического равновесия дают неполную информацию для практической оценки коррозионного поведения алюминиевых сплавов. С этой точки зрения при изучении кинетики коррозионных процессов практический интерес представляет построение поляризационных диаграмм, определяющих взаимосвязь скорости коррозии со значениями электродного потенциала [14].

Наличие на межфазовой границе "металл-раствор" электролита двойного электрического слоя оказывает существенное влияние на процесс, а в частности, на скорость коррозии металлов. При изменении концентрации (плотности) положительных или отрицательных частиц в растворе или металле может измениться скорость процесса растворения металла. Именно из этих соображений электродный потенциал является одной из важнейших характеристик, определяющих скорость коррозии металла.

Вывод. В результате проведенного анализа физико-химического процесса вызывающего дефект стыковочной ленты крепления киля к подкилевой надстройке возникает ряд задач:

- разработка и внесение дополнений в эксплуатационную документацию по осмотру мест соединения элементов конструкции из композиционных материалов с элементами конструкции из металла, на предмет нарушения герметизации стыков, вздутия лакокрасочного покрытия в местах заклёпочного соединения;
- заменить стыковочную ленту крепления киля к подкилевой надстройке во время выполнения капитального, среднего ремонта и модернизации на авиационных ремонтных заводах;
- при проектировании новых образцов ЛА с аналогичной компоновочной схемой крепления киля, учесть выявленный дефект или разработать новую конструктивную схему.

Литература

1. ГОСТ В 15.704-83 "Авторский надзор в процессе эксплуатации изделий", – М.:ИПК издательство стандартов, 1984. – 22 с.
2. Волков Л.И., Шишкевич А.М. Надёжность летательных аппаратов, М.: Высшая школа, 1975. – 150 с.
3. Когг Ю.К., Майский Р.А. Основы надёжности авиационной техники, М.: Машиностроение, 1993. – 176 с.
4. Клячко М.Д., Арнаутов Е.В. Лётные прочностные испытания самолётов. Статистические нагрузки, М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
5. Дубинский В.И. Планер и взлётно-посадочное устройство самолёта истребителя типа МиГ-29, М.: Авиация, 1997. – 169 с.
6. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. 7-е изд., М.: Наука, 2006. – 582 с.
7. Яковлев А.Н. Авиационная метеорология, М.: Транспорт, 1971. – 248 с.
8. Батраков В.В., Батраков В.П., Пивоваров Л.Н., Соболев В.В. Коррозия конструктивных материалов. Газы и неорганические кислоты. В двух книгах. Кн. 1. Газы и фреоны, М.: Металлургия, 1990. – 344 с.

9. Пирогов Е.Н., Гольцев В.Ю. Сопrotивление материалов, М: МИФИ, 2008. – 200 с.
10. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы, Самара: Самарский гос.техн. ун-т, 2013. – 81 с.
11. Гонтовой С.В., Долгова О.И., Третьяк В.Г. Коррозия, методы защиты и повышения долговечности металлов, МО СССР, 1977. – 108 с.
12. Скалкин Ф.В., Канаев А.А., Копп И.З. Энергетика и окружающая среда, Л: Энергоиздат, 1981. – 280 с.
13. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город, Л: Гидрометеоздат, 1991. – 256 с.
14. Синявский В.С., Вальков В.Д., Будов Г.М. Коррозия и защита алюминиевых сплавов, М.: Металлургия, 1979. – 224 с.

Bibliography (transliterated)

1. GOST V 15.704-83 "Avtorskiy nadzor v protsesse ekspluatatsii izdeliy", – М.: ИПК izdatelstvo standartov, 1984. – 22 p.
2. Volkov L.I., Shishkevich A.M. Nadyozhnost letatelnykh apparatov, М.: Vysshaya shkola, 1975. – 150 p.
3. Kogg Yu.K., Mayskiy R.A. Osnovni nadyozhnosti aviatsionnoy tehniky, М.: Mashinostroenie, 1993. – 176 p.
4. Klyachko M.D., Arnautov E.V. Lyotnyye prochnostnyye ispytaniya samolyotov. Statisticheskie nagruzki, М.: Mashinostroenie, 1985. – 128 p.
5. Dubinskiy V.I. Planer i vzlyotno-posadochnoe ustroystvo samolyota istrebitelya tipa MiG-29, М.: Aviatsiya, 1997. – 169 p.
6. Hromov S.P., Petrosyants M.A. Meteorologiya i klimatologiya. 7-e izd., М.: Nauka, 2006. – 582 p.
7. Yakovlev A.N. Aviatsionnaya meteorologiya, М.: Transport, 1971. – 248 p.
8. Batrakov V.V., Batrakov V.P., Pivovarov L.N., Sobol V.V. Korroziya konstruktivnykh materialov. Gazyi i neorganicheskie kislotyi. V dvukh knigah. Kn. 1. Gazyi i freonyi, М.: Metallurgiya, 1990. – 344 p.
9. Pirogov E.N., Goltsev V.Yu. Soprotivlenie materialov, М: MIFI, 2008. – 200 p.
10. Luts A.R., Suslina A.A. Alyuminiy i ego splavyi, Samara: Samarskiy gos.tehn. un-t, 2013. – 81 p.
11. Gontovoy S.V., Dolgova O.I., Tretyak V.G. Korroziya, metodyi zaschityi i povyisheniya dolgovechnosti metallov, MO SSSR, 1977. – 108 p.
12. Skalkin F.V., Kanaev A.A., Kopp I.Z. Energetika i okruzhayushchaya sreda, L: Energoizdat, 1981. – 280 p.
13. Bezuglaya E.Yu., Rastorgueva G.P., Smirnova I.V. Chem dyshit promyshlennyiy gorod, L: Gidrometeozdat, 1991. – 256 p.
14. Sinyavskiy V.S., Valkov V.D., Budov G.M. Korroziya i zaschita alyuminiyevykh splavov, М.: Metallurgiya, 1979. – 224 p.

УДК 629.7.017

Аніпко О.Б., Фененко О.О.

ДЕФЕКТИ СТИКУВАЛЬНОЇ СТРІЧКИ ВУЗЛА КРІПЛЕННЯ КІЛЯ ДО ПІДКІЛЬОВОЇ НАДБУДОВИ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ, ЯКІ ПРИВОДЯТЬ ДО НИХ

Виконано аналіз дефекту стикувальної стрічки кіля до підкілевої надбудови планера літального апарата. Виявлено причини та фактори які привели до дефекту під час тривалої експлуатації літального апарата. За результатами аналізу було сформовано ряд задач які необхідно виконати, щодо подальшого запобігання цього дефекту.

Anipko O.B., Fenenko O.O.

DEFECTS IN THE DORSAL FIN- TO- THE LOWER FIN PART SPLICE STRIP ATTACHMENT AND PHYSICOCHEMICAL PROCESSES, LEADING TO THEM

The analysis of the defect in the dorsal fin- to- the lower fin part splice strip attachment has been done. Causes and factors leading to the defect during continuous service of the aircraft have been found out. As a result of the analysis, a number of tasks have been set as to avoiding this defect in the future.

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ХІМІЧНИХ ДЖЕРЕЛАХ СТРУМУ

Постановка науково-технічної задачі. Електричне коло хімічного джерела струму складається з послідовно з'єднаних провідників, що створені навантаженням, електродами та електролітом.

Під час струмоутворюючих реакцій на електродах хімічних джерел струму має місце перетворення хімічної енергії в електричну. Для з'ясування закономірностей, що відбуваються при перетворення енергії, потрібно встановити зв'язок між вхідними X_n та вихідними Y_k параметрами термодинамічних процесів, що протікають в хімічних джерелах струму, а саме встановити залежність електрорушійної сили хімічного джерела струму від температури, ентальпії та концентрації речовин в електрохімічних перетвореннях.

Аналіз літератури. При визначенні взаємозв'язку виду $Y_k=f(X_n)$ в [1–3] пропонується встановлювати цей зв'язок на підставі теоретичного аналізу термодинамічних процесів або експериментальним шляхом визначити реакцію хімічного джерела струму на зовнішнє збурення, при якому вхідні параметри змінюються відповідно до певного, заздалегідь заданого закону. Визначення цього закону залежить від мети, яку ставить дослідник, й являє собою достатньо складну самостійну задачу.

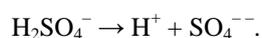
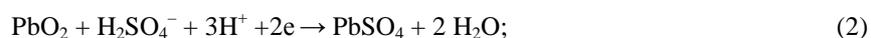
Мета дійсної статті – визначення впливу параметрів термодинамічних процесів, що відбуваються при електрохімічних перетвореннях в хімічному джерелі струму, на значення електрорушійної сили та щільності струму цього джерела.

Основний матеріал. Для протікання струму при вмиканні навантаження, тобто при вмиканні зовнішнього кола хімічного джерела струму між його електродами та електролітом повинна відбуватися заміна носіїв електричного розряду. Це має місце тоді, коли в хімічному джерелі струму протікають електричні процеси, які можуть бути представлені наступним співвідношенням

$$\sum_{i=1}^k \nu_{A_i} A_i \pm n e \sum_{j=1}^m \nu_{B_j} B_j = 0, \quad (1)$$

де A_i ; B_j – речовини, які приймають участь у реакції; ν_{A_i} ; ν_{B_j} – стехіометричні коефіцієнти реагуючих речовин; n – кількість електронів, що взаємодіють в електрохімічній реакції; $i = 1 \dots k$ – кількість речовин, що вступають в електрохімічну реакцію; $j = 1 \dots m$ – кількість речовин, що утворюються в процесі електрохімічних перетворень.

Відповідно до (1) на позитивному електроді свинцево-кислотного акумулятора протікають наступні реакції



На негативному електроді цього акумулятора процес, що відбувається, описується наступною реакцією



Протікання зазначених реакцій (2) та (3) супроводжується перетворенням хімічної енергії в електричну. Якщо в процесі протікання хімічної реакції кількість активних речовин, що накопичені на електродах, зменшується, то вільна енергія електрохімічної системи зменшується й хімічна енергія перетворюється в електричну. Якщо в електричному полі крім хімічного джерела струму (в даному випадку акумулятора) є й інше джерело постійного струму, електрорушійна сила якого більша електрорушійної сили акумулятора, то хімічна реакція протікає в протилежному напрямі й на електродах акумулятора накопичуються активні речовини (здійснюється зарядження акумулятора).

Для зсування закономірностей, що властиві процесам перетворення енергії, використаємо поняття термодинамічного потенціалу Φ . Згідно з [4] під термодинамічним потенціалом Φ , який визначається як функція стану системи, будемо використовувати наступне співвідношення

$$\Phi = U - TS + pV, \quad (4)$$

де U – внутрішня енергія електрохімічної системи; S – ентропія; T – абсолютна температура; p – тиск; V – об'єм.

Виходячи з закону збереження енергії, зміна термодинамічного потенціалу дорівнює максимальній корисній енергії хімічного джерела струму, тобто має місце наступне співвідношення

$$\Delta\Phi = n Fe E, \quad (5)$$

де $\Delta\Phi$ – різниця між термодинамічними потенціалами продуктів електрохімічних реакцій і вихідних речовин (фактично $\Delta\Phi$ дорівнює зміні термодинамічного потенціалу); n – кількість електронів, що приймають участь у електрохімічній реакції; Fe – число Фарадея, яке дорівнює $96490 \frac{\text{Кл}}{\text{г-екв}}$; E – величина електрорушійної сили хімічного джерела струму.

Для визначення електрорушійної сили E знаходимо повний диференціал $d\Phi$ з співвідношення (4). Маємо, що

$$d\Phi = dU - TdS - SdT + pdV + Vdp. \quad (6)$$

Використовуючи основне рівняння термодинаміки, яке об'єднує перший та другий закони, маємо

$$TdS = dU + pdV. \quad (7)$$

Враховуючи (7), перетворимо (6) до вигляду

$$d\Phi = -SdT + Vdp. \quad (8)$$

Для ізобарного процесу, що має місце в свинцево-кислотних акумуляторах, отримуємо, що

$$d\Phi = -SdT. \quad (9)$$

Використовуючи поняття ентальпії H , яка дорівнює

$$H = U + pV, \quad (10)$$

представимо термодинамічний потенціал Φ таким чином

$$\Phi = H - TS. \quad (11)$$

Використовуючи співвідношення (9) та (11), отримуємо

$$\Phi = H + T \frac{d\Phi}{dT}. \quad (12)$$

Враховуючи рівняння (5), отримуємо, що величина електрорушійної сили E визначається наступним диференціальним рівнянням першого порядку

$$T \frac{dE}{dT} - E = -\frac{\Delta H}{n Fe}. \quad (13)$$

Таким чином, величина електрорушійної сили хімічного джерела струму залежить від зміни ентальпії в електрохімічній реакції та від абсолютної температури і її зміни. Для з'ясування закономірностей зміни температури в електрохімічній реакції складемо рівняння теплового балансу. При цьому будемо виходи-

ти з наступного. Будемо вважати, що з трьох можливих механізмів переносу тепла слід враховувати лише теплопровідність, оскільки передача конвекцією й випромінюванням значно менші передачі тепла теплопровідності. З врахуванням вказаного зауваження кількість тепла q_T , що проходить за одиницю часу dt через одиницю об'єму dV від більш нагрітої ділянки до менш нагрітої визначається таким чином

$$d^2 q_T = -\lambda \operatorname{grad} T \, dV \, dt, \quad (14)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності.

Вважаючи, що коефіцієнт теплопровідності λ лишається постійним в процесі переносу тепла, та використовуючи основні співвідношення, які прийняті в векторному аналізі, а саме співвідношення $q_T = \operatorname{div}(\operatorname{grad} T) = \bar{V}^2 T$, де \bar{V} – оператор набла, представимо (14) в декартовій системі координат

$$q_T = -\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (15)$$

Кількість тепла $q_{\text{п}}$, що йде на нагрівання одиниці об'єму в одиницю часу dt , дорівнює

$$q_{\text{п}} = \gamma \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (16)$$

де γ – питома теплоємність; ρ – щільність.

Вводячи поняття кількості тепла $q_{\text{вп}}$, яке супроводжує електрохімічну реакцію, отримуємо

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\gamma \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_{\text{вп}}}{\gamma \rho}. \quad (17)$$

Кількість тепла $q_{\text{вп}}$ визначимо з наступних міркувань. Будемо вважати, що нормальна складова щільності струму рівномірно розподілені по поверхні електрода, а струмовідвід здійснюється зі всієї його верхньої грані.

Окремо визначимо тепло, яке виділяється на електродах та в електроліті. Струм в кожному електроді є лінійною функцією координати y , тобто

$$I(y, t) = \frac{I(t) \cdot y}{n}, \quad (18)$$

де n – висота електрода.

З врахуванням (18) тепло, що виділяється на електродах,

$$q_{\text{еп}_1} = \frac{I^2(t) y^2}{n^2} R_{\text{елт}} V, \quad (19)$$

де V – об'єм електрода; $R_{\text{елт}}$ – активний опір електрода.

Частка тепла $q_{\text{еп}_2}$, що виділяється в електроліті, дорівнює

$$q_{\text{еп}_2} = \frac{I^2(t)}{V_{\text{елт}}} R_{\text{елт}}, \quad (20)$$

де $V_{\text{елт}}$ – об'єм електроліту; $R_{\text{елт}}$ – активний опір електроліту.

Для свинцево-кислотних акумуляторів в [1] пропонується при щільності електроліту, що дорівнює $1,26 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, наступна експериментальна залежність

$$R_{\text{елт}} = 0,45 \left(1 + e^{-0,05T}\right) \frac{l}{bh}, \quad (21)$$

де l – відстань між електродами; b – ширина електродів.

Кількість тепла $q_{\text{ен}_3}$, яке виділяється в процесі електрохімічних перетворень, можливо визначити, враховуючи, що кількість молей M компонентів, які брали участь в реакції, дорівнює

$$M = \frac{\int_0^t I(t) dt}{nFe}. \quad (22)$$

Відповідно до (22) $q_{\text{ен}_3}$ дорівнює

$$q_{\text{ен}_3} = \frac{TdS \int_0^t I(t) dt}{nFe}. \quad (23)$$

Співвідношення (23) отримано, виходячи з припущення, що в свинцево-кислотному акумуляторі тиск під час електричної реакції не змінюється. Експериментальні дослідження свинцево-кислотних акумуляторів [2] дозволяють стверджувати, що температурне поле в них є однорідним. Це припущення спрощує розглядаємо задачу і дозволяє записати наступне рівняння теплового балансу

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot \frac{1}{\rho\gamma} + \frac{1}{\rho\gamma} (q_{\text{ен}_1} + q_{\text{ен}_2} + q_{\text{ен}_3}). \quad (24)$$

Початкові та граничні умови для рівняння (24) мають такий вигляд

$$\begin{aligned} T(x, 0) &= T_{nc}(0); \\ \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} &= -\frac{\gamma\rho}{\lambda} [T_{nc}(t) - T(0, t)]; \\ \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=l} &= \frac{\gamma\rho}{\lambda} [T_{nc}(t) - T(l, t)], \end{aligned} \quad (25)$$

де $T_{nc}(0)$ – початкове значення температури навколишнього середовища.

Зміна ентропії в (24) для хімічної реакції $\text{PbO}_2 + \text{Pb} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 = 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ визначається таким чином

$$dS = 2S_{\text{PbSO}_4}^0 + 2S_{\text{H}_2\text{O}}^0 - S_{\text{PbO}_2}^0 - S_{\text{Pb}}^0 - 2S_{\text{H}_2\text{SO}_4}^0. \quad (26)$$

Розв'язання задачі визначення абсолютної температури і її зміни ускладнюється в зв'язку з тим, що значення λ , γ та ρ не лишаються незмінними й залежать від температури T . Частіше за все, теплофізичні параметри λ , γ та ρ знаходять шляхом обробки результатів експериментів, в ході проведення яких вирішується не пряма, а зворотна задача для знайденого температурного поля.

Після визначення електрорушійної сили E можливо знайти електричні потенціали ϕ електродів і щільність струму I , використовуючи для цього наступні співвідношення

$$\begin{aligned} E &= \text{grad}\phi; \\ I &= \delta E, \end{aligned} \quad (27)$$

де δ – питома електропровідність.

Потенціали електродів можливо знайти, використовуючи для цього рівняння Нернста

$$\begin{aligned}\phi^- &= \phi_0^- + \frac{RT}{2Fe} \ln \frac{a_H^+}{a_{H_2SO_4}^-}; \\ \phi^+ &= \phi_0^+ + \frac{RT}{2Fe} \ln \frac{a_{H^+}^3 \cdot a_{H_2O}^-}{a_{H_2O}^2},\end{aligned}\tag{28}$$

де R – універсальна газова константа; ϕ_0^- , ϕ_0^+ – стандартні потенціали негативного та позитивного електродів, a_H^+ , $a_{H_2SO_4}^-$, a_{H_2O} – відповідні активності потенціаловизначаючих іонів у поверхні електродів, пов'язані з відповідними концентраціями.

Висновки

1. До узагальнених параметрів, за допомогою яких можливо визначити електродні реакції і відповідні фізико-хімічні перетворення, слід віднести потенціали електродів, концентрації речовин, що реагують, щільність струму та температуру.

2. Узагальнені співвідношення, що встановлюють зв'язок між вхідними та вихідними параметрами хімічних джерел струму враховують вплив концентраційного, електричного та теплового поля на електрохімічні реакції.

3. Складний взаємозв'язок процесів переносу заряджених частинок, переносу тепла і масопереносу приводять до задачі, яку практично не можливо вирішити, особливо в випадку її представлення в розглянутій загальній постановці.

4. Для розв'язання практичних завдань, пов'язаних, наприклад, з оцінюванням стану хімічного джерела струму шляхом визначення його залишкової ємності, слід спростити узагальнені співвідношення, враховуючи при цьому лише ті чинники, що безпосередньо впливають на процеси зарядження і розрядження.

Література

1. Системы автономного электроснабжения. Учебник. Б.Ф. Самойленко, Б.Т. Кононов, Ю.А. Скворцов, Н.И. Григоров, В.Г. Михайловский. МО СССР, 1990. – 317 с.
2. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока. – М.: Сов. радио, 1978. – 328 с.
3. Дасоян М.А., Агур И.А. Современная теория свинцового аккумулятора.– Л.: Энергия, 1975.– 297 с.
4. Термодинамика. Энрико Ферми, Издательство Харьковского университета, 1973. – 136 с.

Bibliography (transliterated)

1. Sistemyi avtonomnogo elektrosnabzheniya. Uchebnyk. B.F. Samoilenko, B.T. Kononov, Yu.A. Skvortsov, N.I. Grigorov, V.G. Mihaylovskiy. MO SSSR, 1990. – 317 p.
2. Romanov V.V., Hashev Yu.M. Himicheskie istochniki toka. – M.: Sov. radio, 1978. – 328 p.
3. Dasoyan M.A., Agur I.A. Sovremennaya teoriya svintsovogo akkumulyatora.– L.: Energiya, 1975.– 297 p.
4. Termodinamika. Enriko Fermi, Izdatelstvo Harkovskogo universiteta, 1973. – 136 p.

УДК 541.135

Кононов Б.Т.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКАХ ТОКА

В статье предлагается рассматривать электрохимические реакции в химических источниках тока, учитывая при этом термодинамические процессы, процессы переноса тепла и заряженных частиц.

Kononov B.T.

THERMODYNAMIC PROCESSES IN CHEMICAL POWER SOURCES

The article deals with the electrochemical reaction in chemical power sources, taking into account the thermodynamic processes, heat and transport processes of charged particles.

**АНАЛИЗ И ВЫБОР ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА КАРБАМИДА НА АГРЕГАТЕ АК-70**

Введение. Производство карбамида является одним из наиболее энергоемких химико-технологических процессов [1–3]. В настоящее время эффективность и рациональность использования топливно-энергетических ресурсов во многом определяется за счет эффективности работы технологического оборудования завода. Однако оборудование большинства предприятий, которые были запущены в эксплуатацию в 60–70-х годах прошлого столетия, не отвечает современным требованиям по качеству продукции, безопасности, уровню автоматизации управления процессами и т.д.

Поэтому существующие установки подвергаются реконструкции, в которой капиталовложение должны быть сведены к минимуму путем наиболее полного использования уже имеющего оборудования.

Зачастую существующее теплообменное оборудование на установках не обеспечивает необходимые параметры даже после оптимизации, и экономически целесообразно становится внедрение высокоэффективного ресурсосберегающего оборудования.

Во многих случаях наряду с повышением тепловой эффективности такого оборудования необходимо решать и другие не менее важные задачи: снижение металлоемкости, повышение эксплуатационной надежности и работоспособности.

В большинстве промышленных технологических процессов используются разнообразные варианты решения задачи теплоснабжения. Теплообменники передают тепло или холод от одной жидкости к другой и играют ключевую роль в обеспечении эффективности всего производственного процесса.

Компания Alfa Laval предлагает широчайший выбор теплообменников: от аппаратов, рассчитанных на работу при низких давлениях и температурах, до аппаратов, справляющихся с агрессивными средами, высокими и постоянно изменяющимися температурами и давлениями [4].

Поэтому использование пластинчатых теплообменников фирмы Alfa Laval является наиболее рационально.

Описание реконструированной схемы процесса производства гранулированного карбамида на агрегате АК-70. При интеграции потоков обычно используют сеточные диаграммы [5], на которые можно нанести все необходимые технологические данные, и при синтезе системы рекуперативного теплообмена нет необходимости в изменении маршрутизации технологических потоков при изменении расположения теплообменных аппаратов.

На рисунке 1 представлена сеточная диаграмма проекта реконструкции теплообменной сети. Тепловая интеграция выполняется для двух энергетически независимых подсистем ниже и выше пинча [6]. В подсхеме выше пинча холодные потоки находятся в тепловом балансе с горячими потоками и горячими утилитами. Аналогично, в системе ниже точки пинча горячие потоки находятся в тепловом балансе с холодными потоками и холодными утилитами.

Для выполнения теплового баланса выше и ниже точки пинча, который соответствует составным кривым, горячие потоки должны быть приведены к целевой температуре за счет теплообмена с холодными потоками.

Для того чтобы холодный поток № 16 – поток аммиака на колонну синтеза [7] довести до целевой температуры потребуется два теплообменных аппарата. С помощью расщепления и теплообмена с потоками №9 и №14, одна ветвь нагревается потоком № 9 – парожидкостной смесью из гидролизеров – поток №9 в теплообменнике № 11. Затем он охлаждается в утилитном теплообменном аппарате. Вторая ветвь потока № 16 нагревается потоком № 14 – потоком конденсата в теплообменнике №10, который сейчас поступает в теплообменник №13.

Холодный поток №22 – соковый конденсат доводится до своей пинч-температуры за счет теплообмена с потоком №7 – вторичный пар из 122. Затем он охлаждается в утилитном теплообменном аппарате.

Чтобы довести до пинч-температуры соковый конденсат (холодный поток №23) понадобится теплообмен с потоком №8 – вторичный пар из 126. Затем он охлаждается в утилитном теплообменном аппарате.

Выше пинча горячий поток № 3 – пары дистилляции первой ступени в 32а охлаждаются до своей целевой температуры за счет теплообмена с холодным потоком № 19 – жидкая фаза из 21 в 24.

Охлаждение вторичного пара из 122 (горячий поток № 7) до температуры пинча горячих потоков выше пинча за счет теплообмена с первой ветвью холодного потока №23 –раствора из 50 в 42.

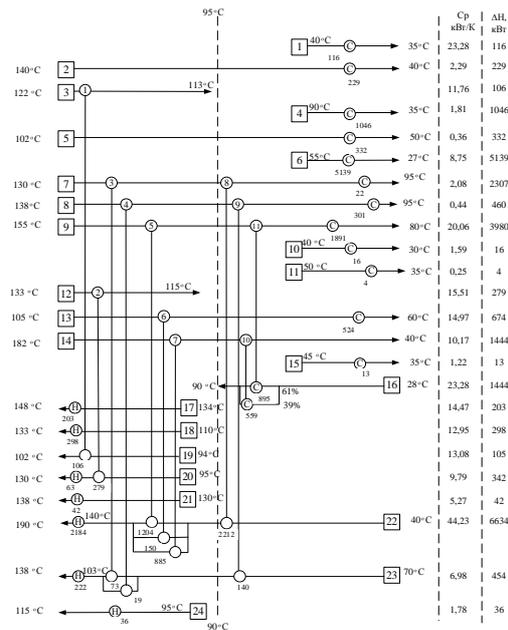


Рисунок 1 – Сеточная диаграмма интегрированного процесса производства гранулированного карбамида на агрегате АК-70

CP – потоковая теплоемкость, кВт/К; ΔH – изменения потоковой энтальпии, кВт;
 1–11– рекуперативные теплообменные аппараты;
 C, H – утилитные теплообменные аппараты

Горячий поток № 8 – вторичный пар из 126 охлаждается до температуры пинча горячих потоков выше пинча за счет теплообмена со второй ветвью холодного потока №23 –раствора из 50 в 42. Затем этот поток нагревается в утилитном теплообменном аппарате до своей целевой температуры.

Парожидкостная смесь из гидролизеров – горячий поток № 9 охлаждается до температуры пинча горячих потоков выше пинча за счет теплообмена с первой ветвью холодного потока №22 –сокового конденсата.

Горячий поток № 12 – раствор в 104 охлаждается до температуры пинча горячих потоков выше пинча за счет теплообмена с холодным потоком №20 –жидкая фаза из 120 в 122. Затем этот поток нагревается в утилитном теплообменном аппарате до своей целевой температуры.

Для того чтобы охладить вторичный пар из 122 (горячий поток № 13) до температуры пинча горячих потоков выше пинча необходим теплообмен со второй ветвью холодного потока №22 –сокового конденсата.

Горячий поток № 14 – поток конденсата, который сейчас направляется в теплообменник №13 охлаждается до пинч-температуры за счет теплообменника с третьей ветвью холодного потока №22. Затем этот поток нагревается в утилитном теплообменном аппарате до своей целевой температуры.

Остальные горячие потоки №1, №2, №4, №5, №6, №10, №11, №15 охлаждаются в утилитных теплообменных аппаратах, а холодные потоки №17, №18, №21, №24 нагреваются в утилитных теплообменниках паром.

Благодаря построению составных кривых для существующего и интегрированного процессов [8] и сеточной диаграмме интегрированного процесса (рис. 1) был создан проект реконструкции процесса производства гранулированного карбамида (рис. 2).

Анализ и выбор теплообменного оборудования и системы теплообмена.

После провидения пинч-проектирования было определено количество теплообменного оборудования, а также мощность, которую они потребляют.

Площади поверхности теплообменного оборудования определяется по формуле:

$$S = \frac{Q}{K \cdot \Delta T_{ln}}, \tag{1}$$

где Q – мощность теплообменного аппарата, которая объединяет холодный и горячий потоки; K – коэффициент теплопередачи между холодным и горячим потоками; ΔT_{ln} – логарифмическая разность температур холодного и горячего потоков.

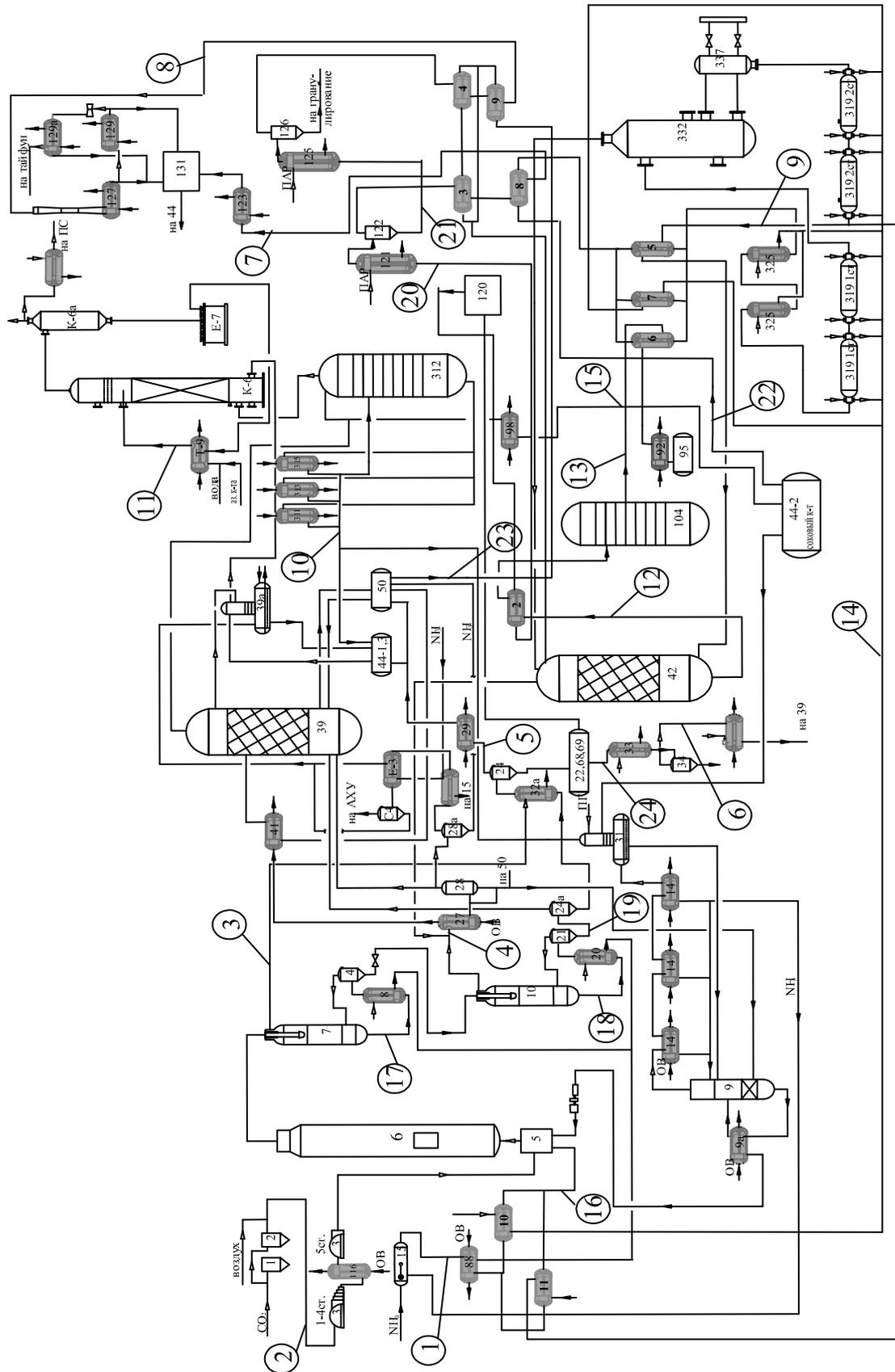


Рисунок 2 – Проект реконструкції процесу гранульованого карбаміда в агрегатах АК-70

Необходимые значение коэффициента теплопередачи определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

где α_1 – коэффициента теплоотдачи холодного потока, кВт/ (м²·°C); α_2 – коэффициента теплоотдачи горячего потока, кВт/ (м²·°C).

Логарифмическая разность температур рассчитывается по формуле:

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_{H_2} - T_{C_1}) - (T_{H_1} - T_{C_2})}{\ln \frac{T_{H_2} - T_{C_1}}{T_{H_1} - T_{C_2}}}, \quad (3)$$

где T_{H_1} – начальная температура горячего потока, °C; T_{H_2} – конечная температур горячего потока, °C; T_{C_1} – начальная температур холодного потока, °C; T_{C_2} – конечная температур холодного потока, °C.

Площадь теплообмена для всей теплообменной сети рассчитывается:

$$A_{\text{сеть}} = \sum_{k=1}^M \frac{1}{\Delta T_{\ln k}} \sum_{i=1}^{I_k} \sum_{j=1}^{J_k} \frac{Q_{ij}^k}{K_{ij}}, \quad (4)$$

где Q – тепловая нагрузка между i -м горячим и j -м холодным потоками, кВт; K – коэффициент теплопередачи между ними, кВт/ (м²·°C); I – количество горячих потоков k -ому интервале; J – количество холодных потоков в k -ому интервале; M – количество всех интервалов.

В таблице 1 приведен список необходимых теплообменников, которые можно расположить на предлагаемых размещениях сеточной диаграммы проекта реконструкции (рис. 1). Потребление горячих утилит составляет 2,9 МВт, а холодных – 9,5 МВт.

Таблица 1 – Таблица теплообменников для проекта реконструкции теплообменной системы

№	Горячий поток			Холодный поток			Q, кВт	S, м2	Стоимость, долл. США	Существующие теплообменники на новых позициях
	№	Твх, °C	Твых, °C	№	Твх, °C	Твых, °C				
T1	3	122	113	19	94	102	105	–	–	32а
T2	12	133	115	20	95	122	270	–	–	51
T3	7	130	95	23	90	103	73	9	10000	
T4	8	138	95	23	90	103	19	4	5000	
T5	9	155	95	22	90	140	1204	324	163000	
T6	13	105	95	22	90	100	150	10	11000	
T7	14	182	95	22	90	140	885	15	16000	
T8	7	95	95	22	40	90	2212	–	–	318
T9	8	95	95	23	70	90	140	4	5000	
T10	14	95	40	16	28	90	559	–	–	13
T11	9	95	80	16	28	90	885	10	11000	
							Всего	376	221000	

Выводы и перспективы дальнейшего развития данного направления. Целью данного проекта заключается в исследовании теплообменного оборудования. В результате применения пинч-методов получена новая система теплообмена и представлена работоспособная, экономически выгодная энерготехнологическая схема процесса производства. Были получены и занесены в таблицу основные параметры теплообменных аппаратов. Результаты данной работы можно использовать для экономического обоснования эффективного использования проекта реконструкции.

Литература

1. Горловский Д.М. Технология карбамида / Д.М. Горловский, Л.Н. Альтшулер, В.И. Кучерявый. – Л. Химия, 1981. – 320 с.
2. Клевке В.А. Технология азотных удобрений / В.А. Клевке, Н.Н. Поляков, Л.З. Арсеньева–Москва: Гос. научтехиздат химической литературы, 1956. – 288 с.

3. Кучерявый В.И. Синтез и применение карбамида / В.И. Кучерявый, В.В. Лебедев. – Л.: Химия, 1970. – 448 с.
4. Товажнянский Л.Л. Пластинчатые теплообменники в промышленности / Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л.Хавин, О.П.Арсеньева. – Х.: НТУ «ХПИ», 2004. – 232с.
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. Интеграция тепловых процессов на установке первичной переработки нефти АВТ А12/2 при работе в зимнее время / Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев [и др.] // Теорет. основы хим. технологии. – 2009. –Т. 43, –№6. –С. 665–676.
7. Ульев Л.М. Экстракция данных для пинч-анализа производства карбамида на агрегате АК-70 / Л.М. Ульев, О.А. Яценко // Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал – Харків: НТУ«ХПІ». 2013. – №2. С. 114–120.
8. Ульев Л.М. Определение энергосберегающего потенциала на установке АК-70 с помощью пинч-анализа / Л.М. Ульев, О.А. Яценко // Наукові праці ОНАХТ – Одесса. 2013. Вип. 43.Том. 1. С. 11–15.

Bibliography (transliterated)

1. Gorlovskiy D.M. Tehnologiya karbamida. D.M. Gorlovskiy, L.N. Altshuler, V.I. Kucheryavyy. – L. Himiya, 1981. – 320 p.
2. Klevke V.A. Tehnologiya azotnyih udobreniy. V.A. Klevke, N.N. Polyakov, L.Z. Arseneva.– Moskva: Gos. nauchtehzdat himicheskoy literatury, 1956. – 288 p.
3. Kucheryavyy V.I. Sintez i primeneniye karbamida. V.I. Kucheryavyy, V.V. Lebedev.– L.: Himiya, 1970.– 448 p.
4. Tovazhnyanskiy L.L. Plastinchatyye teploobmenniki v promyshlennosti. L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, G.L. Havin, O.P. Arseneva. – H.: NTU «HPI», 2004. – 232 p.
5. Smit R. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov. R. Smit, Y. Klemesh, L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, L.M. Ulev. – Harkov: HGPU, 2000. – 457 p.
6. Tovazhnyanskiy L.L. Integratsiya teplovyih protsessov na ustanovke pervichnoy pererabotki nefiti AVT A12/2 pri rabote v zimnee vremya. L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, L.M. Ulev [i dr.]. Teoret. osnovyi him. tehnologii. – 2009. –Т. 43, –#6. – P. 665–676.
7. Ulev L.M. Ekstraktsiya dannyih dlya pinch-analiza proizvodstva karbamida na agregate AK-70. L.M. Ulev, O.A. Yatsenko. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. Schokvartalniy naukovopraktichniy zhurnal – Harkiv: NTU«HPI». 2013. – #2. P. 114–120.
8. Ulev L.M. Opredeleniye energosberegayushchego potentsiala na ustanovke AK-70 s pomoschyu pinch-analiza. L.M. Ulev, O.A. Yatsenko. Naukovi pratsi ONAHT – Odessa. 2013. Vip. 43.Том. 1. P. 11–15.

УДК 612.461.2

Ульєв Л.М, Яценко О.О

**АНАЛІЗ І ВИБІР ТЕПЛОБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА
КАРБАМІДУ НА АГРЕГАТІ АК-70**

Мета даного проекту полягає в дослідженні теплообмінного обладнання процесу виробництва гранульованого карбаміду на агрегаті АК-70. В результаті застосування пінч-методів отримана нова система теплообміну і представлена працездатна, економічно вигідна енерготехнологічна схема процесу виробництва. Були отримані і занесені в таблицю основні параметри теплообмінних апаратів. Результати даної роботи можна використовувати для економічного обґрунтування ефективного використання проекту реконструкції.

Ulyev L.M., Yatsenko O.A.

**ANALYSIS AND SELECT HEAT EXCHANGER EQUIPMENT FOR THE UREA PRODUCTION ON
THE UNIT AK-70**

The goal of this project is investigated the heat exchange process of production of granular urea on the unit AK-70. As a result of the pinch method we obtain a new heat exchange system and presented a workable, cost-effective power technology scheme of the production process. Have been received and tabulated the basic parameters of heat exchangers. The results of this work can be used for the feasibility study the effective use of the reconstruction project.

УДК 662.765

Билец Д.Ю.

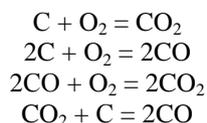
ИССЛЕДОВАНИЯ ПО УТИЛИЗАЦИИ ЖИДКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ПУТЕМ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ПИРОЛИЗА

Известно, что на настоящий момент запасов природного газа и нефти осталось на 60 и 40 лет соответственно. Кроме того, в связи с постоянно повышающимся подорожанием их добычи все большую роль в энергетике начинают играть процессы газификации твердых топлив с получением газообразных продуктов с последующим их сжиганием [1].

Газификация – преобразование органической части твёрдого или жидкого топлива в горючие газы при высокотемпературном нагреве с окислителем (кислород, воздух, водяной пар или, чаще, их смесь).

Преимуществом газификации в сравнении с прямым сжиганием топлив является образование гораздо меньших объёмов газов, подлежащих очистке. Кроме того, в результате более полного сгорания газообразного топлива образуется значительно меньшее количество вредных для окружающей среды химических соединений (как в дымовых газах, так и в зольном остатке).

Газификация топлив, несмотря на большое разнообразие способов (непрерывные и периодические, газификация в кипящем слое, газификация угольной пыли и жидкого топлива в факеле, при атмосферном и высоком давлении и др.[2]), характеризуется одними и теми же химическими реакциями [3]:



При газификации недожог топлива сравнении со сжиганием существенно ниже, т.к. происходит почти 100 % конверсия углерода при переходе его из твёрдого в газообразное состояние. При этом можно получить топливо заданного химического состава или заданной теплоты сгорания, так как эти показатели определяются выбранной схемой газификации, а также температурой, давлением и составом применяемых газифицирующих агентов [4].

В качестве сырья для газификации могут служить практически все материалы природного и техногенного происхождения, с содержанием углерода не менее 23 %, а влажностью и зольностью не более 50 % и 60 % соответственно [5].

К сожалению, в Украине это направление практически не развито. Сегодня небольшие фирмы производят так называемые пиролизные котлы с небольшой продуктивностью, основным сырьем для которых служат, как правило, дрова. В среднем такому твердотопливному котлу на отопительный сезон требуется порядка 100 складских метров (70 м³) древесины [6]. Учитывая, что в Украине за год продается 3–4 тысячи таких котлов, можно подсчитать, какие потери несут лесные массивы.

Вследствие энергетического кризиса в качестве энергоносителей в Украине используют любые органические отходы, которые могут давать хоть какое-то тепло. При этом абсолютно не учитывается состав газообразных продуктов горения, которые, как правило, являются токсичными. Особенно это касается продуктов коксохимического производства (таких как полимеры бензольного отделения, фракции масел и т.д.). При сжигании этих продуктов образуется большое количество канцерогенных веществ, в том числе бенз(а)пирен.

На территории промышленно развитых регионов Украины появились небольшие фирмы которые занимаются переработкой пластика, в основном – пет-бутылок, шприцов и т.д. Переработка основана на пиролизе полимерного материала. При этом образуется приблизительно 20–30 % жидких продуктов пиролиза, которые впоследствии используются в качестве компонентов энергетических топлив при прямом сжигании в разных котельных, что наносит огромных вред окружающей среде и здоровью людей.

Еще одним источником органических отходов является автомобильный, железнодорожный, авиационный и водный транспорт, при эксплуатации которого образуется более 500 тыс. т. отработанного масла в год [7]. Из-за отсутствия промышленных установок по регенерации и переработке отработанных моторных масел способы их утилизации сводятся к тому, что данные отходы либо сливают в почву, либо сжигают в кустарных печах.

Для исследования возможности реализации процесса утилизации жидких органических отходов в смеси с твердым носителем с получением генераторного газа была создана установка, которая представлена на рис. 1.

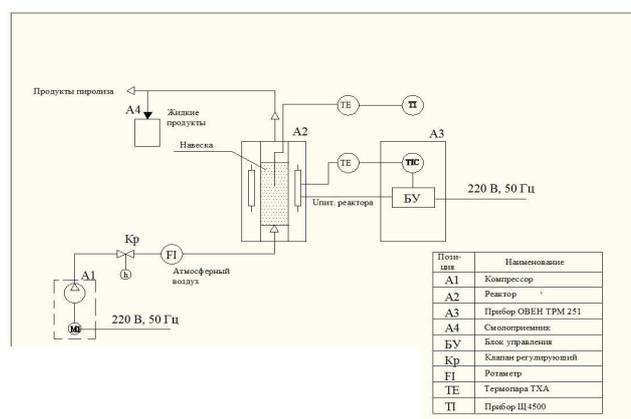


Рисунок 1 – Функциональная схема установки для пиролиза

В реактор А2, предварительно нагретый до заданной температуры с помощью прибора А3, вводится навеска в соотношении Т:Ж по массе 9:1. Снизу подается окислитель, в нашем случае – воздух, компрессором А1, расход которого составляет от 0,5 до 2 л/мин. Навеску выдерживают 40 мин. Образующиеся продукты реакции из реактора попадают в холодильник. Жидкие продукты конденсируются и остаются в смолуприемнике А4, газообразные сгорают в факеле.

В течение опыта фиксируются по времени такие показатели как:

- температура реактора;
- температура внутри навески;
- расход воздуха.

По окончании опыта, прекращается подача воздуха, достается остаток, который после охлаждения взвешивается.

Объектами для исследования были взяты:

- 1) твердое сырье – скорлупа грецкого ореха, бурый уголь Александрийского месторождения, газовый уголь (табл. 1);
- 2) жидкое сырье – отработанное моторное масло, полимеры бензолного отделения Авдеевского КХЗ, печное топливо на основе продуктов КХП.

Выбор твердого носителя был обоснован тем, что первые два обладают высокой пористостью и в смеси с жидкостью не теряют сыпучести, а кроме того термическая деструкция их начинается при низких температурах, сопоставимых с началом деструкции жидких отходов.

Таблица 1 – Свойства твердого сырья

Наименование проб	Технический анализ, %				Элементный состав, %				Высшая теплота сгорания, МДж/кг ккал/кг	Низшая теплота сгорания, МДж/кг ккал/кг
	W_t^r	A^d	S_t^d	V^{dal}	C^{dal}	H^{dal}	N^{dal}	O_d^{dal}	Q_s^{dal}	Q_i^r
Бурый уголь	9,3	8,9	4,44	61,0	68,99	5,70	0,59	20,28	$\frac{28,15}{6724}$	$\frac{22,00}{5255}$
Скорлупа ореха	7,6	2,3	0,09	79,9	52,52	5,98	0,19	41,22	$\frac{20,99}{5013}$	$\frac{17,57}{4197}$

Процесс окислительного пиролиза для скорлупы проводился при начальной температуре 400 °С, при этом совместная переработка жидких углеводородов с твердым органическим сырьем приводила к повышению температуры в реакторе на 100–300 °С, что свидетельствует о существенной активации процесса. Происходила полная конверсия органической части в газовую и паровую фазы.

В состав газовой фазы входила, в основном, окись углерода в количестве от 40 до 60 % об, в зависимости от расхода воздуха, и небольшое количество CO₂, которое составило 1,5–2 % об. Паровая фаза представляла собой смесь различных углеводородов и паров воды.

В опытах с бурым углем оптимальной температурой процесса являлась 500 °С. При внесении жидких добавок наблюдалось повышение температуры в реакторе на 100–200 °С, при этом получались примерно такие же результаты по составу газовой фазы и полной конверсии органической части.

Вывод. Работа направлена на решение актуальной проблемы утилизации жидких органических отходов с получением энергоносителей. Окислительный низкотемпературный пиролиз твердого топлива с нанесенным на его поверхность жидких отходов позволяет получить газообразное топливо с высоким содержанием СО.

Данная технология позволит обеспечить экономический эффект при использовании дешевого сырья для получения ценных продуктов, а также технология позволяет утилизировать любые тяжелые вязкие органические отходы с получением энергетически ценных компонентов.

Литература

1. Chris Higman, Maarten van der Burgt. Gasification. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2010. – 391.
2. Альтшулер В.С. Газовые процессы. Получение энергетических и технологических газов, Изд. «Наука», М.: 1967. – 167 с.
3. Канторович Б.В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива. Металургиздат. М.: 1961. – 355 с.
4. Зубилин И.Г., Рудыка В.И. Получение синтез-газов для производства экологически чистых моторных топлив: теория и технология. – Харьков: Издат. центр Харьков. нац. университета. 2002. – 313 с.
5. Копытов В.В. Газификация конденсированных топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития. М.: Агрорус, 2012. – 509 с.
6. Официальный сайт ОАО «Мотор Сич» <http://kotly.org.ua/priceFull.php>
7. Григоров А.Б., Наглюк И.С. Рациональное использование моторных масел. Харьков: Изд. «Точка», 2013. – 178 с.

Bibliography (transliterated)

1. Chris Higman, Maarten van der Burgt. Gasification. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2010. – 391.
2. Altshuler V.S. Gazovyye protsessyy. Poluchenie energeticheskikh i tehnologicheskikh gazov, Izd. «Nauka», M.: 1967. – 167 p.
3. Kantorovich B.V. Vvedenie v teoriyu goreniya i gazifikatsii tverdogo topliva. Metalurgizdat. M.: 1961. – 355 p.
4. Zubilin I.G., Rudyka V.I. Poluchenie sintez-gazov dlya proizvodstva ekologicheskhi chistyih motornyih topliv: teoriya i tehnologiya. – Harkov: Izdat. tsentr Harkov. nats. universiteta. 2002. – 313 p.
5. Kopytov V.V. Gazifikatsiya kondensirovannyih topliv: retrospektivnyiy obzor, sovremennoe sostoyanie del i perspektivy razvitiya. M.: Agrorus, 2012. – 509 p.
6. Ofitsialnyiy sayt ОАО «Motor Sich» <http://kotly.org.ua/priceFull.php>
7. Grigorov A.B., Naglyuk I.S. Ratsionalnoe ispolzovanie motornyih masel. Harkov: Izd. «Tochka», 2013. – 178 p.

УДК 662.765

Білець Д.Ю.

**ДОСЛІДЖЕННЯ З УТИЛІЗАЦІЇ РІДКИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ
ШЛЯХОМ ОКИСЛЮВАЛЬНОГО ПІРОЛІЗУ**

Розглянуті проблеми утворення та накопичення рідких органічних відходів в Україні та методи їх утилізації. Запропоновано новий метод їх переробки шляхом окислювального низькотемпературного піролізу в корисні енергоносії. Розроблена стендова установка для його реалізації.

Bilets D.

STUDY OF THE UTILIZATION OF WASTE LIQUID OXIDATIVE BY PYROLYSIS

The problems of formation and accumulation of liquid organic waste in Ukraine and methods of disposal. A new method of processing by low-temperature oxidative pyrolysis into useful energy. A stand installation for its implementation.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

Конвективный теплообмен, возникающий в порах материала, преобладает над элементарными составляющими теплообмена в пористых материалах. Поэтому теоретический анализ конвективного теплопереноса представляет собой актуальную задачу, которая сводится к разработке методики количественной оценки конвективного теплопереноса в порах гетерогенных систем.

Традиционно методика оценки характера передачи тепла в замкнутом объеме основана на расчетных числах Грасгофа (Gr) и Прандтля (Pr) для конкретной среды.

Соотношение этих чисел в заданном диапазоне величин дает возможность установить наличие конвективных токов у нагретой поверхности. О точности такой оценки можно судить лишь по изменению интенсивности передачи тепла при изменении условий теплоподвода. Такая качественная характеристика процесса теплопереноса на наш взгляд не отражает реальных физических процессов, происходящих в замкнутых пространствах. Интенсивность гравитационных конвективных течений определяется не только теплофизическими характеристиками контактирующих сред, масштабными факторами, но и ориентацией греющей поверхности в пространстве [1]. Тепло передается от поверхности в пристеночных областях, толщина которых достаточно мала. Если взять ее в качестве масштабного фактора для уравнения Грасгофа, то число Gr не будет превышать критического значения, соответствующего теплопередаче теплопроводностью. Но при нагреве пространства через боковые поверхности конвективные течения присутствуют всегда [2]. И вопрос о том, какой вклад они вносят в теплопередачу остается актуальным.

Симуляцию процесса переноса тепла конвекцией выполняли с использованием прикладного программного пакета Flow Vision. В качестве переменных величин выбирали размеры замкнутой ячейки и температуры поверхности газа. Для численного решения уравнений Навье-Стокса и неразрывности, описывающих конвективные течения использована консервативная схема расчета нестационарных уравнений в частных производных. Решение приведено на рис. 1.

На рисунке видно, что вдоль стенок формируются слои с относительно высокой скоростью течения. Изолинии в центре стремятся к горизонтальному положению. Такое распределение потоков оказалось характерным для всех расчетных случаев. При больших числах Gr формируется течение газа от нагретой поверхности. Именно для этих случаев в литературе приведены критические числа Gr, которые формализуют процесс теплопередачи в замкнутой области. Но конвективный перенос тепла может происходить и вдоль поверхности, при этом в центре полости движение отсутствует. Такой случай в литературе рассматривается как передача тепла теплопроводностью. Очевидно, что перенос энергии в граничном слое может быть весомым.

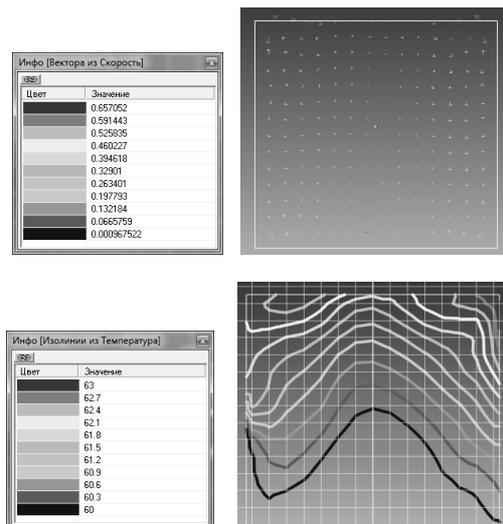


Рисунок 1 – Распределение скоростей и температур

Для оценки интенсивности пограничного переноса тепла разработана математическая модель, связывающая температуру поверхности со скоростью конвективного течения.

Математическая модель гравитационной конвекции включает уравнения:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \nabla^2 V + [1 - \beta(T - T_0)] g ; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot V = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T = a \nabla^2 T , \quad (3)$$

где $\nu = \eta/\rho_0$ – коэффициент кинематической вязкости; $a = \lambda / c\rho_0$ – коэффициент температуропроводности, значения которых соответствуют табличным для $T=T_0$.

Неизвестные функции: V – вектор скорости, p – давление, T – абсолютная температура газа, ρ – плотность, η – динамическая вязкость, λ – теплопроводность, t – время, g – ускорение свободного падения.

Для упрощения используем приближение Буссинеска-Обербека.

T_0 – некоторое значение из интервала изменения температуры в среде, при котором плотность имеет величину $\rho = \rho_0 = \rho(T_0)$. Предположим, что температура T в среде мало отклоняется от T_0 . Тогда уравнение состояния можно линеаризовать, оставляя лишь член 1-го порядка малости в разложении функции $\rho(T)$ в ряд Тейлора в окрестности значения T_0 :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)], \quad (4)$$

где $\beta = -\frac{1}{\rho_0} \partial \rho(T_0) / \partial T$ – коэффициент теплового расширения газа при $T=T_0$.

Зависимость плотности от температуры учитывается лишь в члене с объемной силой тяжести ρg , а в остальных случаях полагают $\rho = \rho_0$. При таких допущениях задача примет вид:

Найдем решение граничной задачи

$$\lambda \left. \frac{\partial T(r, \theta)}{\partial r} + \alpha T(r, \theta) \right|_{r=R} = f(\theta) \quad (5)$$

для дифференциального уравнения в частных производных

$$V \frac{\partial T(r, \theta)}{\partial r} = a \cdot \Delta T(r, \theta); \quad (6)$$

здесь

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + ct\theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right]; \quad (7)$$

тогда:

$$\frac{\partial^2 T(r, \theta)}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r} - \frac{V}{a} \right) \frac{\partial T(r, \theta)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial^2 T(r, \theta)}{\partial \theta^2} + ct\theta \frac{\partial T(r, \theta)}{\partial \theta} \right]. \quad (8)$$

Приближенное решение задачи для уравнения (6) принимает вид:

$$T(r, \theta) \approx R \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{V}{a} (R-r) \right] \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^n P_n(\cos \theta)}{\lambda \cdot \left(\frac{1}{2} \frac{V}{a} R + n \right) + \alpha \cdot R}. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) показано на графике рис. 2.

$T, ^\circ\text{C}$

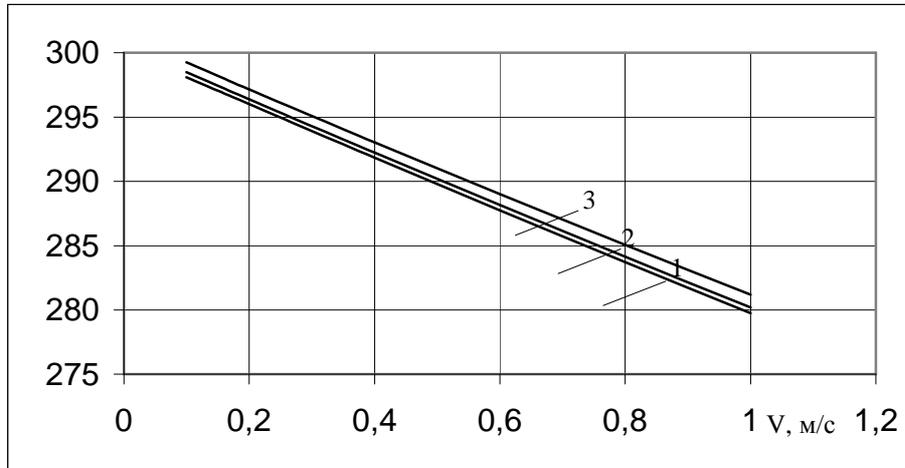


Рисунок 2 – Решение уравнения (9)
1 – радиус поры $r = 2,5$ мм; 2 - радиус поры $r = 4,5$ мм; 3 - радиус поры $r = 7,5$ мм

Для вертикальной греющей стенки расчетные значения числа $Nu = f(Gr, Pr)$ приведены на рис. 3.

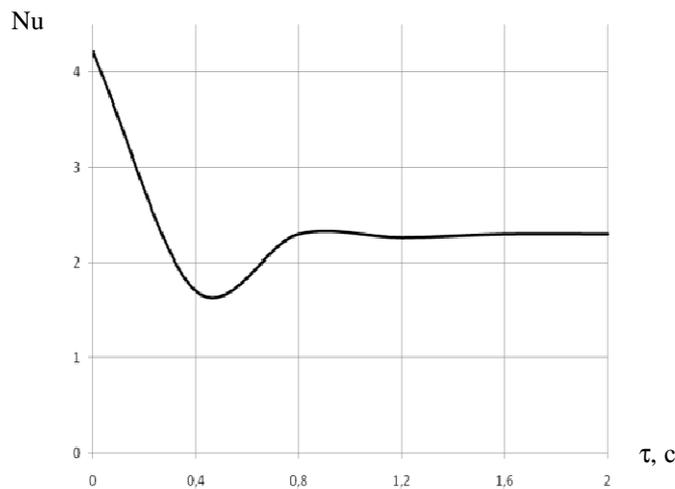


Рисунок 3 – Изменение числа Nu во времени для условий рисунка 1

Выводы

Выполненные расчеты подтверждают наличие конвективных течений на греющей поверхности в замкнутых объемах газа с любыми геометрическими и энергетическими характеристиками.

По расчетным данным можно определить основные этапы теплопередачи и установить их границы. На графике рисунка 3 в интервале времени $\tau = 0 - 0,4$ можно наблюдать релаксационный период теплообмена газа (воздуха) с поверхностью. Если бы конвективный перенос тепла отсутствовал, значение числа Nu приближалось бы к 1, т.е. тепловой поток, передаваемый конвекцией был бы равен тепловому потоку теплопроводностью. Минимальное значение числа Nu на графике соответствует началу конвективного переноса.

Таким образом, приведенные математическая модель и результаты расчетов дают возможность заполнить количественный анализ конвективного теплопереноса в зависимости от температуры греющей поверхности в замкнутом объеме.

Литература

1. Pavlenko A.M. Thermal conductivity of the gas in small space / Pavlenko A.M., Koshlak A.V. // Metallurgical and Mining Industry, №3, 2014. P. 15–20.
2. Koshlak A.V. Heat exchange in a confined space / Problem of energy saving and nature use 2013 / Budapest, 2014. – С. 90–94.

УДК 621

Братута Э.Г., Кошлак А.В.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

Робота присвячена дослідженню особливостей теплопровідності пористих матеріалів з мікропорами. Визначено закономірності впливу температури поверхні на процес передачі тепла конвекцією в порах. Запропоновано математичну модель гравітаційної конвекції, яка дає можливість прогнозувати інтенсивність конвективної течії.

Bratuta E.G., Koshlak A.V.

FEATURES OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF THE POROUS MATERIAL

The work is devoted to peculiarities of the thermal conductivity of porous materials with micropores. The regularities of the influence of temperature on the surface of the heating process of heat transfer by convection in the pores. A mathematical model of the gravitational convection, which makes it possible to predict the intensity of the convective flow.

Илюнин О.О., Перевертайленко А.Ю., Селяков А.М., Шамраев А.А.

НЕЧЕТКАЯ ПРОЦЕДУРА ОЦЕНИВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ СУЛЬФАТА ЖЕЛЕЗА В ТРАВИЛЬНЫХ РАСТВОРАХ

Введение. Устойчивость тепловых химических систем, таких как непрерывные травильные агрегаты (НТА), ограничивается предельно допустимыми концентрациями (ПДК) определенных соединений, которые образуются во время выполнения технологического процесса (ТП). Одной из прогрессивных тенденций в сернокислотном травлении является подогрев травильного раствора в выносных теплообменных аппаратах (ТА). Со временем в растворе образуется моногидрат сульфата железа $FeSO_4 \cdot H_2O$, который в случае превышения ПДК при определенных концентрации травильного раствора – с и температуре – t , выделяется на стенках травильных ванн и поверхностях теплообмена. Это существенно снижает эффективность ТП вплоть до остановки, ведет к сверхнормативным затратам тепловой энергии, электроэнергии на транспортировку раствора к ТА. Появление отложений различного характера ухудшает теплопередачу, увеличивает расходы на перекачивание рабочих сред через аппарат, требует дополнительных затрат на очистку травильных ванн и теплообменников, что особенно убыточно для ТП в целом. Поэтому задача оперативного контроля ПДК солей в травильных растворах является актуальной и имеет практическую ценность.

Анализ состояния проблемы. Исследователями достигнут большой прогресс в изучении процессов кристаллизации солей в растворах. Однако многочисленные математические модели зачастую не позволяют с достаточной точностью предсказать развитие процесса. Классические модели рассматривают появление и рост депозита солевой кристаллизации как функцию концентрации солей, умноженную на функцию температурной зависимости Аррениуса. Как правило, в протекании процесса теплообмена кристаллическое загрязнение имеет комбинированную природу – диффузионную и химическую. В зависимости от условий протекания ТП образование кристаллов солей в растворах может иметь диффузионную природу, быть химической реакцией или комбинированной.

Иногда модели включают дополнительные коэффициенты, учитывающие нарастание отложений с увеличением количества центров кристаллообразования отложений [1]. Основным недостатком этих моделей является отсутствие в каждом конкретном случае какой-либо информации о входящих в соотношения значениях постоянных величин.

В большинстве практических приложений для измерения ПДК солей в травильных растворах в настоящее время используют либо химическое титрование прямой пробы, либо методы неразрушающего контроля (НК). Электрический метод НК, обладающий высокой чувствительностью, безинерционностью и относительной простотой приборной реализации, является одним из наиболее информативных. Широкие возможности для оперативного контроля концентрации электролитов в растворах (каковыми является раствор сульфата железа в серной кислоте) открывает использование метода прямой кондуктометрии.

Сущность метода состоит в том, что электролиты в растворе диссоциируют на ионы, концентрация которых определяет его электропроводность. Учитывая линейный характер зависимости удельной электропроводности растворов от концентрации электролитов, производителями рекомендуется для практического использования ряд экспресс-методов, основанных на данном электрохимическом эффекте, разработаны высокопроизводительные анализаторы. Тем не менее они имеют ряд недостатков. Например, прибор измерения концентраций компонент жидкости компании ENCE GmbH [2] создавался для измерений в среде соляной кислоты, являющейся достаточно стабильной трехкомпонентной системой. Ультразвуковой онлайн анализатор предназначен для измерения концентрации и плотности жидкостей. Принцип работы анализатора – измерение прибором скорости звука и сравнение его значения с данными калибровочной кривой зависимости скорости звука в жидкой среде от концентрации.

Использование ионоселективных электродов типа «Эком-SO₄» [3], кондуктометров типа КП-202 (РБ, «Антех»), «Метран» дают возможность измерить общий рН в температурном диапазоне раствора 5–80 °С, но не позволяют определить концентрацию отдельных компонент в агрессивной сернокислой среде.

Постановка задачи и цель работы. Целью настоящей работы является разработка методики нечеткого оценивания концентрации $FeSO_4$ в травильном растворе для повышения эффективности работы НТА. Реализация такой методики в виде бюджетной микроконтроллерной системы позволит повысить эффективность ТП.

В данном случае альтернативой существующим приборам может служить комбинированный метод компании «SensoTech» [4]. Измерение параметров производится в следующей комбинации: скорость звука, плотность / или проводимость / или рефракционный показатель преломления травильного раствора. LiquiSonic-система обрабатывает сигналы, характеризующие физические свойства различной природы многокомпонентной смеси, отличается низкими эксплуатационными расходами и долговечностью. Такой метод не требует дорогостоящих оборудования, реактивов, электродов из благородных металлов.

Примененный принцип основан на измерении изменений физических свойств растворов, вызываемых изменением концентрации отдельных компонентов. Данные зависимости в виде расчетных моделей помещаются в память контроллера с целью дальнейшей конвертации измеренных физических свойств в базу данных о концентрации. Данные о концентрации доступны пользователю. Конкурентное измерение двух физических отклонений (скорости звука в комбинации с другим параметром) дают возможность определения двух концентраций в одно и то же время.

Применение анализаторов такого типа может заметно снизить расходы на химические реактивы и эксплуатационные расходы. В нашем случае (воздействие серной кислоты на оксиды железа) возможно появление под действием ультразвука большего, до в 1000 раз по сравнению с процессом без «озвучивания», количества зародышей кристаллов [5]. Применение ультразвуковых сенсоров может привести к непрогнозируемому образованию n-гидратов $FeSO_4$, излишнее присутствие которых в растворах травильных ванн НТА ускоряет процесс старения раствора, снижает его качество, и, тем самым уменьшает эффективность ТП, нарушает его регламент и режим. Применение ультразвуковых сенсоров в данном случае нежелательно в связи отсутствием экспериментальных данных об их побочном влиянии на ТП.

Нечеткая процедура оценивания. Дополнительную сложность создает то, что $FeSO_4$, в травильном растворе присутствует в виде трех соединений [6], в зависимости от температуры образования – t_f (таблица 1):

Таблица 1 – Характеристики n-гидратов сульфата железа

Формула	Цвет кристалла	$t_f, ^\circ C$
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Светло-зеленый	-20
$FeSO_4 \cdot 4H_2O$	Зеленый	21
$FeSO_4 \cdot H_2O$	Белый	80

На эффективность работы НТА, при прочих постоянных значениях температуры – t и скорости прокачиваемых сред – q влияет изменение концентрации $FeSO_4$ в растворе – Δc . Эти изменения, оцениваемые с помощью нечетких интервалов, являются влиятельным возмущающим фактором неопределенности для ТП.

Данный динамический процесс можно охарактеризовать временной монотонной функцией $C_{FeSO_4}(t)$, неубывающей на отрезке $(0; t_0)$ и ограниченной сверху величиной $\sup(c(t))=c$.

При достижении соединением в растворе ПДК $C_{FeSO_4}(t_0) = c$ система перестает функционировать или становится неэффективной [7]. Управляющее воздействие при таких входных параметрах – освежение раствора (рис. 1) – часть его подается из травильных ванн на регенерацию с замещением свежим раствором до достижения регламентированного $C_{FeSO_4}(t_0) = c_0$.

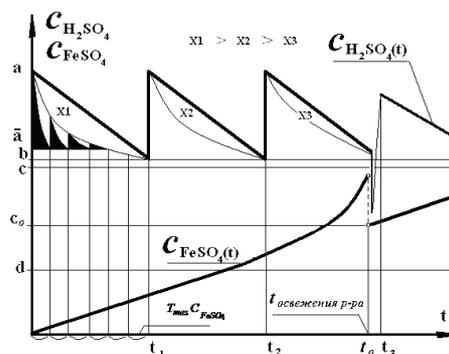


Рисунок 1 – Освежение травильного раствора

Травильный раствор, являясь электролитом, в связи с накоплением ионов п-гидратов $FeSO_4$ в оборотном цикле, изменяет сопротивление со временем, что можно представить монотонной функцией $\Delta R(t)$. Эти изменения, оцениваемые с помощью нечетких интервалов, являются значимым возмущающим фактором неопределенности.

В связи с невозможностью точных оперативных измерений концентрации солевых соединений $c(t)$ в травильном растворе НТА, предложен проекционный подход нечеткой оценки этих значений в виде лингвистической переменной, которая задается набором из 3-х компонент:

$$\langle Id, X, R(Y, x) \rangle, \quad (1)$$

где Id – имя признака < концентрация >, X – множество допустимых значений признака, $R(X, y)$ – нечеткое множество, определенное на множестве X и представляющее собой нечеткое ограничение на числовую оценку значения признака x , обусловленное интервальной оценкой Y < значение измеряемого параметра в серии из m измерений >.

Суть предлагаемой методики состоит в следующем. В НТА, согласно патенту [8], в циркуляционной ветви «травильная ванна – фильтр с автоматической промывкой – ТА» фильтр оснащается автоматизированным мультиметром с каналом передачи данных (USB, RS-232), измеряющим изменение сопротивления ΔR на фильтре, электрически изолированном от всей НТА.

С периодом $T_{mes} C_{FeSO_4}$ (около 2 ч) производятся замеры сопротивления, автоматически включается чистовая промывка фильтра обратным ходом и взвесь из фильтра подается в отстойник-анализатор, просушивается и с помощью оптического микроскопа Neofot-21 или МБС-9 и цифрового фотоаппарата типа Olimpus C-370 формируются графические файлы JPG и BMP. Далее файлы обрабатываются в системе компьютерного распознавания изображений. Изначально система, разработанная специалистами ХНУРЭ, предназначалась для идентификации состава клинкер-цемента. Также в качестве экспресс-методов возможно использование рефракционного анализа, ультразвуковой локации, весового анализа зольности сухого остатка и т.д. В данной работе предложен метод оптической селективной сегментирующей цветовой идентификации, приведенный в [9].

Система распознавания изображений п-гидратов сульфата железа по площади и цвету предназначена (см. рис. 2) для автоматического анализа изображений, классификации каждого пикселя изображения на 4 объекта ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$, $FeSO_4 \cdot 4H_2O$, $FeSO_4 \cdot H_2O$, раствор-фон) и автоматического расчета: объемной доли объектов анализа в %, массовой доли объектов анализа в %, поверхности на единицу объема, cm^2/cm^3 .

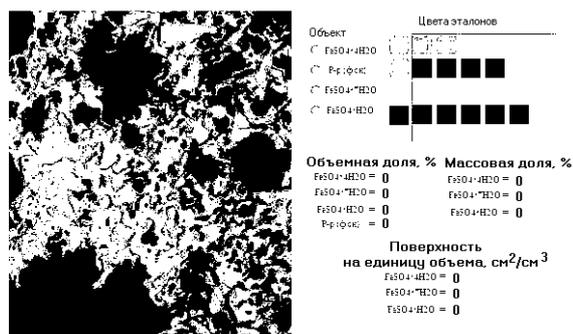


Рисунок 2 – Форма представления результатов анализа системы

Каждому из m измерений серии (снимку, что эквивалентно состоянию НТА с наличием определенных количеств гидратов железа) соответствует определенная количественная оценка ΔV наличия k -того гидрата: площадь определенного цвета (см.табл.1) подсчитывается по пикселям с учетом $V_k(RGB)$ – числа кода цвета:

$$\Delta V_k = S_k \times V_k(RGB). \quad (2)$$

Система может последовательно анализировать до 256 изображений, запоминать их в отдельной таблице и представлять накопленные данные (если их более 5) в форме графиков дисперсии, является обучающейся системой эталонов цветов

Одновременно в ТП производится тестовое титрование для замера $C_{FeSO_4}(t_i)$ эталонными приборами, и, оперативные измерения $\Delta R(t_i)$.

На основе набранных статистик строятся классификаторы и лингвистические функции принадлежности $\pi(\Delta R(t))$ и $\pi(\Delta V_k(t))$.

Функция $\pi(x)$ устанавливает нечеткую меру соответствия значений фактически измеряемых величин $(\Delta R, \Delta V)$ – значениям параметров $c(t)$, подлежащих оперативному контролю и управлению (частичное освежение или сброс травильного раствора на регенерацию с полной заменой, переключение на резервный ПТА и регламентная очистка рабочего ПТА). Оцениваются они в виде:

$$c(t) = \pi(\Delta R(t)) \cdot \sup(c(t)), \quad (3)$$

и

$$c(t) = \pi(\Delta V_k(t)) \cdot \sup(c_k(t)). \quad (4)$$

Фазификация состояний НТА, выраженных изменением концентрации солевых соединений в травильном растворе, решена путем построения нечетких LR-интервалов, вырожденных до стандартных S-функций принадлежности с областью значения на интервале [0,1]. Состояния нечетко описаны с помощью функции возможности $\pi_n(z_m)$ с областью значений на интервале [0,1], определяющей степень возможности отнесения состояния НТА к n-му классу по значению признака $z_m = \Delta Y$ (в зависимости от технической реализации в качестве значения ΔY выступает, либо ΔV , либо ΔR) в сформированном классификаторе состояний НТА. Функция $\pi_n(z_m)$ определяет степень соответствия (возможности отнесения) m-го значения измерения z_m , лежащего в нечетком LR-интервале $\Delta Y_m = [Y_m - y_m; Y_m + y_m]$ к n-му классу по значению признака, характеризующего закономерности количественного проявления изменений состояния НТА.

Выводы. Данная процедура позволяет при известных характеристиках травильного раствора нечетко определять концентрацию гидратов железа по изменению электрической проводимости объекта «фильтр–рабочая среда». Метод оптической селективной сегментирующей цветовой идентификации сложен в реализации, но более чувствителен к различимости состояний НТА по сравнению с потенциометрическим измерением изменения сопротивления. Конкурентное измерение двух отклонений системы различной физической природы (электрического сопротивления в комбинации с другим, например – изменением удельной площади продуктов реакции) дают возможность более точного определения концентраций двух веществ в одно и то же время. Полученные зависимости при фиксации временных значений (наработке экспериментальной базы измерений) можно использовать для дальнейшей конвертации измеренных физических свойств в данные о концентрации раствора, оценки эффективности, устойчивости и надежности НТА. Получаемые адаптивные расчетные модели можно реализовать в виде микроконтроллера с целью повышения степени автоматизации измерений ТП.

Литература

1. Bansal, B. Analysis of “classical” deposition rate low for crystallization fouling / B. Bansal, X.D. Cheng, H. Muller-Steinhagen // Chemical Engineering and Processing.– 2008 .– Vol. 47.– P. 1201–1210.
2. <http://www.ence.ch/rus/picking_fluid_analyzer>.
3. Шведене Н.В. Ионоселективные электроды // Соросовский Образовательный Журнал. 1999. №5. С. 60–65.
4. <<http://www.sensotech.com>>.
5. <<http://beznakipi.com/akustik-t>>.
6. Ледков В.Г. Непрерывные травильные линии.– М:Металлургиздат, 1961, 158 с.
7. Капустенко П.О. До питання автоматизації процесу безперервного травлення листової вуглецевої сталі за умов невизначеності / П.О. Капустенко, О.О. Ілюнін, О.Ю. Перевертайленко, Самер Лага // Міжвузівський збірник «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво», Луцьк, 2011, вип. 5, С. 100–107.

8. Арсеньєва О.П., Ілюнін О.О., Перевертайленко О.Ю., Подпружников П.М., Селяков О.М., Тимофєєв В.О. Патент України на винахід № 104710 «Пристрій для безперервного травлення прокату листової вуглецевої сталі», опублік.25.02.2014, бюл. №4 – 5 с.

9. Ілюнін О.О. Идентификация несистемных дефектов в непрерывном технологическом процессе травления стального проката (статья) Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2013. – №1(46). –С. 394–396.

Bibliography (transliterated)

1. Bansal, B. Analysis of “classical” deposition rate low for crystallization fouling / B. Bansal, X.D. Cheng, H. Muller-Steinhagen // Chemical Engineering and Processing.– 2008 .– Vol. 47.– P. 1201–1210.

2. <http://www.ence.ch/rus/picking_fluid_analyzer>.

3. Shvedene N.V. Ionoselektivnyie elektrodyi. Sorosovskiy Obrazovatelnyiy Zhurnal. 1999. #5. P. 60–65.

4. < <http://www.sensotech.com> >.

5. < <http://beznakipi.com/akustik-t> >.

6. Ledkov V.G. Nepreryivnyie travilnyie linii.– M:Metallurgizdat, 1961, 158 p.

7. Kapustenko P.O. Do pitannya avtomatizatsiyi protsesu bezperernogo travlennya listovoyi vugletsevoyi stalli za umov neviznachenosti. P.O. Kapustenko, O.O. Ilyunin, O.Yu. Perevertaylenko, Samer Laga. Mizhvuzivskiy zbirnik «Komp`yuterno-integrovani tehnologiyi: osvita, nauka, virobnitstvo», Lutsk, 2011, vip. 5, P. 100–107.

8. Arseneva O.P., Ilyunin O.O., Perevertaylenko O.Yu., Podpruzhnikov P.M., Selyakov O.M., Timofeev V.O. Patent Ukrayini na vinahid # 104710 «Pristriy dlya bezperernogo travlennya prokату listovoyi vugletsevoyi stali», opublik.25.02.2014, byul. #4–5 p.

9. Ilyunin O.O. Identifikatsiya nesistemnyih defektov v nepreryivnom tehnologicheskom protsesse travleniya stalnogo prokату (stattiya) Visnik Hersonskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu. – 2013. – #1(46). –P. 394–396.

УДК 621.565.954

Ілюнін О.О., Перевертайленко О.Ю., Селяков О.М., Шамраєв А.А.

**НЕЧІТКА ПРОЦЕДУРА ОЦІНЮВАННЯ ГРАНИЧНОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ СУЛЬФАТА ЗАЛІЗА
У ТРАВІЛЬНИХ РОЗЧИНАХ**

Запропоновано методику визначення концентрації гідратів сульфату заліза у травільному розчині. Отримані залежності можна використати для формування інформації щодо концентрації розчину, оцінити ефективність та надійність технологічної лінії безперервного травління.

Ilyunin O.O., Perevertaylenko O.Yu., Selyakov O.M., Shamraev A.A.

**FUZZY PROCEDURE OF FERROUS SULFATE ULTIMATE PERMISSIBLE CONCENTRATION IN
PICKLING LIQUOR**

The methods of ferrous sulfate concentration definition in pickling liquor are proposed. The obtained correlations may be used to clarify the data that characterize the condition of liquor, to estimate the effectiveness and reliability of continuous pickling line duty.

УДК: 662.612.3:504

Братуга Э.Г., Сизоненко А.В.

ПРОИЗВОДСТВО ТОПЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Введение. Эмульгированные гомогенные жидкости (ЭГМ) используются во многих технологических процессах в различных отраслях промышленности. Поэтому и методики аппаратного исполнения технологий гомогенизации достаточно хорошо исследованы. Если к структуре данных составов предъявляются более строгие требования по дисперсности и устойчивости, то как правило прибегают к математическому моделированию основных рабочих процессов с целью последующей оптимизации конструкции аппаратов. Примером ЭГМ могут быть гомогенизированные мазуты. Формирование заданной структуры может происходить в вихревом аппарате, который устанавливается непосредственно перед сжигательными устройствами. Разогретый мазут поступает в вихревую смесительную камеру, туда же подается насыщенный водяной пар. В вихревом слое на начальной стадии контакта формируются две среды – сплошная (мазут) и паровые трубки, которые в процессе движения конденсируются и дробятся.

Цель работы – разработать методику количественной оценки гидродинамических характеристик вихревого гомогенизатора.

Материалы и результаты исследований. В [1] анализируются параметры вихревого аппарата с целью определения их оптимального соотношения. В основу исследований следует заложить модель течения жидкости в вихревой камере, предложенную в работе [1].

В работе [2] установлено существование наиболее выгодного для потока в камере закручивания отношения r_c/R_k (r_c – радиус сопла). Наличие экстремума на графике зависимости угла факела от геометрической характеристики, если последнюю изменять посредством увеличения R_k , было отмечено в работе [3].

Поиск оптимальных размеров камеры закручивания являлся одной из важных задач экспериментальных исследований аэродинамики вихревого испарителя.

В работе [4] автор считает, что по уровню гидравлического сопротивления не приемлемы камеры с $r_c/R_k < 0.33$, а по уровню относительных скоростей и крутке потока не приемлемы камеры с $r_c/R_k > 0.6$. Оптимальное значение r_c/R_k лежит в пределах 0.35...0.5. Исследования аэродинамического сопротивления камер в диапазоне $r_c/R_k=0.2...1$ показали, что минимальные потери достигаются в камере открытого типа с $r_c/R_k=0.8...1$. Анализ опубликованных работ показал, что до настоящего времени вопрос об оптимальном r_c/R_k для камер закручивания остается открытым. Анализ формул для k и газодинамической характеристики камеры показывает, что при увеличении R_k имеет место рост Ar – гидродинамическая характеристика устройства, а затем его уменьшение вследствие снижения k .

Таким образом при реализуемом k имеет место только одно значение r_c/R_k с максимальным значением Ar (рисунок 1). С целью определения зависимости (r_c/R_k) от k исследуем на экстремум соотношение для газодинамической характеристики гомогенизатора [1], переписанное так:

$$Ar = \frac{\pi r_c^2}{f_k} \eta \left(\frac{r_c}{R_k} \right)^{1-0.961g} \left[\frac{Q}{2\pi H v R_k^2} \frac{f_k}{R_k} \right] \quad (1)$$

с условием $dAr/dR_k=0$.

$$\ln Ar = \ln \frac{\pi r_c^2}{f_k} \eta \left(1 - 0.961g \frac{Q}{2\pi H v R_k^2} \frac{f_k}{R_k} \right) \ln \frac{r_c}{R_k}$$

$$\frac{1}{Ar} \frac{dAr}{dR_k} = dT \frac{\pi r_c^2}{f_k} \eta \left(\frac{1.92}{R_k} \right) \ln \frac{r_c}{R_k} + \ln \frac{\pi r_c^2}{f_k} \eta \left(1 - 0.961g \frac{Q}{2\pi H v R_k^2} \frac{f_k}{R_k} \right) \left(- \frac{1}{R_k} \right). \quad (2)$$

Решая уравнение (2), получим трансцендентное уравнение, из которого можно определить соотношение (r_c/R_k):

$$\frac{1}{R_k} \left[1,92 \ln \left(\frac{\pi r_c^2}{f_k} \right) \ln \frac{r_c}{R_k} - \left(1 - 0,961g \frac{Q}{2\pi H v} \frac{f_k}{R_k^2} \right) \ln \left(\frac{\pi r_c^2 \eta}{f_k} \right) \right] = 0. \quad (3)$$

Решение уравнений (1) и (3) представлены на рисунке 1.

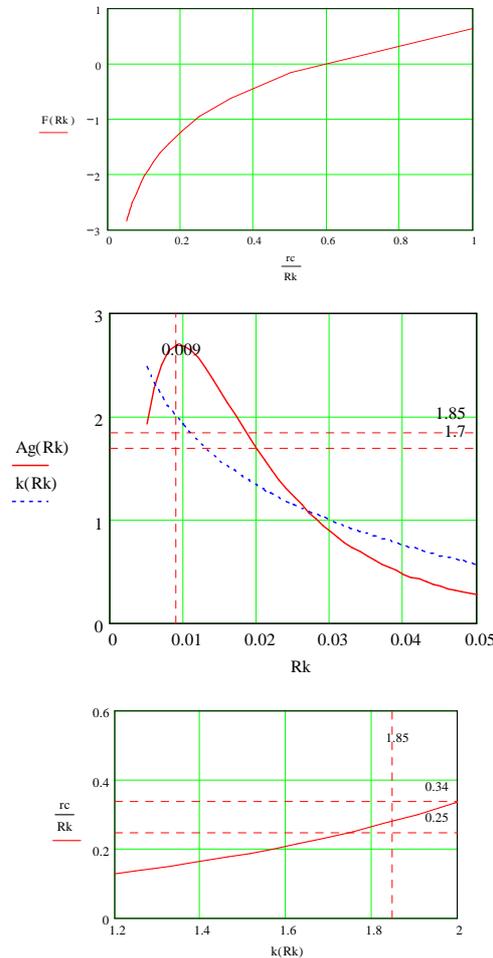


Рисунок 1 – Решение уравнений (1) и (3)

$$Q=0.043 \text{ м}^3/\text{с}; v=1000 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; f_k=2,826 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2; \\ r_c=3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; R_k=5 \cdot 10^{-3}, 6 \cdot 10^{-3} \dots 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}; m=1 \text{ Н}=20 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Для

$$k(R_k) = 0.96 \log \left[\frac{Q}{2H \cdot 3.14 v} m \frac{f_k}{r_c^2} \left(\frac{r_c}{R_k} \right)^2 \right]; \\ Ag(R_k) = 3,14 \frac{r_c^2 \cdot 0.9 \left(\frac{r_c}{R_k} \right)^{1-k(R_k)}}{m f_k}.$$

$$\eta=0.9; Q=0.05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}; W=12 \text{ м}/\text{с}; f=Q/W, \text{ м}^2; f=4.167 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; r_c=0.0015 \text{ м}; \\ v=1.12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; H=0.03 \text{ м}; R_k=0.0015, 0.003 \dots 0.03 \text{ м}.$$

$$k(R_k) = 0,96 \log \left(\frac{Q \frac{f}{R_k^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot H \cdot v} \right).$$

Уравнение (3) представлено в виде

$$F(R_k) = 2 \cdot 0,96 \cdot \ln \left(3,14 \frac{r_c^2}{f} \eta \right) \cdot \ln \left(\frac{r_c}{R_k} \right) - \left(1 - 0,96 \cdot \log \left(\frac{Q \frac{f}{R_k^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot H \cdot v} \right) \right) \cdot \ln \left(3,14 \frac{r_c^2}{f} \eta \right).$$

Рассмотрим вихревое течение среды с целью определения оптимальных гидродинамических параметров. В общей постановке задача может быть представлена в следующем виде:

$$V|_{r=1} = -1, \quad (4)$$

для уравнения

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (prV) = -\gamma(r), \quad (5)$$

где $\gamma(r)$ – функция изменения массы вихревого потока (в случае конденсации пара).

Основным фактором, влияющим на давление насыщения является начальное давление и температура. Начальное давление формирует определенный потенциальный барьер состояния жидкости, при прохождении которого происходит парообразование или конденсация. Условия существования метастабильного равновесия формируются независимо от условий термодинамического равновесия фаз и обуславливается содержанием растворенного газа, концентрацией глобул дисперсной фазы и микропузырьков в жидкости и др. [1].

Используя [1], а также диаграммное представление процесса конденсация, можно определить критическую скорость γ [кг/(м²с)], учитывая равенство $\frac{d\gamma}{dP} = 0$.

Опустив выполненные вычисления, приведем расчетные данные в виде графиков (рисунок 2). Расчетные данные, полученные по диаграммному методу соответствуют данным работы [1]. На рисунке 2а показана максимально возможная массовая скорость с 1 м² площади. При учете площади газового вихря в гомогенизаторе получим значения γ [кг/(м²с)], показанные на графиках. Из рисунков следует, что расчетные и экспериментальные данные согласуются с небольшой погрешностью. Характер зависимостей можно считать общим. Из графиков также следует, что функция γ [кг/(м²с)] имеет степенной вид, поэтому представление массовой скорости в математической модели степенным рядом вполне оправдано.

Наилучшее приближение аппроксимирующей функции можно представить в степенном виде. Показатель степени и коэффициенты определялись по следующим уравнениям:

– показатель степени

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \ln r_i(T) \sum_{i=1}^N \ln G_i - N \sum_{i=1}^N \ln r_i(T) \ln G_i}{\left(\sum_{i=1}^N \ln r_i(T) \right)^2 - N \sum_{i=1}^N (\ln r_i(T))^2};$$

– коэффициент

$$A = \exp \left\{ \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \ln G_i - \alpha \sum_{i=1}^N \ln r_i(T) \right) \right\},$$

где N – количество опытов.

В результате расчетов получена зависимость

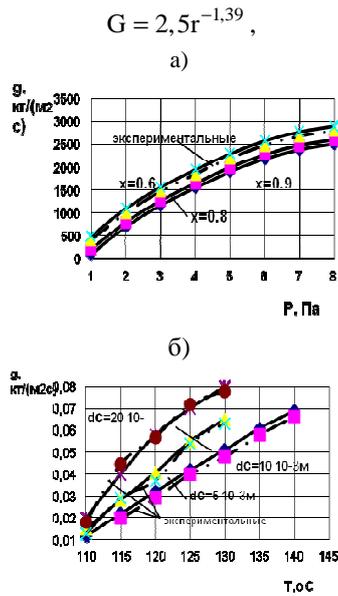


Рисунок 2 – Расчетная массовая скорость с 1 м² площади

Из графиков следует, что при конденсации пара в жидкости составляющие скорости жидкой фазы находятся ниже однофазного потока, а в паровом вихре скорость увеличивается.

Рассмотрим далее

$$W|_{r=1} = 1, \tag{6}$$

$$rW|_{r=0} = 0 \tag{7}$$

для уравнения

$$\rho V \frac{d}{dr}(rW) = \frac{1}{k} \frac{d}{dr} \frac{d}{dr}(rW) + \gamma W. \tag{8}$$

Решение можно представить в виде:

$$\rho r V = - \int_1^r \gamma(x) x dx - 1.$$

Коэффициент при интегрировании уравнения (8) можно найти из граничного условия

$$\lim_{r \rightarrow 0} C_1 = C_1 = \lim_{r \rightarrow 0} (rW)' + \lim_{r \rightarrow 0} \left(k - 2 + k \int_1^r \gamma(x) x dx \right) (rW) = 0; \tag{9}$$

$$W(r) = r^{1-k} \exp \left[-k \int_1^r \frac{1}{Z} \int_1^Z x \gamma(x) dx dZ \right]. \tag{10}$$

Если функцию изменения массы потока представить в виде $\gamma(r) = A_1 + A_2 r^\alpha$; получим решение

$$f_1(r) = \left[-\frac{A_1}{2} r - A_2 \frac{r^{\alpha+1}}{\alpha+2} + \left(\frac{A_1-2}{2} + \frac{A_2}{\alpha+2} \right) \frac{1}{r} \right] \cdot \left[-\frac{A_1}{2\rho} - A_2 \frac{(\alpha+1)}{(\alpha+2)\rho} r^\alpha - \left(\frac{A_1-2}{2} + \frac{A_2}{\alpha+2} \right) \frac{1}{\rho r^2} \right] +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{4}{3k} A_2 \frac{\alpha r^{\alpha-1}}{\rho} - (A_1 + A_2 r^\alpha) \cdot \\
 & \cdot \left[-\frac{A_1 r}{2\rho} - \frac{A_2 r^{\alpha+1}}{\rho(\alpha+2)} + \left(\frac{A_1 - 2}{2} + \frac{A_2}{\alpha+2} \right) \frac{1}{r\rho} \right]. \\
 f_2(r) = & A_1 \frac{r^2}{2} + A_2 \frac{r^{\alpha+2}}{(\alpha+2)^2} - \left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{\alpha+2} \right) \ln r - \frac{A_1}{4} - \\
 & - A_2 \frac{1}{(\alpha+2)^2}. \\
 f_3(r) = & x\rho M_k^2 f_2^2(r) r^{1-2k} - x \left(\frac{M_k}{B} \right)^2 f_1(r).
 \end{aligned}$$

Распределение давления при оптимальном соотношении радиусов

$$P(r) = 1 - \int_r^1 f_3(r) dr. \quad (11).$$

Полученное решение соответствует оптимальным значениям скорости потока, давления и соотношению геометрических параметров вихревого испарителя. По уравнению (11) можно определить давление насыщения и координаты зарождения вторичной фазы. При этом энергетические затраты на реализацию процесса разделения ЭТС будут минимальными.

Литература

1. Павленко А.М. Стійкість емульсій при технологічних впливах. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2001. – 140 с.
2. Павленко А.М. Структурообразование и дезинтеграция емульсий в вихревых аппаратах / Павленко А.М., Басок Б.И. Днепропетровск: ДГТУ, 2009. – 205 с.
3. Бородин В.А., Дитякин Ю.Ф. Распыливание жидкостей / Бородин В.А., Дитякин Ю.Ф. М: Машиностроение, 1967. – 267 с.
4. Ляховский Д.Н. Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах. М: Госэнергоиздат, 1958. – 67 с.

Bibliography (transliterated)

1. Pavlenko A.M. StlykIst emulsIy pri tehnologIchnih vplivah. – Dnipropetrovsk: Nauka i osvIta, 2001. – 140 p.
2. Pavlenko A.M. Strukturoobrazovanie i dezintegratsiya emulsiy v vihrevyih apparatah. Pavlenko A.M., Basok B.I. Dneprodzerzhinsk: DGTU, 2009. – 205 p.
3. Borodin V.A., Dityakin Yu.F. Raspyilivanie zhidkostey. Borodin V.A., Dityakin Yu.F. M: Mashinostroenie, 1967. – 267 p.
4. Lyahovskiy D.N. Voprosyi aerodinamiki i teploperedachi v kotelno-topochnyih protsessah. M: Gosenergoizdat, 1958. – 67 p.

УДК: 662.612.3:504

Братута Е.Г., Сизоненко О.В.

ВИРОБНИЦТВО ПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ

В статті запропонована методика оцінки основних конструктивних параметрів вихрових камер, в яких відбувається гомогенізація рідких палив шляхом комплексної гідродинамічної і термодинамічної дії на структуру первинних емульгованих середовищ.

Bratuta E.G., Syzonenko A.V.

FUEL EMULSIONS PRODUCTION

The estimation methods for vortex chambers design parameters are proposed. The process of homogenization of liquid fuels by complex hydrodynamical and thermodynamical action on the mixture of emulsies is considered.

**СИНТЕЗАТОР АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ОКПТО – 2014.
СТРУКТУРА, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, ДАЛЬНЕЙШИЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ**

Синтезатор ОКПТО – 2014 предназначен для расчета, оптимизации, а также оптимальной замены теплообменников (далее ТО), состоящих из стандартных и нестандартных кожухотрубчатых и пластинчатых теплообменных аппаратов.

Синтезатор ОКПТО – 2014 создан в результате проведения современных передовых научных исследований. Он реализован в виде программного продукта, позволяющего достичь максимального экономического эффекта как при изготовлении оборудования, так и при последующей его эксплуатации. Оценка эффективности оборудования проводится при учёте не только нынешних цен оборудования, энергии и сред, но также всех стоимостных показателей в динамике на весь планируемый срок эксплуатации. Учитываются дальнейшие затраты, которые неизбежно сопутствуют всему жизненному циклу оборудования, а именно затраты на теплоносители, энергию для привода нагнетателей (насосов, компрессоров, вентиляторов), текущие и капитальные ремонты и пр. Его уникальность состоит в том, что применённый системный подход позволяет учитывать индивидуальные особенности оборудования заказчика, накопленный им опыт научных исследований в данной области, оперативно адаптировать к этим данным алгоритм и программу, что позволяет достичь наибольшей возможной точности расчётов, а значит и максимальной эффективности проектируемого оборудования.

Синтезатор ОКПТО – 2014 разработан на основе упомянутого выше системного структурно-модульного подхода, что обеспечило возможность реализации широкой гаммы разновидностей расчётов теплообменного оборудования. При этом подходе значительно расширяются возможности развития алгоритма путём его изменения и дополнения без изменения структуры алгоритма. Такие алгоритмы и программы представляют собой систему, открытую для включения новых алгоритмических модулей. Это означает, что при необходимости использования других методов расчета алгоритм либо дополняется новым модулем, либо производится замена модулей без изменения структуры алгоритма. Эти модули выбираются по расчётному признаку.

Применение структурно-модульного подхода при построении синтезатора ОКПТО – 2014 обеспечивает создание различных частных алгоритмов и программ, которые можно сопровождать и модифицировать без участия авторов. Зачастую возникает необходимость её передачи другим организациям и исследователям. Тогда критерием качества алгоритмов и программ становится понятность, надёжность и удобство их сопровождения. При этом значительно упрощается их включение в САПР и АСНИ.

Ещё одним преимуществом структурно-модульного принципа построения синтезаторов типа ОКПТО – 2014 является возможность агрегирования алгоритмических и программных модулей в соответствии с назначением. Так, при выборе оптимальной топологии технической системы решается двухуровневая задача. На верхнем уровне иерархии происходит поиск оптимальных режимных параметров. Причём, алгоритмы разрабатываются вне зависимости от области применения. На нижнем уровне – поиск оптимальных конструктивных параметров элементов технической системы. Последняя задача предполагает набор модулей, различающихся в зависимости от области применения.

Синтезатор ОКПТО – 2014 (см. рис. 1) включает элементы конструкторского расчёта характеристик теплообменных аппаратов (для КТА) и типовых пакетов пластин (для ПТА), из которых комплектуется теплообменник, а также самого теплообменника, как совокупности теплообменных аппаратов (пакетов), тепловой проектно-поверочный, гидравлический, экономический, оптимизирующий расчёты теплообменника.

Соответственно, синтезатор ОКПТО – 2014 состоит из двух уровней.

1-ый уровень – внешний, оптимизационный. Он предусматривает:

- Блок-схема формирования набора исходных данных (**БС-ФНИД**) позволяет ввести некоторый набор исходных данных и установить границы варьирования независимых переменных (величин, по которым проводится оптимизация), а также задать метод поиска экстремума, ограничить количество перебираемых вариантов или время работы программы, задать целевой критерий оптимальности. **БС-ФНИД** проводит верификацию (проверку) достаточности и корректности введенных данных. Также задаются все необходимые признаки.

- Возможные виды расчетов: расчет нового оптимального ТО ($P_{BP}=1$) или оптимальная замена существующего ТО ($P_{BP}=2$). Фактически различие этих двух видов расчетов состоит в наличии или отсутствии фактических данных о работе предыдущего теплообменника, которые можно использовать в расчетах проектируемого. Расчет показателей работы предыдущего ТО проводится в **БС-РЭХ** и после оценки и подтверждения пользователем может вводиться в расчет. Также возможно оставить оборудование

или конструкции существующего теплообменника, либо сам теплообменник, оптимизировав только его режимные параметры. Все эти варианты расчетов задаются путем установки расчетных ограничений в БС-ЗРО.

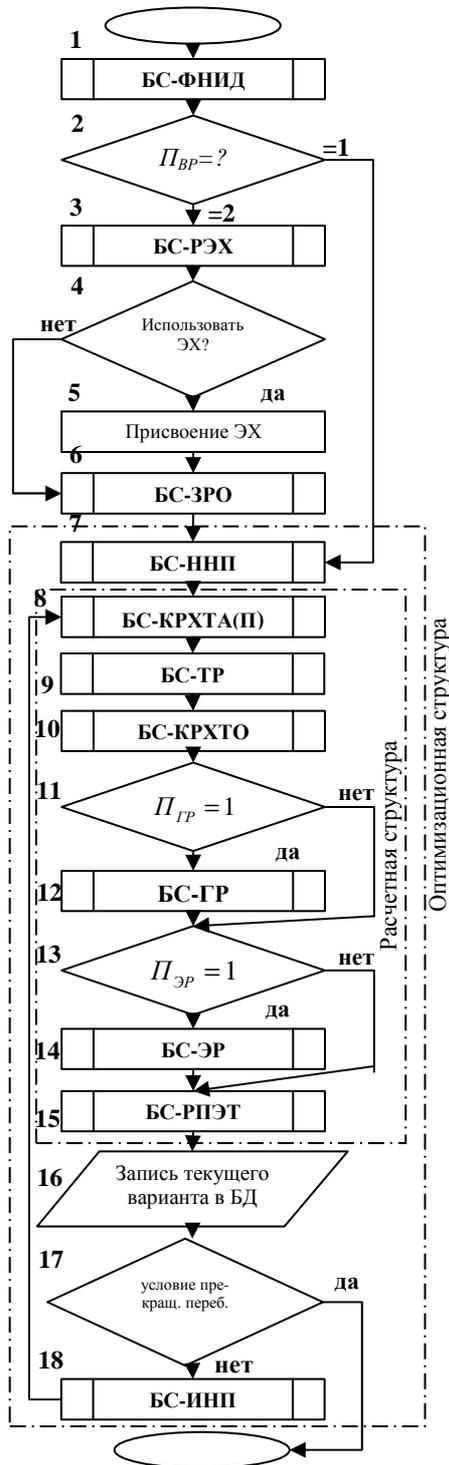


Рисунок 1 – Структура синтезатора алгоритмов оптимизации и оптимальной замены кожухотрубчатых и пластинчатых теплообменников (ОПКТО–2014)

- Блок-схема выбора начального набора независимых переменных (БС-ННП) и изменения набора независимых переменных (БС-ИНП) отвечают за организацию проведения оптимизации, устанавливают порядок поиска экстремума (перебор всех вариантов или применение определенных методов).

- итог – выбор оптимального варианта из всех ранее рассмотренных.

2-ой уровень – внутренний, обеспечивающий **расчёт критерия эффективности** любого текущего варианта теплообменника при учёте всех заданных ограничений на результаты расчёта. Он включает:

1. Конструкторский расчёт характеристик теплообменного аппарата (пакета) и теплообменника КРХТА(П) и КРХТО (блоки 8,10), т. е. величин, необходимых для последующих расчётов.

2. Тепловой расчёт теплообменника ТР (блок 9).

3. Гидравлический расчёт теплообменника ГР (блок 12).

4. Экономический расчёт теплообменника ЭР (блок 14).

5. Расчёт различных показателей эффективности ТО РПЭТ (блок 15).

На 2-ом уровне сосредоточены наиболее громоздкие, сложные математические модели.

В частности, здесь реализован созданный Г.Е. Каневцом принципиально новый метод [1, 2] теплового расчета теплообменников для наиболее распространённых схем соединения аппаратов в теплообменники (регулярных рядов и комплексов аппаратов) и для большого числа схем тока сред в аппаратах. За счёт этого существенно увеличивается область поиска оптимума и, соответственно, расширяются возможности повышения эффективности теплообменников при их оптимизации. 2-ой уровень может применяться самостоятельно, без 1-ого уровня, для проведения всех перечисленных видов расчёта, каждого расчёта в отдельности либо при различных их сочетаниях.

Оптимизация может проводиться по одному из 27 показателей эффективности. Среди них есть натуральные, энергетические, термодинамические, эксплуатационные, технико-экономические, удельные и комбинированные показатели.

Синтезатором ОКПТО – 2014 предусмотрена оптимизация по 24-м переменным, из них 5 характеризуют конструкцию теплообменника, 4 – конструкцию пластинчатого теплообменного аппарата, 7 – конструкцию кожухотрубчатого теплообменного аппарата, также предусматривается возможность перебора 8-ми режимных переменных.

Для каждой переменной минимальное и максимальное значения задаются или находятся из таблиц стандартов или нормалей.

Подробно синтезаторы средств расчета и оптимизации теплообменного оборудования описаны нами в [7, 8].

Дальнейшее усовершенствование синтезатора.

Несмотря на свою универсальность в части наиболее распространенных видов оборудования и условий его применения, остаются незатронутыми некоторые частные случаи расчетов. Также существует ряд специфических ситуаций, в

В связи с вышеизложенным актуален вопрос дальнейшего усовершенствования системы синтеза средств расчета и оптимизации (далее СРО) ТО с целью расширения области охвата объектов/задач путем более детального учета специфики конструкций теплообменников и протекающих в них процессов теплообмена.

Для начала необходимо определиться, какие из озвученных проблем возможно решить расширением базы сменных модулей без кардинальной перестройки самой системы, какие же требуют включения изменений в обобщенные структуры и общие подсистемы расчета.

Если при расчете специфического теплообменного оборудования требуется применение уравнений и зависимостей, характерных для определенной отрасли или отдельного оборудования, эти дополнения/изменения вносятся посредством расширения баз данных расчетных зависимостей. Например, так можно добавить требуемые уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи, гидравлических сопротивлений, экономических и др. величин. Подобные изменения не требуют внесения серьезных изменений в работающую систему.

Принципиальные изменения расчета требуют развития самой структуры синтезатора на более высоких уровнях иерархии – обобщенных структур и основных подсистем расчета.

В настоящей версии синтезатор предоставляет возможность генерации СРО для расчета кожухотрубных и пластинчатых теплообменников при процессах теплообмена без изменения агрегатного состояния любой из сред и с изменением. При этом расчет теплообмена идет при условии постоянства теплофизических характеристик, определяемых по средней температуре среды во всем теплообменнике. Конструкция теплообменника предполагает только набор его из одинаковых теплообменных аппаратов и для ограниченного количества схем тока сред (СТС).

Для расширения возможностей существующей системы есть три наиболее актуальных направления.

Существуют случаи, когда по ходу прохождения в полостях теплообменника вязкость среды изменяется в несколько раз. Это может привести к значительным (около 20%) неточностям в расчете коэффициента теплоотдачи. Поэтому, первый из возможных путей развития синтезатора – это уточнение результатов теплового расчета за счет произведения расчета не по усредненным теплофизическим параметрам, а интервально при помощи фрактального метода расчета, описанного подробно в [1]. Подобное усовершенствование повышает точность расчета теплопередачи, что в конечном счете способствует уменьшению необходимого запаса и, соответственно, уменьшению стоимости проектируемого теплообменника. Однако расчет подобным методом более сложен и целесообразность его применения необходимо оценивать исходя из исходных условий. (возможно частичное применение метода для ограниченного числа расчетов при оптимизации: основные циклы оптимизации по менее точному расчету, несколько наиболее оптимальных теплообменников пересчитывается по уточненному методу).

Второй путь развития – возможность расчета теплообменников, состоящих из разных теплообменных аппаратов. Причем это предполагает не только набор теплообменников из аппаратов одного типа но различных производительностей, но также из различных аппаратов, комбинация кожухотрубных и пластинчатых аппаратов в одном теплообменнике. Это возможно потому, что основной характеристикой аппарата при тепловом расчете теплообменника является его тепловая эффективность. Определение требуемого количества аппаратов производится исходя из требуемой эффективности теплообменника в целом, которая, в свою очередь зависит от СТС в ТО и эффективностей каждого входящего в него аппарата. Это также способствует уменьшению вынужденного запаса и снижению капитальных вложений в теплообменник, а также делает возможным проектирование ТО меньших габаритов, веса и др.

Третий путь усовершенствования – это включение в синтезатор возможности расчета систем теплообменников. Напомним, что система теплообменников – это такое теплопередающее устройство, в котором теплообмен осуществляется между более чем 2-мя средами.

Все приведенные выше пути совершенствования синтезатора СРО ТО позволят добиться расширения области применения данной системы, включения в нее возможности расчета ряда специфических объектов, для которых в настоящее время еще не создано автоматизированных систем.

Вывод. Синтезатор в сотни раз повышает возможности оценки эффективности теплообменников за счёт использования широкого набора критериев эффективности и существенного расширения области приложения алгоритма по объектам расчёта. Соответственно, открываются новые возможности для проведения полноценного вычислительного оптимизационного эксперимента.

Литература

1. Каневец Г.Е. Обобщённые методы расчета теплообменников / Г.Е. Каневец. – К.: Наукова думка, 1979. – 352 с.
2. Каневец Г.Е. Теплообменники и теплообменные системы / Г.Е. Каневец. – К.: Наукова думка, 1981. – 272 с.

3. Каневец Г.Е. Оптимизация теплообменного оборудования пищевых производств / Г.Е. Каневец. – К.: Техніка, 1981. – 192 с.
4. Kanewez G. Berechnung von Wermeubertragern. – Berlin: Akademie-Verlag, 1982. – 328 p.
5. Каневец Г.Е. Введение в автоматизированное проектирование теплообменного оборудования / Г.Е. Каневец, И.Д. Зайцев, И.И. Головач. – К.: Наукова думка, 1985. – 232 с.
6. Бажан П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
7. Каневец Г.Е. Разработка алгоритма оптимизационного расчета пластинчатых теплообменников на основе структурно-модульного подхода / Г.Е. Каневец, А.В. Кошельник, О.В. Алтухова, С.Д. Суима, Л.М. Коваленко // Энергетика. Экология. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2011. – 398 с. – С. 126–132.
8. Каневец Г.Е. Повышение эффективности работы пластинчатых теплообменников путем оптимизации конструктивных и режимных параметров / Г.Е. Каневец, А.В. Кошельник, С.Д. Суима, О.В. Алтухова // Энергетика. Экология. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2011. – С. 133–138.

Bibliography (transliterated)

1. Kanevets G.E. Obobshchyonnyie metodyi rascheta teploobmennikov. G.E. Kanevets. – K.: Naukova dumka, 1979. – 352 p.
2. Kanevets G.E. Teploobmenniki i teploobmennyye sistemyi. G.E. Kanevets. – K.: Naukova dumka, 1981. – 272 p.
3. Kanevets G.E. Optimizatsiya teploobmennogo oborudovaniya pischevyyih proizvodstv. G.E. Kanevets. – K.: Tehnika, 1981. – 192 p.
4. Kanewez G. Berechnung von Wermeubertragern. – Berlin: Akademie-Verlag, 1982. – 328 p.
5. Kanevets G.E. Vvedenie v avtomatizirovannoe proektirovanie teploobmennogo oborudovaniya. G.E. Kanevets, I.D. Zaytsev, I.I. Golovach. – K.: Naukova dumka, 1985. – 232 p.
6. Bazhan P.I. Spravochnik po teploobmennym apparatam. P.I. Bazhan, G.E. Kanevets, V.M. Seliverstov. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 368 p.
7. Kanevets G.E. Razrabotka algoritma optimizatsionnogo rascheta plastinchatyih teploobmennikov na osnove strukturno-modulnogo podhoda. G.E. Kanevets, A.V. Koshelnik, O.V. Altuhova, S.D. Suima, L.M. Kovalenko. Energetika. Ekologiya. Lyudina. Naukovi pratsi NTUU «KPI», ІЕЕ. – Kiyiv: NTUU «KPI», ІЕЕ, 2011. – P. 126–132.
8. Kanevets G.E. Povyishenie effektivnosti raboty plastinchatih teploobmennikov putem optimizatsii konstruktivnih i rezhimnih parametrov. G.E. Kanevets, A.V. Koshelnik, S.D. Suima, O.V. Altuhova. Energetika. Ekologiya. Lyudina. Naukovi pratsi NTUU «KPI», ІЕЕ. – Kiyiv: NTUU «KPI», ІЕЕ, 2011. – P. 133–138.

УДК 536.24:533.6.011

Канівець Г.С., Алтухова О.В.

**СИНТЕЗАТОР АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМ ОКПТО–2014.
СТРУКТУРА, ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ, ПОДАЛЬШІ ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ**

У статті викладено загальну структуру системи синтезу алгоритмів та програм ОКПТО–2014 для оптимізації пластинчастих і кожухотрубних теплообмінників. Також представлено деякі шляхи розвитку цієї системи з метою розширення області її застосування для специфічних конструкцій теплообмінників та умов теплообміну.

Kanevets G.E., Altukhova O.V.

**SYNTHESIZER ALGORITHMS AND PROGRAMS OKPTO – 2014.
STRUCTURE, SCOPE, FURTHER WAYS OF IMPROVING**

In this paper the general structure of the synthesis for synthesizers the means of calculation and optimization of heat transfer equipment for different appointments and designs are described OKPTO 2014. Also presents some ways of development of this system in order to expand its applicability to the specific design of heat exchangers and heat transfer conditions.

**ПОЧВЕННЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ:
ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИМЕНЕНИЕ**

Введение. Бурное развитие электроники существенно снизило уровень энергопотребления различных электронных устройств. Он характеризуется величинами от десятков милливатт до нескольких ватт. Такой прогресс в области электроники требует создания соответствующих источников питания. Особенно актуальным этот вопрос становится в случаях, когда необходимо обеспечить электрическим питанием различные автономные системы, рассчитанные на длительный (не менее 10 лет) срок эксплуатации.

Химические источники питания (никель - кадмиевые и металлгидридные аккумуляторы, литиевые батареи) при всей их технологичности, низкой цене, большому числу циклов "заряд-разряд", имеют характерные для них недостатки: необходимость обслуживания при перезарядке, большой саморазряд, ограниченный 2-3 годами ресурс работы, необходимость утилизации после окончания срока эксплуатации [1].

Применение фотоэлектрических батарей также ограничено из-за существенной зависимости их работы от времени суток, метеоусловий, необходимости регулярного обслуживания. Кроме того, они уязвимы к повреждениям и могут быть несанкционированно демонтированы с места их установки [2].

Еще один вариант решения проблемы по созданию автономных источников питания с большим ресурсом работы, в основном, базируется на использовании термоэлектрических генераторов с изотопными источниками тепла [3]. Но изотопные источники тепла являются радиоактивными и дорогими, что сдерживает их широкое применение. Более того, в настоящее время, из-за экологической опасности, они запрещены к использованию, сняты с производства, а ранее установленные - подлежат изъятию и утилизации.

Одним из альтернативных путей решения задачи по созданию автономного, экологического источника питания с большим ресурсом работы является использование термоэлектрического источника питания, который использует возобновляемую тепловую энергию системы "почва-воздух". Запасы такой тепловой энергии практически не ограничены и максимально приближены к потребителю.

Принципиальное преимущество термоэлектрических преобразователей тепловой энергии заключается в независимости их коэффициента полезного действия и ресурса работы от выходной мощности. Кроме того, они могут работать при малых перепадах температуры, характерных для системы "почва-воздух". Эти обстоятельства позволяют создавать надежные автономные источники питания малых мощностей, соразмерных с мощностями, которые потребляет большое количество современных электронных систем. В конструктивном сочетании с такими системами почвенные термоэлектрические генераторы (ПТЭГ) могут обеспечивать их автономную работу в течение не менее 30-35 лет. Такая уникальная особенность ПТЭГ позволяет создавать новую современную аппаратуру, которая может найти широкое применение в различных отраслях народного хозяйства, науки и техники.

Информация о создании ПТЭГ и перспективных областях их применения и является целью данной работы.

Почвенные термоэлектрические генераторы. Исследование возможностей использования тепловой энергии почвы путем ее термоэлектрического преобразования были начаты в СКТБ "Фонон" (г. Черновцы, Украина) еще в 1983 г. и продолжаются в Институте термоэлектричества до настоящего времени.

Уже на начальной стадии исследований системы «почва-воздух» было установлено, что тепловые процессы, происходящие на поверхности почвы, нестабильны. На них влияют многие факторы (метеоусловия, агротехнические мероприятия и др.). Тепловые процессы в активном слое почвы, за который принято считать [4, 5] слой, в котором происходит преобразование солнечной энергии в другие виды энергии, значительно стабильнее. Поэтому, при создании источников питания с использованием тепла системы "почва-воздух", целесообразно рассматривать процессы взаимного обмена тепла между поверхностным и ниже расположенными слоями почвы, обусловленные разницей их температур. Эти тепловые процессы составляют суть теплообмена в почве. С количественной стороны теплообмен в такой системе характеризуется величинами тепловых потоков в почве и их теплоаккумуляцией в ней. Так как величина последней служит интегральным значением тепловых потоков за определенный промежуток времени, то именно величина теплового потока является определяющей для теплообмена в почве. При прохождении теплового потока в почве возникает вертикальный перепад температуры. Он является первопричиной теплообмена в почве. Знание распределения температуры и теплофизических характеристик почвы поз-

воляють определять все элементы ее теплового режима, необходимые для проектирования ПТЭГ.

В Институте термоэлектричества разработаны физические основы приборов, осуществляющих термоэлектрическое преобразование тепловой энергии почвы [6–7]. Они позволяют осуществлять проектирование ПТЭГ с оптимальными характеристиками для конкретного типа почвы и климатической зоны.

С учетом результатов теоретических и экспериментальных исследований в Институте термоэлектричества сформулированы основные подходы к созданию ПТЭГ и созданы их экспериментальные образцы.

Схематическое изображение ПТЭГ приведено на рис. 1, где 1,6 – теплоприемная и тепло- рассеивающая поверхности, которые могут функционально заменять друг друга в зависимости от направления теплового потока в почве, 2, 4 – теплопроводы, 3 – многоэлементная термобатарея, 5 – теплоизоляция, 6 – водонепроницаемый корпус, 7 – электронный блок. Внешний вид одного из типоминералов ПТЭГ представлен на рис. 2.

При расположении ПТЭГ в почве, в зависимости от соотношения его теплового сопротивления к тепловому сопротивлению, эквивалентного по объему генератора, почвы (так называемый, k фактор), ПТЭГ может выполнять роль своеобразной термической линзы, собирающей тепловые потоки в почве, рис. 3, или рассеивать тепловые потоки в почве, концентрируя вблизи себя изотермические поверхности, рис. 4.

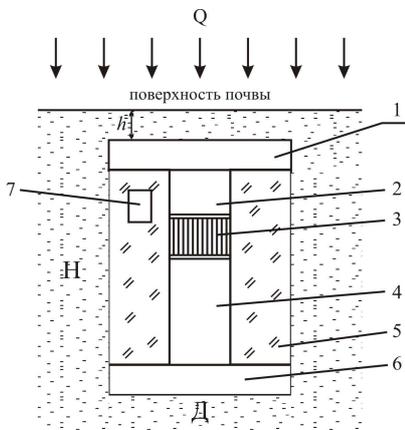


Рисунок 1 – Схематическое изображение ПТЭГ



Рисунок 2 – Внешний вид одного из типоминералов ПТЭГ

Оказывается, что перепад температур на ПТЭГ ведет себя в зависимости от величины параметра k противоположным образом. Это обуславливает необходимость оптимизации соотношения теплофизических характеристик и геометрии ПТЭГ с учетом характеристик почвы.

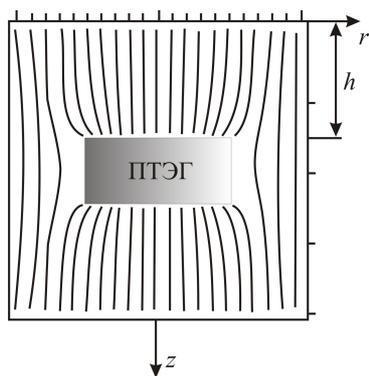


Рисунок 3 – Концентрация теплового потока в ПТЭГ

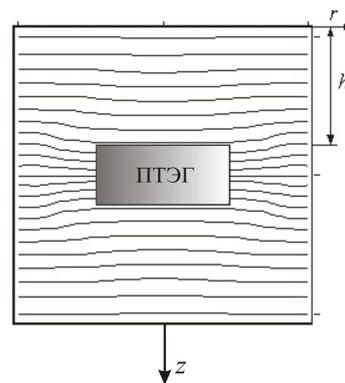


Рисунок 4 – Возмущения однородного температурного поля в виде концентрации изотерм вблизи ПТЭГ

Осуществлять оптимизацию ПТЭГ по его теплофизическим характеристикам и аналогичным характеристикам почвы для достижения экстремальных параметров ПТЭГ позволяет соблюдение соотношения

$$k_{\text{опт}} \approx 1/3 \cdot H/D, \quad (1)$$

где H – высота ПТЭГ, D – его диаметр, а H/D – фактор формы ПТЭГ.

С учетом исследований по созданию ПТЭГ, в Институте термоэлектричества разработан ряд экологически чистых источников питания, рассчитанных на автономную работу с ресурсом до 30–35 лет, которые не имеют аналогов [7]. Характеристики ПТЭГ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики ПТЭГ

№ п/п	Габаритные размеры, мм	Q, мВт	W, мВт	U, В	Ресурс работы, лет
1.	1. 200x200x250	800	20	3, 6, 12	30
	2. Ø150x250	3360	10	3, 6, 12	35
	3. Ø200x250	6000	16	3, 6, 12	35

где Q – усредненный тепловой поток, W – выходная электрическая мощность, U – выходное напряжение.

Перспективные области применения ПТЭГ. Широкие возможности применения ПТЭГ, как уже отмечалось выше, обусловлены прежде всего тем, что современные электронные устройства, рассчитанные на длительное время работы, обладают низким уровнем энергопотребления, соизмеримым с мощностями, которые могут производиться ПТЭГ. Еще одним преимуществом перед известными источниками питания является максимальная приближенность ПТЭГ к потребителю, ведь он может быть установлен в почву в любом месте. Полная автономность, экологическая чистота, ресурс работы 30–35 лет существенно расширяют сферу возможных применений ПТЭГ. А такая уникальная особенность, как отсутствие демаскирующих факторов, позволяет эффективно использовать ПТЭГ для элементов охранной сигнализации, датчиков движения, охранных извещателей, систем обнаружения объектов, датчиков охраны периметра и др., потребляющих не более 1 Вт электроэнергии.

Охранные устройства, в основном, работают в режиме ожидания, который для большинства химических источников тока является неэффективным и даже разрушительным, так как приводит к ускоренному и быстрому уменьшению ресурса работы. В то время, как для ПТЭГ, работа в режиме ожидания является выгодной.

Использованием ПТЭГ в качестве источников питания для упомянутых систем и приборов возможности их применений не ограничиваются.

В настоящее время широко применяются микросхемы, осуществляющие обработку сигналов с преобразованием физических величин. С помощью подобных систем создаются различные средства обнаружения и распознавания объектов. В основе средств обнаружения используются сейсмический принцип, суть которого заключается в анализе сейсмических колебаний почвы, вызванных движением. Такие сейсмодатчики отличаются миниатюрностью, малыми уровнями энергопотребления, работой в режиме ожидания. Так сейсмодатчики серии СД и СДГ потребляют всего 0,4 мА при напряжении 5 В. Точечный вибродатчик ВД потребляет всего 0,11 мА при напряжении 5 В. Регистраторы сейсмических сигналов «Байкал–АСМ» питаются от источника постоянного тока с напряжением 12 В при силе тока 25 мА. Приведенные примеры подтверждают возможность применения ПТЭГ для питания упомянутых устройств.

Эффективно применение ПТЭГ для питания сигнальных устройств и трассировки дорог на отдаленных и пустынных участках дорог. С их помощью можно осуществлять постоянный мониторинг за метеоусловиями для метео- и агрономических исследований, которые являются финансово затратными для отдаленных и труднодоступных территорий.

Выводы. ПТЭГ являются конкурентоспособными в сравнении с химическими и фотоэлектрическими источниками питания малой (до нескольких Ватт) мощности.

Ресурс работы ПТЭГ на порядок превышает ресурс работы химических источников питания и в 2–3 раза лучше, чем у фотоэлектрических источников.

Уникальные особенности ПТЭГ: высокая надежность, ресурс работы 30–35 лет, максимальная приближенность к потребителю обуславливают широкие возможности их применений.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л.И. Анатычук. К.: Наукова думка. 1979. – 767 с.

2. Инструкция по эксплуатации “Светильник на солнечной батарее – бра с сенсором”. Модель ELLS-906A-WS, ELLS-906B-WS.
3. Л.И. Анатычук. Термоэлектрические генераторы / Анатычук Л.И., Пустовалов А.А., Струтинская Л.Т. // Термоэлектричество. – 2007. – № 1. – с. 5–28.
4. Чудновский А.Ф. Физика почвы. / А.Ф. Чудновский. М.: Наука. 1967. – с. 12–237.
5. Микитюк П.Д. О термоэлектрическом преобразовании тепловых потоков почвы / Микитюк П.Д. // Термоэлектричество. – 2003. – № 1. – с. 84–89.
6. Анатычук Л.И. Термогенераторы, использующие тепловые процессы в почвах / Анатычук Л.И., Микитюк П.Д. // Термоэлектричество. – 2003. – № 3. – с. 91–100.
7. Микитюк П.Д. Приборы термоэлектрического преобразования энергии почвы. Диссертация кандидата физико-математических наук: 01.04.01.2004.

Bibliography (transliterated)

1. Anatyichuk L.I. Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva. L.I. Anatyichuk. K.: Naukova dumka. 1979. – 767 p.
2. Instruksiya po ekspluatatsii “Svetilnik na solnechnoy bataree – bra s sensorom”. Model ELLS-906A-WS, ELLS-906B-WS.
3. L.I. Anatyichuk. Termoelektricheskie generatoryi. Anatyichuk L.I., Pustovalov A.A., Strutinskaya L.T. Termoelektrichestvo. – 2007. – # 1. – p. 5–28.
4. Chudnovskiy A.F. Fizika pochvyi. A.F. Chudnovskiy. M.: Nauka. 1967. – p. 12–237.
5. Mikityuk P.D. O termoelektricheskom preobrazovanii teplovyih potokov pochvyi. Mikityuk P.D. Termoelektrichestvo. – 2003. – # 1. – p. 84–89.
6. Anatyichuk L.I. Termogeneratoryi, ispolzuyuschie teplovyie protsessy v pochvah. Anatyichuk L.I., Mikityuk P.D. Termoelektrichestvo. – 2003. – # 3. – p. 91–100.
7. Mikityuk P.D. Pribory termoelektricheskogo preobrazovaniya energii pochvyi. Dissertatsiya kandidata fiziko-matematicheskikh nauk: 01.04.01.2004.

УДК 621.382

Микитюк П.Д.

**ГРУНТОВІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ:
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ**

Розглянуто будову, принцип дії та визначено пріоритетні області застосування термоелектричних автономних відновлювальних джерел живлення, що використовують теплову енергію ґрунту. У роботі наведено інформацію про створення в Інституті термоелектрики ґрунтових термоелектричних джерел живлення малої (до 1 Вт) потужності, співрозмірної з величинами потужностей, які споживають сучасні електронні пристрої. Завдяки високій надійності, доступності, ресурсу роботи 30–35 років такі джерела живлення сприяють появі нової сучасної апаратури. Така апаратура не має аналогів і може широко застосовуватись в різних галузях народного господарства, науки і техніки.

УДК 621.382

Муkytyuk P.D.

SOIL THERMOELECTRIC GENERATORS: CHARACTERISTICS AND APPLICATION

The construction, operating principle, comparative characteristics and priority fields of application of thermoelectric autonomous renewable energy sources utilizing the thermal energy of soils have been considered. As it is shown in the paper, the soil thermoelectric sources with low potential (1 W), commensurable with plenty of modern electron devices, have been developed in the Institute of Thermoelectricity. Due to their high reliability and long life such power supplies contribute to development of new modern apparatuses that are vastly applied in various spheres of national economy, science and technology.

Терзиев С.Г., Ружицкая Н.В., Борщ А.А.

**ЭТАПЫ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ
В ПРОИЗВОДСТВО ПИЩЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ**

Введение. В технологиях пищевых концентратов ведущее место отводится кофепродуктам. Объем переработки кофейных зерен находится на втором месте в мире, уступая нефти. В кофейной индустрии занято 20 млн. человек, а рынок кофепродуктов стабильно растет. Наиболее динамичным считается рынок кофе в Украине, где прирост составляет 12...16 % в год. Вместе с тем, усугубляются технологические проблемы переработки сырья. Отрасль работает на дорогом импортируемом сырье, обязательным этапом технологии является процесс обезвоживания. А это чрезвычайно энергоемкий процесс, и в условиях стабильного роста цен на энергоносители вопросам эффективного использования ресурсов следует постоянно искать резервы сокращения расходов топлива [1].

Теплоэнергетический аудит пищевого концентратного производства. Основным источником энергии производства является природный газ, доля которого в общем энергетическом балансе предприятия составляет практически 70 %. Преимущественно природный газ расходуется в технологии растворимого кофе и в котельной. Главными потребителями водяного пара являются цех пищевых концентратов и система отопления (рис. 1).

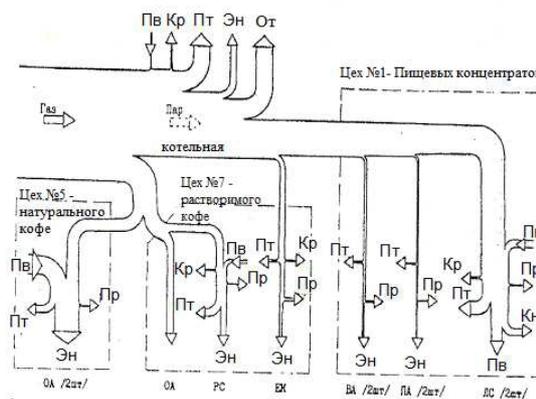


Рисунок 1 – Энергетический баланс предприятия

Типичная картина потребления энергии за год приведена на рис. 2. Важным этапом расчетов являлась оценка удельных затрат энергии (j), т.е. отношение объема потребленной энергии к объему выпущенной продукции. Анализ расчетов показал, что удельные расходы пара на технологию лежат в пределах 6...7 МДж на 1 кг пищевых концентратов и 70...80 МДж на 1 кг кофе. Исходя из этого проведена оценка затрат пара отдельно на отопление и на технологии.

Расход тепловой энергии на технологические задачи определен по следующей схеме. На первом этапе анализировались результаты в тех месяцах, когда отопление отключено и единственным потребителем остаются технологические линии. Далее выделялись месяцы неотапительного сезона, когда выпускался только один продукт. На предприятии брикеты (пищевые концентраты) гороха выпускают в течение всего года, а кофе лишь в определённые месяцы. Так определены удельные затраты тепловой энергии на производство пищевых концентратов ($j_{пк}$). Расчет проведен для 4,5,6,8 месяцев в течение 2011 года. Так:

$$j_{пк} = (7,49+7,06+5,948)/3 = 6,83 \text{ МДж/кг.} \tag{1}$$

По аналогичной схеме определено значение удельных затрат энергии на производство растворимого кофе ($j_{кф} = 75,56 \text{ МДж/кг}$).

Расход тепловой энергии на отопление определялся как разница между суммарными и технологическими затратами

$$Q_i^0 = \Sigma Q_i - Q_{i_{пк}} - Q_{i_{кф}}. \tag{2}$$

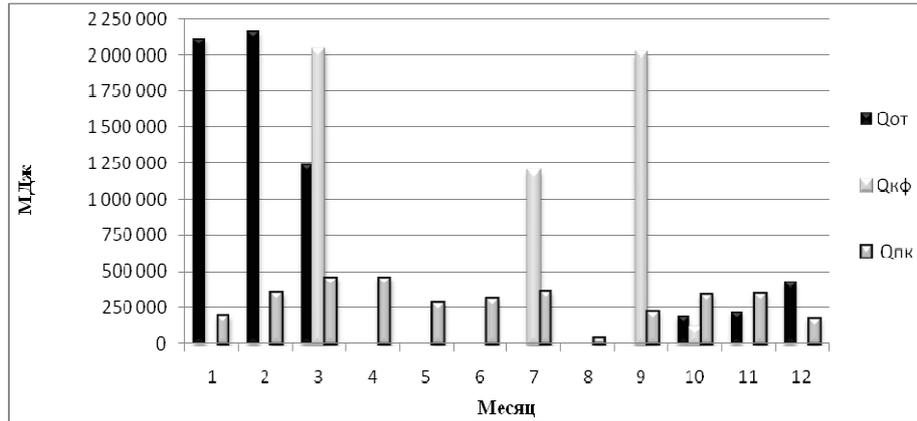


Рисунок 2 – Расход энергии инженерными комплексами

Результаты расчетов (рис. 2), показывают, что в отопительный период расходы топлива значительно выше, чем летом, а работа линии растворимого кофе увеличивает расход энергетических ресурсов по сравнению с остальными цехами в разы. Поэтому, приоритетной задачей является энергетика растворимого кофе.

Первый этап модернизации. Это организационные мероприятия: внедрение рациональных режимов эксплуатации оборудования; установка паромеров и конденсатоотводчиков.

Работы этого этапа не требуют значительных капиталовложений и быстро окупаются. Они наиболее эффективны: позволяют снизить энергозатраты на 60–80 % и значительно превзойти отраслевой уровень по эффективности энергопотребления.

Внедрение рациональных режимов эксплуатации подразумевает сведение к минимуму продолжительности процессов разгона (прогрева) аппарата и приближение к максимуму длительности процессов функционирования (использования) машин при номинальной производительности, то есть увеличение продолжительности рабочих циклов и уменьшение промежутков между циклами. Рассматриваемая проблема связана с потребностью в обеспечении необходимого количества равномерно поставляемого сырья и сбываемой продукции.

Второй этап модернизации. Энергетический и экологический мониторинг линии производства растворимого кофе показал, что с аэрозольными выбросами распылительной сушилки за год теряется 4,5 т порошка готового продукта и 8200 ГДж тепловой энергии. Поэтому, на линии уходящего после циклонов теплоносителя установлен инновационный аппарат [2, 3] – тепломассоутилизатор. Оригинальная организация процессов тепломассопереноса в аппарате [4] обеспечивает режим «самоочистения» теплопередающей поверхности и стабильные значения коэффициента теплопередачи. Эксплуатация тепломассоутилизатора на протяжении 6 лет подтвердила его высокую эффективность как фильтра порошка кофе, скруббера и рекуператора для подогрева воздуха перед поступлением в калорифер. Тепломассоутилизатор (рис. 3) снижает расход газа на 20–22 % и улавливает до 90 % порошка кофе из выбросов сушилки.

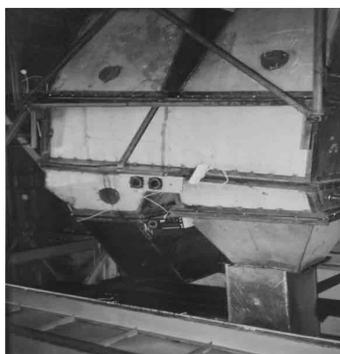


Рисунок 3 – Тепломассоутилизатор

При осуществлении второго этапа программы становится возможным приблизиться к физическому предельному уровню потребления энергии для осуществления требуемой технологической переработки продукта. Уровень характеризует минимально возможные затраты энергии (определяемые теплоемкостью нагреваемого продукта или теплотой фазового перехода удаляемой влаги), достижимые на пределе совершенствования рассматриваемых теплотехнологий. Однако данный уровень реально превзойти на третьем этапе.

Третий этап модернизации. На третьем этапе разрабатывается новое технологическое оборудование на основе альтернативных физических принципов воздействия на продуктовые и материальные среды. Приоритет отдается не традиционным термодинамическим методам обработки, а низкотемпературным. При этом снижается энергоемкость, и улучшаются свойства дорогостоящего готового продукта.

Ключевым процессом в технологии кофе является экстрагирование. В традиционных технологиях это энергоемкий, низкоэффективный процесс, который требует громоздкого и металлоемкого оборудования. Высокие температуры и давления в аппарате исключают использование каких-либо средств для интенсификации массопереноса. Переход на принципы электромагнитного подвода энергии [5] показало существенную интенсификацию массопереноса при сушке пищевого сырья. Поставлены эксперименты по оценке возможностей использования микроволнового поля при экстрагировании кофейного сырья.

Для определения влияния действия микроволнового поля на интенсивность процесса экстрагирования, опыты проводились как в условиях традиционного теплового подвода энергии, так и в микроволновом поле. Сравнение интенсивности экстрагирования в микроволновом экстракторе и в термостате приведено на рис. 4.

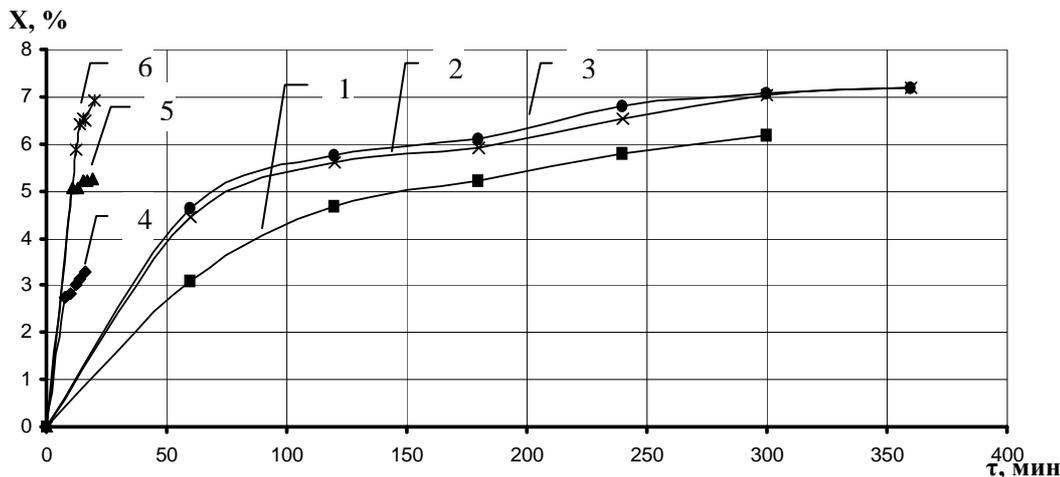


Рисунок 4 – Влияние характера подвода энергии на экстрагирование гексаном:
1, 2, 3 – опыты в термостате; 4, 5, 6 – опыты в МВ- поле;
температурный режим: 1, 4 – 40 °C ; 2, 5 - 50 °C; 3, 6 - 60 °C.

Видно (рис. 4), что скорость переноса экстрактивных веществ из кофейного сырья в микроволновом поле в 10–15 раз выше. Первым этапом при формировании алгоритма расчета является обоснование параметрической модели аппарата. Важно корректно определить группы параметров, системы, которые являются значимыми в процессе экстрагирования. Серьезным вопросом считается обоснование функции цели. Представляется, что в качестве функции цели логично определить два параметра: концентрация целевого компонента в экстракте и величина удельных затрат энергии на процесс (рис. 5). Влияние на значение функции цели оказывают такие элементы системы: экстрагент, шлам (либо зерна кофе), конструкция аппарата и система микроволновой подачи энергии (рис. 5).

Основная проблема при проектировании экстрактора связана с расчетом массопереноса в системе «кофейное сырье–вода». Главными независимыми входными параметрами являются: начальные состояния экстрагента, твердой фазы и производительность аппарата. Для расчета необходимо знать концентрации экстрактивных веществ в твердом теле (C_H) и экстракте (X_H), температуру экстрагента (t) и давление в аппарате. Важную роль играют свойства экстрагента: плотность (ρ), теплоемкость (c_p), вязкость (ν), удельная теплота фазового перехода (r) и коэффициент диффузии (D). Для твердой фазы следует учитывать эквивалентный размер частицы (d_3), пористость слоя (ϵ) и его толщину (δ). Сам аппарат характеризуется габаритными размерами, объемом реакционной зоны (V_p) и массой загрузки твердой фазы

(G_{III}). В принципі, указанні вище параметри являються традиційними для всіх екстракторів. Принципово вперше учитываются характеристики системи підводу енергії. Определяющими здесь считаются мощность одного генератора (N), его КПД (η) и количество излучателей (z) (рис. 5).

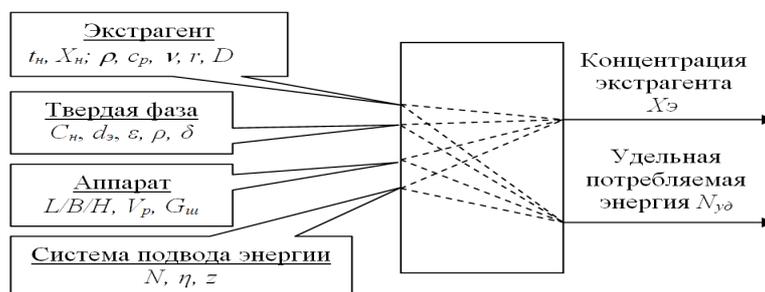


Рисунок 5 – Параметрическая модель микроволнового экстрактора

В результате комплексных экспериментальных исследований определены частные зависимости влияния всех факторов на интенсивность массоотдачи при экстрагировании из кофейного сырья [6]. На основе теории подобия [7] проведено обобщение базы экспериментальных данных для систем: «кофе–этанол», «кофе–гексан» и «кофе–вода». Соответствующие критериальные уравнения сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Обобщение экспериментальных данных

	расчетное соотношение	режим	экстрагент
1	$Sh = 0,01(Sc)^{0,33}(\Gamma)^{0,05}(Bu)^{0,32}$	периодический	этанол
2	$Sh = 0,006(Sc)^{0,33}(\Gamma)^{0,17}(Bu)^{0,71}$	периодический	гексан
3	$St_m = 0,004(Re)^{-0,5}(Sc)^{0,43}(\Pi)^{0,6}(Bu)^{0,33}$	непрерывный	вода

В приведенных соотношениях использованы числа подобия: массообменное Стантона (St), Шмидта (Sc), гидромодуля (Γ), Рейнольдса (Re), параметрической проницаемости (Π) и числа Бурдо (Bu), которое показывает соотношение энергии излучения (N) и той энергии, которая необходима для перевода в паровую фазу всего экстрагента в экстракторе. Полученные соотношения использованы при проектировании микроволновых экстракторов и обоснования их типоразмерного ряда.

Выводы. По результатам энергетических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Серьезные резервы существенного снижения расхода энергетических ресурсов заключаются в организационных мероприятиях. Только соблюдение нормативных режимов работы оборудования даст сокращение расхода энергетических ресурсов от 18 % (в котельной) до 50 % (на распылительной сушилке).
2. Вторым этапом совершенствования теплотехнологий считаются технические мероприятия по утилизации тепловых выбросов, монтажу тепловой изоляции и т.п.
3. Третьим этапом модернизации теплотехнологий являются внедрения инновационных проектов эффективных приемов подвода энергии в технологиях сушки и экстрагирования.

Литература

1. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244 с.
2. Бурдо О.Г. Терзиев С.Г., Перетяка С.М. Спосіб утилізації тепла та пилу продукту при сушінні продукту Патент України № 26470. Приоритет від 16.03.93. Опубл. 11.10.99. Бюл. №б.
3. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок – Одесса: Полиграф, 2010 – 368 с.
4. Бурдо О.Г., Смирнов Г.Ф., Терзиев С.Г., Зыков А.В. Инновационные теплотехнологии АПК на основе тепловых труб. – Одесса: «ИНВАЦ», 2014. – 376 с.
5. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Электромагнитные технологии обезвоживания сырья /Problemele energeticii regionale, Chisinau, №1 (18), 2012.– pp. 69–79.
6. Терзиев С.Г., Макиевская Т.Л., Ружицкая Н.В. Стендовые испытания микроволнового экстрактора для производства кофепродуктов // Зб. наук. праць ОНАХТ, Одеса, 2014. – Вип.45, Т. 2. – С. 80–84.

7. Терзиев С.Г., Макиевская Т.Л. Применение теории подобия в задачах экстрагирования в микроволновом поле // Зб. наук. праць ОНАХТ Одеса, 2014. – Вип.45, Т. 3. – С. 158–162.

Bibliography (transliterated)

1. Burdo O.G. Energeticheskiy monitoring pischevyykh proizvodstv – Odessa: Poligraf, 2008 – 244 p.
2. Burdo O.G. Terziev S.G., Peretyaka S.M. Sposib utilizatsiyi tepla ta pilu produktu pri sushinni produktu Patent Ukrayini # 26470. Prioritet vid 16.03.93. Opubl. 11.10.99. Byul. #6.
3. Burdo O.G. Evolyutsiya sushilnykh ustanovok – Odessa: Poligraf, 2010 – 368 p.
4. Burdo O.G., Smirnov G.F., Terziev S.G., Zyikov A.V. Innovatsionnyie teplotehnologii APK na osnove teplovykh trub. – Odessa: «INVATs», 2014. – 376 p.
5. Burdo O.G., Terziev S.G., Yarovoy I.I., Borsch A.A. Elektromagnitnyie tehnologii obezvozhvaniya syiry / Problemele energeticii regionale, Chisinau, #1 (18), 2012.– p. 69–79.
6. Terziev S.G., Makievskaya T.L., Ruzhitskaya N.V. Stendovyye ispytaniya mikrovolnovogo ekstraktora dlya proizvodstva kofeproduktov // Zb. nauk. prats ONAHT, Odessa, 2014. – Vip.45, T. 2. – P. 80–84.
7. Terziev S.G., Makievskaya T.L. Primenenie teorii podobiya v zadachah ekstragirovaniya v mikrovolnovom pole // Zb. nauk. prats ONAHT Odessa, 2014. – Vip.45, T. 3. – P. 158–162.

УДК 663.918.23

Терзієв С.Г., Ружицька Н.В., Борщ А.А.

**ЕТАПИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНОВАЦІЙНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВО
ХАРЧОВИХ КОНЦЕНТРАТІВ**

Показано, що харчоконцентратне виробництво і, зокрема, виробництво каво продуктів характеризуються високою енергоємністю. Наводиться теплоенергетичний аудит виробництва розчинної кави. Запропоновано три етапи модернізації виробництва кавопродуктів: організаційні заходи, впровадження тепломасоутилізаторів та впровадження нового технологічного обладнання на основі альтернативних фізичних принципів дії на продуктіві та матеріальні середовища.

Terziev S.G., Ruzhytskaya N.V., Borshch A.A.

**THE STAGES OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES IMPLEMENTATION INTO FOOD
CONCENTRATES PRODUCTION**

It is noticed that food concentrates production is highly energy consumptive. The brief case study on energy audit is presented. The three stages of technology modernization are proposed including use of modern equipment with alternative physical principles of processing.

УДК 548.5

Товажнянский Л.Л., Шапоров В.П., Шестопапов А.В., Питак И.В.

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИКОВ, АРМИРОВАННЫХ НИТЕВИДНЫМИ КРИСТАЛЛАМИ TiO₂, AlN И SiC

Постановка проблемы

В настоящее время в различных отраслях техники особо важное значение приобретают материалы на основе сетчатых полимеров благодаря их высокой твердости, химической и термической стойкости, низкой деформируемости под нагрузкой [1, 2]. По объему производства, степени потребления и качественным показателям ведущее место среди них занимают эпоксидные связующие [3]. Во многих странах проводятся интенсивные исследования по использованию нитевидных кристаллов (НК) для упрочнения металлов, керамики и пластмасс [4, 5].

Цель настоящей работы – получение композиционных пластиков, армированных НК, изучение их физико-механических свойств и определение условий наиболее эффективного использования высоких прочностных и упругих характеристик армирующего наполнителя.

Анализ последних достижений и публикаций

Для исследования были взяты НК β -TiO₂, AlN, пироуглерода и SiC, а в качестве матрицы – эпоксидная смола, отверждаемая тетраэтаноламинтитанатом.

В табл. 1 приведены для сравнения показатели механических свойств НК и промышленного стекловолокна. Некоторые НК превосходят стекловолокно по модулю упругости и прочности.

Таблица 1 – Показатели механических свойств НК и стекловолокна [6, 7]

Материал	Размеры		Плотность, г/см ³	G, МПа	E, ГПа	T плавления, °C
	d, мк	l, мк				
НК TiO ₂	2	0,25	4,01	2157,5	392,3	1780
НК AlN	20	3,5	3,3	3432,3	372,6	2430
НК SiC	3	12	3,2	7845,2	480,5	2600
НК C	20	30	2,0	1569	205,9	3600
Стекловолокно непрерывное «Е»			2,5	3138,1	68,7	840

Получение композиционных пластиков осуществлялось гидровакуумным методом, предусматривающим выкладку пакета из матов на основе НК TiO₂ и AlN, или однонаправленных образцов из усов SiC и пироуглерода в герметически закрывающуюся пресс-форму с последующим вакуумированием и пропиткой под давлением разогретым связующим и термообработкой при температуре 180 °C.

Маты с хаотической структурой были получены путем диспергирования НК TiO₂ и AlN в жидкой среде и вакуумным осаждением на бумажный или стеклянный фильтры. В табл. 2 приведены основные характеристики матов из НК.

Таблица 2 – Характеристики полученных матов

НК	d, мк	l, мк	Плотность, г/см ³	Содержание кристаллов, %
TiO ₂	1,5–2	0,15–0,45	0,14	4,5
AlN	20	2–7	0,093	2,75

Маты обладали низкой плотностью упаковки, поэтому требуемое содержание армирующего наполнителя в композиционном материале определялось разностью в толщине закладываемого пакета и зазором между оформляющими поверхностями прессформы.

Свойства пластиков измерялись на образцах размерами 50x4x δ , где δ – толщина образца, равная 0,5 – 0,7 мм или 1 мм с базой испытаний 10 и 20 мм соответственно при скорости деформирования 26 мм/мин.

При расчете упрочнения, достигаемого с помощью НК были использованы следующие аналитические зависимости предела прочности и модуля упругости [8, 9]:

$$G_c = G_f V_f \theta \Omega + G_{mf} (1 - V_f), \quad (1)$$

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m, \quad (2)$$

где G_c, G_f – пределы прочности композиционного материала и волокна; $G_{mf} = G_f \frac{E_m}{E_f}$ – напряжение в матрице при разрушающей деформации композиционного материала; E_c, E_m, E_f – модули упругости соответственно композиции, матрицы, волокна; Ω – коэффициент средней прочности по Келии [10], равный $(1 - \frac{l_k}{2l})$; V_f, V_m – объемное содержание волокна и матрицы; l_k – критическая длина волокон; l – длина волокон; I – константа ориентации волокна (в данном случае для волокон с хаотической ориентацией, лежащих в одной плоскости – 0,5 и 1 для однонаправлено ориентированной структуры).

В табл. 3 и 4 сравниваются свойства эпоксидной смолы, упрочненной НК, со свойствами чистой смолы или смолы, армированной стеклянными и углеродными волокнами типа «РАЕ».

Таблица 3 – Характеристика изотропных композиций

Наполнитель	$V_f, \%$	Плотность $\gamma, \text{г/см}^3$	$G_{\text{вн.}}, \text{МПа}$	$G_{\text{в}}, \text{МПа}$	$E, \text{ГПа}$	$G_{\text{в}}/\gamma, \text{км}$	$E/\gamma, \text{км}$
НК	11	1,5	235,4	215,7	27,5	16	1850
НК	11	1,4	245,2	215,7	24,5	18	1810
Стекловолокно дискретное ($l = 7 \text{ мм}$)	12	1,4	166,7	147	8,8	12	650
Смола без наполнителей	–	1,2	83,3	72,5	2,8	7	24

Таблица 4 – Свойства однонаправленных композиций

Наполнитель	$V_f, \%$	Плотность $\gamma, \text{г/см}^3$	$G_{\text{вн.}}, \text{МПа}$	$G_{\text{в}}, \text{МПа}$	$E, \text{ГПа}$	$G_{\text{в}}/\gamma, \text{км}$	$E/\gamma, \text{км}$
Стекловолокно непрерывное	62	2,0	1471	1274,9	53,9	65	2750
НК пироуглерода	50	1,52	539,3	510	69,6	37	4750
НК SiC	25	1,6	863	735,5	117,7	55	7500
НК пироуглерода (расчет)	62	1,65	666,8	–	88,3	42	5400
НК SiC (расчет)	62	2,3	2255,5	–	294,2	100	13000
Углеродное волокно непрерывное	62	1,7	882,6	17652	176,5	53	12500

Для удобства сравнения ориентированных композиционных пластиков произведен перерасчет прочностных значений на одинаковую степень наполнения $V_f = 0,62$ в соответствии с уравнениями 1 и 2. Эпоксидные пластики, армированные НК TiO_2 и AlN в хаотической ориентации, в 3 раза превосходит стеклопластики по модулю упругости и в 1,5 раза по прочности.

Цель и постановка задачи

Определение опытным путем однонаправленных композиционных материалов, упрочненных НК SiC и пироуглерода, по удельной жесткости и прочности не уступает по свойствам углепластику типа «Хай-фил».

Экспериментальные исследования

Проведенные исследования позволили экспериментально определить и оценить влияние различных факторов на свойства полимерных композиционных материалов.

В процессе опыта контролируруемыми величинами были геометрические параметры НК и содержание их в композиции.

На рис. 1 представлені експериментально отримані залежності між модулем пружності, прочністю композиційних пластиків, армованих хаотически розподіленими НК TiO_2 і AlN і їх об'ємним вмістом в композиції.

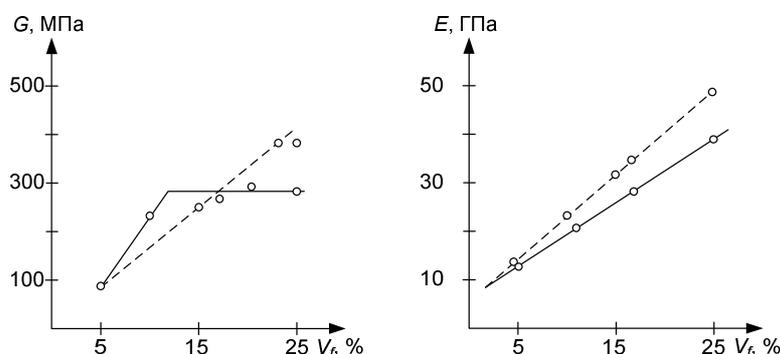


Рисунок 1 – Залежність: *a* – прочності і *b* – модуля пружності ізотропної композиції від ступеня наповнення

Аналіз отриманих даних показує, що модулі пружності композиції для обох видів наповнителей зростає пропорційно ступеню наповнення і досягають величин, рівних 44 – 49 ГПа при $V_f = 0,25$. Однак, лінійне зростання прочності до $V_f = 0,25$ спостерігається тільки для композицій, армованих TiO_2 . Предел прочності композицій з НК AlN росте до $V_f = 0,12-0,14$, після чого залишається на одному і тому ж рівні або незначительно підвищується, значительно отстаючи от расчетных значений. Причина цього явлення стане ясною, якщо детально розглянути вплив коефіцієнта передачі напружень l_k/l від матриці до волокна на прочність композиції.

Згідно з рівнянням (1) ефективність використання прочності волокна в композиції при умови його спільної деформації з матрицею враховується коефіцієнт середньої прочності Ω [10].

Відомо, що упрочнення матриці можливо, якщо довжина волокна $l \geq l_k$, так як тільки в цьому випадку деформація матриці забезпечує навантаження волокна до його пределу прочності.

Вивчені з рівняння значення l_k в досліджуваних композиціях склали 0,034 мм і 0,43 мм для НК TiO_2 і AlN відповідно. Середні значення довжин НК в початковому стані, отримані в результаті обробки методом варіаційної статистики кривих розподілення на основі 300 вимірювань склали: для TiO_2 – 0,25 мм і для AlN – 3,5 мм, коефіцієнт $\Omega = 0,95-0,96$. Однак, процес отримання композиції з підвищеним вмістом армуючого наповнителя зв'язаний з збільшенням ступеня упресовки матів з низькою щільністю, що призводить до спостережуваного зменшення НК.

На рис. 2 представлена залежність між середньою довжиною НК, вивлечених з композиції після вижигання матриці, і ступеню превращення.

Як встановлено, процес зменшення НК AlN йде більш інтенсивно, ніж у TiO_2 при отриманні композиції з однаковими ступенями наповнення. Середня довжина НК AlN зменшалась до 0,51 мм для $V_f = 0,25$, але во всіх випадках $l > l_c$ і волокна продовжали нести навантаження, хоча і менш ефективно, оскільки вплив l/l_c сказувалося все сильніше. Коефіцієнт Ω знизився з 0,95 до 0,59, що в свою чергу привело до порушення пропорційності між пределом прочності композиції і ступеню наповнення. Довжина НК TiO_2 в процесі пресовки практично не змінювалась і коефіцієнт середньої прочності залишався постійним.

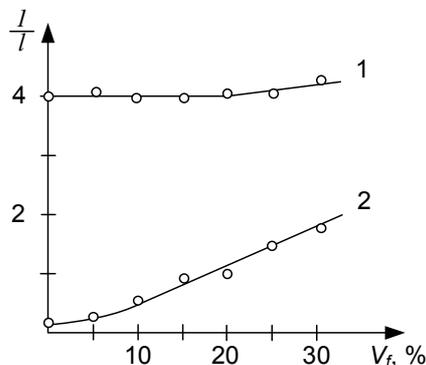


Рисунок 2 – Зміна довжин нитевидних кристалів TiO_2 (1) і AlN (2) в залежності від ступеня наповнення

В случае композиции с однонаправлено ориентированными НК пироуглерода, имеющими тот же диаметр, что и AlN, линейная зависимость между пределом прочности и объемным содержанием сохранялась на всех этапах армирования (рис. 3), а реализованная прочность составляла 75 % от σ_f .

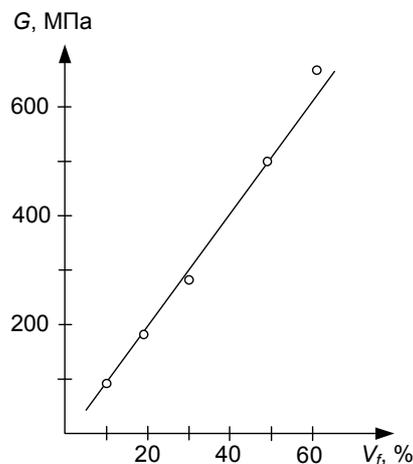


Рисунок 3 – Зависимость прочности композиции, армированной однонаправленно-ориентированным нитевидным пироуглеродом от степени наполнения

Однако, получение материалов с ориентированными НК TiO_2 и AlN представляло значительные технологические трудности, в первую очередь, связанные с их малыми размерами, хрупкостью, высокой жесткостью и твердостью.

Выводы

Таким образом, получение высокопрочных армированных пластиков возможно при условии использования прочных мелкодисперсных НК с соотношением $l/d > 1000$ и повышении степени наполнения до 50–70 % по объему при однонаправленной ориентации кристаллов.

Литература

1. Мостовой А.С. Разработка новых пожароопасных эпоксидных композитов с повышенным комплексом механических свойств / А.С. Мостовой, Е.В. Плакунова, Л.Г. Панова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2012.– №43.– С. 37–40.
2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб. пособие / М.Л. Кербер [и др.]; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 557 с.
3. Плакунова, Е.В. Модифицированные эпоксидные композиции / Е.В. Плакунова, Е.А. Татаринцева, Л.Г. Панова // Пласт. массы.– 2003.– № 2.– С. 39–40.
4. Микро- и наномир современных материалов [Электронный ресурс] / Хим. фак-т МГУ, каф. неорганической химии, лаборат. неорган. материаловеден.– 2006. – 69 с.– Режим доступа: http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/materials_mn/micro_and_nano_materials.pdf (дата обращения: 03.09.2014).
5. Шишелова Т.И. Нитевидные кристаллы / Т.И. Шишелова, Н.Е. Степанова, Д.А. Плынская, М.А. Беляева // Успехи современного естествознания. – 2009. – № 8 – стр. 12–13 [Электронный ресурс] Режим доступа: www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=7787444 (дата обращения: 03.09.2014).
6. Шаповрев В.П. Технологія неорганічних армуючих наповнювачів: дис. ... доктора техн. наук: 05.17.08 / Шаповрев Валерій Павлович. – Х., 1995 – 365 с.
7. Бокштейн С.З. Высокая прочность и проблемы нитевидных кристаллов / С.З. Бокштейн, С.Т. Кишкин, И.Л. Светлов // Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные труды. – М.: Наука, 2006. – С. 157–166.
8. Сайфулин Р.С. Неорганические композиционные материалы / Р.С. Сайфулин. – М.: Химия, 1983 – 364 с.
9. Коц Г.С. Наполнители для полимерных композиционных материалов: Пер. с англ. / Г.С. Коц, Д.В. Милевский; под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1981. – 736 с.
10. Композиционные материалы. Справочник / Д.М. Карпинос. – К.: Наукова думка, 1985. – 588 с.

Bibliography (transliterated)

1. Mostovoy A.S. Razrabotka novykh pozharoopasnykh epoksidnykh kompozitov s povyshennym kompleksom mekhanicheskikh svoystv. A.S. Mostovoy, E.V. Plakunova, L.G. Panova. Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo. – 2012. – №43. – P. 37–40.
2. Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: ucheb. posobiye. M.L. Kerber [i dr.]; pod red. A.A. Berlina. – SPb.: Professiya, 2008. – 557 p.
3. Plakunova, Ye.V. Modifitsirovannyye epoksidnyye kompozitsii. Ye.V. Plakunova, Ye.A. Tatarintseva, L.G. Panova. Plast. massy. – 2003. – № 2. – P. 39–40.
4. Mikro- i nanomir sovremennykh materialov [Elektronniy resurs]. Khim. fak-t MGU, kaf. neorganicheskoy khimii, laborat. neorgan. materialoveden. – 2006. – 69 p. – Rezhim dostupa: http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/materials_mn/micro_and_nano_materials.pdf (data obrashcheniya: 03.09.2014).
5. Shishelova T.I. Nitevidnyye kristally. T.I. Shishelova, N.E. Stepanova, D.A. Plynskaya, M.A. Belyayeva. Uspekhi sovremennoy yestestvoznaniya. – 2009. – № 8 – P. 12–13 [Elektronniy resurs] Rezhim dostupa: www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=7787444 (data obrashcheniya: 03.09.2014).
6. Shaporev V.P. Tekhnologiya neorganichnikh armuyuchi napovnyuvachiv: dis. ... doktora tekhn. nauk: 05.17.08. Shaporev Valeriy Pavlovich. – Kh., 1995 – 365 p.
7. Bokshteyn S.Z. Vysokaya prochnost i problemy nitevidnykh kristallov / S.Z. Bokshteyn, S.T. Kishkin, I.L. Svetlov. Sozdaniye, issledovaniye i primeneniye zharoprochnykh splavov: izbrannyye trudy. – M.: Nauka, 2006. – P. 157–166.
8. Sayfulin R.S. Neorganicheskiye kompozitsionnyye materialy. R.S. Sayfulin. – M.: Khimiya, 1983 – 364 p.
9. Kots G.S. Napolniteli dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov: Per. s angl. / G.S. Kots, D.V. Milevskiy; pod red. P.G. Babayevskogo. – M.: Khimiya, 1981. – 736 p.
10. Kompozitsionnyye materialy. Spravochnik / D.M. Karpinos. – K.: Naukova dumka, 1985. – 588 p.

УДК 548.5

Товажнянський Л.Л., Шапоров В.П., Шестопалов О.В., Пітак І.В.

ДЕЯКІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАСТИКІВ, АРМОВАНИХ НИТКОПОДІБНИМИ КРИСТАЛАМИ ТІО₂, ALN І SIC.

У статті досліджена можливість комплексного використання ниткоподібних кристалів в якості модифікуючої добавки для епоксидних композитів. Проведені дослідження показали можливість направлено-го регулювання фізико-механічних властивостей композиційних пластиків за рахунок зміни рецептурно-го складу армуючого матеріалу з доданням йому комплексу нових властивостей.

Tovazhnyansky L.L., Shaporev V.P., Shestopalov A.V., Pitak i.V.

SOME PROPERTIES OF THE PLASTICS WHISKER-REINFORCED BY TIO₂, ALN AND SIC

In this paper, complex use of whiskers as modifying additives of epoxy composites has been studied. Studies have shown the possibility of directed control of physical and mechanical properties of composition plastics, by changing the formulation of reinforcing material, giving it a complex of new properties.