

ВІСТНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

«Харківський політехнічний інститут»

Збірник наукових праць

Серія

41'2012

**«ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА ТА
ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА»**

**Видання засновано Національним технічним університетом
«Харківський політехнічний інститут» у 2001 році**

Державне видання

**Свідотство Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

КООРДИНАЦІЙНА РАДА:

Голова: Л.Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф.

Секретар: К.О. Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.;
Є.І. Сокол, член кор. НАН Укр, проф.;
Є.С. Александров, д-р техн. наук, проф.;
А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.;
М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;
А.І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.;
В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В.Д. Дмитренко, д-р техн. наук, проф.;
І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;
В.В. Єпифанов, к-т техн. наук, проф.;
Ю.І. Зайцев, к-т техн. наук., проф.;
П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.;
В.Б. Клепіков, д-р техн наук, проф.;
С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;
В.М. Кошелевик, д-р техн. наук, проф.;
В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;
Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;
В.С. Лупіков, д-р техн. наук, проф.;
О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.;
В.І. Николаєнко, канд. іст. наук, проф.;
П.Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;

В.А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;
М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.;
В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;
Ю.В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.;
М.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Відповідальний редактор:
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар:
Н.М. Юданова ст. викл.;
К.Л. Ноздрачова, канд. техн. наук, доц;

С.І. Сокол, член кор. НАН Укр, проф.;
В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
Б.В. Клименко, д-р техн. наук, проф.;
В.В. Воінов, канд. техн. наук, доц.;
Б.М. Горкунов, канд. техн. наук, доц.;
В.С. Лупіков, д-р техн. наук, проф.;
А.Г. Гурин, д-р техн. наук, проф.;
І.В. Тюпа, канд. техн. наук, доц.

Харків 2012

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. "Електроенергетика та перетворювальна техніка ". - Харків: НТУ «ХПІ» - № 41. – 2012. – 133 с.

Рекомендовано до друку Вченого радио НТУ "ХПІ";

Протокол № 7 від 06.07.2012 р.

А.Г. ЖУРИЛО, канд. техн. наук, НТУ "ХПІ", Харків

ІСТОРІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ НА УКРАЇНІ

У даній статті наводиться історія визначення властивостей металів в Україну. Зроблені деякі висновки щодо початку досліджень параметрів металу. В кінці розглянуті різні проблеми перспектив розвитку дослідження властивостей металів і сплавів

В данной статье приводится история определения свойств металлов в Украине. Сделаны некоторые выводы относительно начала исследований параметров металла. В конце рассмотрены различные проблемы перспектив развития исследования свойств металлов и сплавов

In this article приводится. the history of the beginning of determining the properties of metals in Ukraine. Has made some conclusions about the beginning of research of parameters of metal. At the end of the considered various problems of prospects of development of the studies of the properties of metals and alloys

Сьогодні сучасна лабораторія на підприємстві є не розкішшю, а необхідністю. Потреба в механічних та металографічних дослідженнях, визначені хімічного складу сплавів, контролі стану термічної обробки стало не виключенням з правил, а буднями машинобудівного та металургійного виробництва. Приладів для дослідження існує чимало, але історія їх появи, початок дослідження властивостей металу, його хімічного складу описано у науково-технічній літературі явно недостатньо, але визиває чималий не лише історичний, але і технічний інтерес.

З старих фільмів та книг добре відомо, що раніше основним засобом «механічних досліджень», які часто виконували при купівлі – продажу, були власні зуби, якими кусали монети з срібла або золота, визначаючи їх справжність.

Схоластична наука не могла породити металознавства, а ремісниче виробництво і мануфактура зі строго дотримуваною фамільною традицією і цеховою рецептурою не мали потреб в науковому обґрунтуванні своїх застиглих прийомів, вироблених протягом сторіч. Яскравим прикладом подібних точних рецептурних описів, при повній відсутності їхнього пояснення, є праці Георга Бауера (Агріколи) «De re metallica libri XII» (12 томів у 1550...1556 р.) та Вануччо Бірингуччо, дворяніна з Сієни, який був першим автором, що написав працю по металургії італійською мовою. Його праця «Pirotechnia», побачила світ в 1540 р. в Венеції в 10 томах. Ці книги присвячені гірничорудній справі, металургії, гончарному виробництву й іншим питанням технологій, що було для свого часу технічною енциклопедією. Праці Бірингуччо, крім свого історичного інтересу,

представляють особливу цінність тому, що наявні в ньому дані засновані на власних спостереженнях автора, що, наприклад, видно з одного місця першої книги, де він у втупі до даних про мідне ліття, говорить: «*Тому що я не володію ніякими іншими вказівками, крім тих, які я придбав власними очима, то я можу говорити з упевненістю*». [1, с. 70..81]. Сьогодні скласти собі приблизну картину про стан машинобудування, металургії та металознавства в середині XVIІ сторіччя можна тільки ретельно вивчивши праці Бирингуччо та Агриколи.

Аналіз загальної історії розвитку науки і промислового виробництва дає підстави для наближеного і, звичайно, трохи умовного поділу історії дослідження металів на наступні періоди.

Перший період – період підготовки до створення наукового металознавства (XVIII і перша половина XIX ст.) - характеризується невисоким рівнем техніки, невеликим масштабом виробництва металів у дуже обмеженому асортименті давно відомих сплавів, що застосовувалися у виробництві.

Досить указати, що пудлінгування з'явилося лише наприкінці XVIII ст., паровий молот – у середині XIX ст. (1842 р.), а щорічне виробництво чавуна на початку XIX ст. складало тільки 0,6 кг на людину, тобто було в сотні разів нижче сучасного рівня передових промислових країн. Загальне число сплавів, що застосовувалися, очевидно, не перевищувало 20..25, тобто їх було сотні раз менше, ніж у даний час. На такому рівні потреби виробництва легко задоволялися здавна виробленими чисто емпіричними рецептами і практика не пред'являла до науки вимог раціонального їхнього обґрунтування або розробки нових сплавів і методів їхньої обробки.

З іншого боку, загальний рівень розвитку основних природничих наук (фізики, хімії) ще не забезпечує базису для побудови спеціальної науки про природу металів.

Наприклад, в допетровській Росії по даним М.М. Рубцова [2] при купівлі – продажу міді з метою визначення її якості робили розріз, а для олова робили обпалювання вогнем. При Петрі I перевіряли гармати шляхом заряду в них полуторного, або, навіть подвійного заряду пороху. Якщо пушку не розривало, її визначали якісною. Знамениті російські сокири перевіряли на спроможність рубати цвяхи; холодну зброю – на переріз шовкової хустки під свою вагою, або подушки в польоті. Але все це було аматорськими дослідженнями, не підкріпленими науковою і, звичайно бувало так, що в однієї місцевості вироби з металу вважали якісними, а в іншої – ні. Звичайно, ні про які прилади для контролю металів навіть мова не йшла.

Початок знань про метал в Росії, а, відповідно і в Україні пов'язано з ім'ям Чарльза (Карла) Гаскойна, який приїхав у Росію за запрошенням російського уряду [2, с. 134, 156-157].

Гаскойн очолював кілька заводів у Росії – Олонецькі (Олександрійський та Кончезерський), а крім того, побудував у Росії в 1789 р. Кронштадтський ливарний завод (нині Кіровський завод у Санкт-Петербурзі), у 1801 р. – Санкт - Петербурзьку ливарну фабрику, а в 1799 році - Луганський завод - перший ливарний завод в Україні.

Навіть саме ім'я Гаскойна в сучасній літературі трактується по-різному. Наприклад, у роботі [1] його називають Г. Гаскойном, у роботі [3] його називають Карлом (Чарльзом), а в роботі [4] ініціалів Гаскойна не вказується. Ім'я Гаскойна не фігурує навіть у таких капітальних працях, як [5] і [6].

Безумовно, Чарльз Гаскойн, якого охрестили в Росії Карлом Карловичем, був досвідченим і вмілим інженером - по його креслениках були побудовані на Олександрівському заводі дві нові доменні печі з циліндричними повітродувками, шість повітряних (полум'яних) печей; він же побудував "так званий vogранок", або малу рухливу (точніше поворотну) шахтну піч; крім цього, він установив на заводі нову машину для свердління гармат (винахід Марія), що мав ряд переваг перед колишніми свердлильними машинами. [2, с. 156]. Вдало справившись із замовленнями військового відомства, Гаскойн організував на Олександрівському заводі виробництво чавунних лафетів, кухонного посуду, землеробських машин, а також художніх виробів: грат, ваз, статуй, колон, різних архітектурних прикрас і т.д.

З виливок, виконаних за цей час на Олександрівському заводі, можна відзначити грати для Асигнаційного банку в Петербурзі, парову машину для Войцької копальні, грати з колонами навколо обвідного каналу в Кронштадті (1797 р.), парові й інші машини для Монетного двору, ворота і грати для двору князя Михайла Павловича, бази для колон Казанського собору (1802 р.), перший у Петербурзі чавунний міст (Полтавський - 1806 р.), поручі на р. Мийці й інше. [2, с. 156-157].

Саме Чарльз Гаскойн організував на Луганському заводі першу лабораторію в Україні, руїни якої збереглися до початку ХХ століття [2, с. 23] і тому по праву повинен вважатися засновником дослідженням металів в Україні.

Технічне оснащення лабораторії сьогодні викликає посмішку, але й рівень знань наприкінці XVIII сторіччя істотно відрізнявся від сучасного. Згадаємо, що П.П. Аносов застосував мікроскоп для вивчення структури сталі лише в 1831 р., а перший навчальний заклад в Україні, де готували інженерів по металургії і металознавству (Харківський Технологічний інститут, нині НТУ "ХПІ"), було засновано тільки в 1885 році [8, с. 79].

Теоретичні ж представлення про природу чавуну до початку XIX сторіччя були досить недосконалі. Не тільки не було скільки-небудь правильного уявлення про вплив головних домішок до чавуна (кремнію,

марганцю, сірки та фосфору) на його властивості, але навіть і значення вуглецю не оцінювалося об'єктивно [2, с. 171].

Тільки в 1781 р. Г. Монж, Вандермонт і Бертоле визначили, що залізо, сталь і чавун не три різні метали, а лише видозміні того самого заліза, що розрізняються один від одного більшою або меншою домішкою вуглецю. М. Монж відкрив також, що наявність графіту в складі чавуна грає досить значну роль.

Рівень теоретичних знань того часу добре пояснює наступна характеристика чавуна, поміщена в спеціальному посібнику з артилерії [7]: «Чугун принимаем, как железную известь, от которой уголь в печи отнял большое количество кислотвора, от того приняла она металлический блеск, однако содержит еще несколько кислотвора, который делает его плавким и ломким. Если он состоит только из железных частиц и кислотвора, тогда он бывает бел и наиболее способен к обращению в железо; ежели в нем есть сверх того более или менее угля, тогда он бывает более или менее сер, имеет более крепости и способен к литью артиллерийских орудий».

З цієї цитати видно, що основним елементом, що визначає властивості чавуна, вважався кисень («кислотвор»), що цілком відповідало науці про чавун того часу.

Визначення сортів чавуна в ті часи вироблялося не по хімічному аналізу, якого ще не знали, а по «грі» чавуна під час охолодження спробних напівциліндрических брусків довжиною 150...180 мм, товщиною 30...35 мм. Коли чавун виливали у відкриту форму, то на поверхні його спостерігали «гру» тонкої скоринки шлаків. В міру остигання металу з'являлися зміни фарбування або гри, по яких і класифікували чавун.

Навіть більш, ніж 50 років потому після смерті Гаскойна видатний вітчизняний металург А.Ф. Мевіус (до речі, перший професор в Україні з металургії чавуна і сталі та колишній співробітник Харківського Технологічного інституту [9]) дає рекомендації про прийняті на Олонецьких, Луганському і іншими заводами практичних прийомах оцінки м'якості чавуна по грі металу на поверхні проби – «струмками або хвилями», «дрібними блискучими золотавими крапками», «вертунами», «плямами», «міхурами». [10, гл. 2...3].

Але ці перші роботи, що дали такі гарні результати, було припинено, і чавун, як матеріал для виробництва гармат, був, на жаль, забутий настільки, що багато чого з уже досягнутого довелося відкривати знову в наші дні. Причина такого явища полягала в тім, що із середини XIX сторіччя (1855-1865 рр.) у виробництві гармат, завдяки працям Круппа, почали широко застосовувати новий матеріал - литу сталь. [2, с. 141].

А на протязі усього XVIII ст. царює теорія флогістону, окисли вважаються простими, а метали хімічно складними тілами і навіть

наприкінці XVIII ст. відомий хімік К. Шеєле пише, що залізо складається з особливої землі, з'єдданої з флогістоном і теплотою.

У цей період майже не можна назвати імен учених, що цілком спеціалізувалися на вивчені металів. Однак у той час проведені деякі дослідження і сформульовані окремі розрізнені положення, використані згодом при створенні науки про метали. Такі, наприклад, роботи Р. Реомюра, що вимірював твердість різних сталей і чавуна шляхом царапання їх відомими мінералами і довів у 1722 р., що при цементації в залізо переходить якийсь компонент, що він помилково вважав летучою сіллю, а не вуглецем. Неправильність думки Р. Реомюра була виявлена лише сто років потому (у 1814 р.) К. Карстеном.

Значний внесок у науку про метали внесли праці М. В. Ломоносова (середина XVIII в.), які дали повне зведення наявних знань про метали, опис результатів спостереження процесу кристалізації («зернування») під мікроскопом, вимірювання пластичності замороженої ртуті й ін.

Революційним було відкриття структури залізних метеоритів на полірованих і протравлених шліфах, зроблене Томсоном (1804 р.) і Видманштеттом (1808 р.), дуже важливе для наступного вивчення структури літої і перегрітої сталі.

У літературі тієї епохи майже були відсутні видання, що спеціально відносяться до вивчення сплавів, хоча деякі зведення про них утримувалися в книгах іншого або більш широкого профілю.

Одна з перших російських друкованих праць «по практичному металознавству» називалася: «Про звучний металевий склад для створення дзвонів, чашок до бойових годинників та інших подібних знарядь», що була видана у 1806 р. у Петербурзі Академією наук.

Подальший розвиток металознавства в Росії на довгі роки був пов'язаний з Артилерійською академією в Петербурзі. Праці П.П. Аносова, виконані в 20-40 р. XIX в., експериментально обґрунтували характер зв'язку складу і будівлі сталі з її властивостями і способом обробки. Цим дослідженням установлено, що твердість загартованої сталі обумовлена змістом у ній вуглецю. П. П. Аносов систематично вивчив вплив ряду легуючих елементів на властивості сталі, розробив спосіб газової цементації, технологію одержання високоякісної сталі, застосував мікроскоп для вивчення структури останньої і відкрив метод обробки сталі холодом. Його видатна праця «Про булати» (1841 р.) була незабаром перевидана у Франції і Німеччині. Безсумнівно роботи П. П. Аносова дали ряд положень, використаних при побудові сучасної науки, що дозволяє його вважати одним з основоположників металознавства. Пріоритет П. П. Аносова в застосуванні мікроскопа для вивчення структури металу безсумнівний і здавна визнаний за кордоном.

Починаючи з другої половини XIX та в перші десятиліття XX сторіччя починається другий період - період створення і розвитку дослідження властивостей металів та сплавів.

Основоположники фотографії - винахідники Луї Дагер і Жорес Н'єпс (1839 р., Франція), Вільям Толбот (1840-41 рр., Великобританія), мабуть, не мали уявлення про можливість використання їх винаходів при вивчені структури металів.

У промисловості початок цього періоду відзначається бурхливим розвитком техніки, появою і швидким зростанням виробництва великих парових машин і котлів, металорізальних верстатів, металевих кораблів та сталевих гармат, будівництвом залізниць і мостів.

Швидко збільшується потреба у великих кількостях дешевого металу з різними заданими властивостями. Внаслідок цього бурхливо розвиваються нові методи масового виробництва літої сталі – на зміну тигельному методу виробництва сталі приходять конвертерний та мартенівський способи, будується потужні парові молоти і прокатні стани. З іншого боку, стає необхідним створення нових сортів сталі і сплавів з різними властивостями, уміння змінювати останні, свідомо вибирати режим обробки металів, об'єктивно оцінювати їхню якість і забезпечувати його у виробництві. Саме ці задачі ставило життя, і відповідю було створення основ визначення механічних властивостей та хімічного складу металів та сплавів.

Загальний стан основних природничих наук до цього часу вже забезпечувало фундамент побудови нової науки. Дійсно, до середини XIX ст. були встановлені основні закони класичної фізики і хімії, а незабаром (1869 р.) і періодичний закон Д. І. Менделєєва. Після того, як у 70-90 рр. XIX ст. були відкриті основні положення фізичної хімії і термодинаміки, наприклад, закон Рауля (1882 р.), правило фаз Гіббса (1874-1878 р.), введене поняття твердого розчину і сформульовані закони Вант Гоффа (1890 р.), металознавство, використовуючи їх, стало особливо інтенсивно розвиватися і вступило в період свого розквіту.

У Росії металознавчі дослідження велися здавна і стояли на високому рівні. Спочатку вони публікувалися в Гірському журналі (починаючи з перших десятиліть XIX ст.), Морському збірнику, Записках Русского технического общества (починаючи із середини XIX ст.) і працях інших наукових товариств (Фізико-хімічного товариства, Товариства технологів, Товариства досліджень матеріалів), працях декількох навчальних закладів, і, нарешті, у Журналі Російського металургійного товариства, що продовжували видаватися і після революції. Крім того, було опубліковано ряд монографій: серед перших з них слід зазначити праці А.О. Ржешогарського (1898 р.), який заснував першу російську металографічну лабораторію (у 1895 р.); курси М.Ф. Лабзіна – «Сплави» (1901 р.), Т.І. Тихонова в Томську – «Металеві сплави» (1903 р.) і

«Металографія» (1907 р.); капітальні курси М.Г. Євангulова і С.П. Вологдина (1905 р.), М.М. Вітторфа (1909 р.), О.О. Байкова (1911 р.) і ряд перекладних видань. У 1900 р. при Російському технічному товаристві була заснована Металографічна комісія, що обговорювала результати досліджень. У неї ввійшли Д.К. Чернов і М.С. Курнаков.

Винятково велике значення мала серія досліджень по фізико-хімічному аналізу, вивченю властивостей і побудові діаграм стану сплавів, виконаних М.С. Курнаковим і його численними учнями. Ці роботи, початі ще в 80-і роки XIX ст., з початку XX ст. стали охоплювати область металів та їхніх сплавів, а після революції одержали надзвичайно широкий розвиток і виконувалися десятками дослідників.

Сьогодні до послуг дослідників є чимало приладів та засобів визначення фізико-механічних властивостей. Це рентгенівські методи дослідження, спектральний аналіз, коли отриманий спектр інтерпретують за допомогою таблиць і атласів спектрів елементів і індивідуальних з'єднань та визначають зміст досліджуваної речовини по відносній або абсолютній інтенсивності ліній або смуг у спектрах; це і хімічні способи визначення складу сплавів, інші види якісних та кількісних методів.

Фізико-механічні властивості металів та сплавів досліджують за допомогою спеціальних машин, що визначають міцність та пластичність, щільність та прогин, твердість та мікротвердість.

Скасування кріпацтва привело до стрімкого розквіту промисловості, і, насамперед, до появи та розквіту металургійної галузі – так званих Південних заводів [10]. Незважаючи на той факт, що за винятком Сулинського завodu Пастиухових, усі інші мали іноземний капітал, саме ці заводи оказали чималий вплив на розвиток бази визначення властивостей металів та сплавів у нашій країні

Сьогодні важко знайти опис обладнання, яке є в наявності на підприємствах, бо в більшості випадків це є комерційною або навіть військовою таємницею. Але можна визначити обладнання та види аналізів, які проводилися на початку ХХ сторіччя на Південних заводах України. Ці заводи були на той час укомплектовані по останньому слову техніки, та давали близько 70% металургійної продукції Російської Імперії [13].

Всі дослідження, що вироблялися на Південних заводах, зводилися до:

- хімічного аналізу сировини і продуктів виробництва, а також ряду підсобних матеріалів і побічних продуктів виробництва;
- металографічному дослідженню металів;
- механічному дослідженню.

Порівняння лабораторій Макіївського, Юзівського, Донецько - Юрійовського, Таганрозького, Петровського й Олександрівського заводів дозволяє визначити, що устаткування цих заводів було приблизно однаковим. Про розподіл лабораторних робіт між окремими цехами і

загальним планом їх можна судити по наступним даним, що відносяться до лабораторії Юзівського заводу [16].

Доменний цех. Шлаки - визначення SiO_2 , Al_2O_3 , MnO і CaO - 4 проби щодня. Чавун - визначення Si , Mn - 16 проб щодня. Визначення P - 2 проби в тиждень. Колосникові гази - визначення CO_2 , CO , O_2 , CH_4 , H_2 - 4 проби в тиждень. Дим кауперів - визначення CO_2 , O_2 і CO - 4 проби в тиждень. Газ, що спалюється під паровими котлами - визначення CO_2 , O_2 і CO - 1 проба щодня. Дим з-під парових казанів - визначення CO_2 і O_2 - 1 проба щодня.

Вода, для парових котлів - визначення жорсткості неочищеної води, конденсату та очищеної води по 1 пробі щодня. Залізні руди - визначення SiO_2 , Fe і P - 3 проби щодня. Вапняк - визначення SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , P - 1 проба в тиждень.

Мартенівський цех. Сталь - визначення C , Mn , S , Si - 20 проб щодня. Визначення P - 1 проба в тиждень. Шлаки - визначення SiO_2 , FeO ; MnO , CaO , P_2O_5 - 1 проба щодня. Генераторний газ - визначення CO_2 , CO , CH_4 і H_2 - 1 проба щодня.

Рейкопрокатний цех. Генераторний газ - визначення CO_2 , CO , CH_4 і H_2 - 6 проб у тиждень. Вода - визначення жорсткості - 3 проби щодня. Дим парових котлів, що відходять - визначення CO_2 , CO і O_2 - 4 проби щодня.

Залізничний цех. Вода з водоочисника для парової - визначення жорсткості - 3 проби щодня. Вугілля - визначення вологи, летучих речовин, золи, сірки і теплотворної здатності - 50 проб на місяць. Водопостачання. Вода - визначення жорсткості - 15 проб на місяць. Повний аналіз - 18 проб у рік.

Рудники. Визначення вологи, летучих речовин, золи, сірки і теплотворної здатності у вугіллях - 25 проб на місяць. Кокс - визначення вологи і золи - 1 проба щодня. Визначення сірки - 1 проба на місяць. Водопостачання. Вода - визначення жорсткості - 20 проб на місяць. Повний аналіз - 24 проби в рік.

Матеріальний відділ. Залізні руди - визначення Fe , Si , P , вологи - 25 проб на місяць. Вапняки - визначення SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO - 3 проби на місяць. Каоліни і глини - визначення SiO_2 , Al_2O_3 , MgO і лутів - 6 проб на місяць. Кварц - визначення SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO ; MgO і втрат від прожарювання - 2 проби на місяць. Марганцеві руди - визначення Mn , Si і P - 4 проби на місяць. Кольорові метали - 24 проби на місяць. Мастильні матеріали - 5 проб на місяць.

Ливарний цех. Сталеві виливки - визначення C , Mn , S , Si - 4 проби щодня. Кам'яні валки - 3 проби в тиждень. Кольорові метали - 4 проби в тиждень.

Доменний цех. Визначення Si , CaO - 1 проба щодня. Визначення Si , Mn , S - 4 проби щодня, P - 1 проба в тиждень. Колосникові гази - визначення CO_2 , CO і O_2 - 1 проба щодня. Дим парових котлів - визначення

CO₂, CO і O₂ - 1 проба щодня. Вода для парових котлів - визначення жорсткості - 3 проби щодня. Залізні руди - визначення Fe, SiO₂ - 3 проби в день 2 рази в тиждень. Визначення P - 1 проба в тиждень.

Матеріальний відділ. Мастильні матеріали - 2 проби щодня. Кольорові метали - 4 проби на місяць.

Ливарний цех. Чавун - визначення Si, Mn, S - 25 проб на місяць. Кольорові метали - 1 проба в тиждень.

Завод мастильних матеріалів при лабораторії. Різних аналізів - біля 100 проб на місяць.

Таким чином, діяльність лабораторій полягала в тому, що вони висвітлювали з погляду хімічного складу, а отже і цінності, всі матеріали, що використовували на заводі, починаючи від сировини і закінчуючи готовими продуктами. Вартість одного аналізу в середньому по всіх заводах не перевищувала 30 коп. (у цінах 1913 року).

Металографічна лабораторія мала устаткування, яке практично усе було імпортного виробництва. Типове устаткування було наступним:

Горизонтальний мікроскоп Ле-Шател'є фірми «Пеллін» у Парижі з 6...8-ю об'єктивами Цейса й окулярів для збільшень від 2 до 2000 разів, мікроскоп висвітлювався лампою Хернста і був поєднаний з фотографічною камерою; фотографічна камера «De сaux» розміром 13x18 сантиметрів; пристрій «Саладина» для визначення критичних точок; шліфувальний верстат; полірувальне повстяне коло, поєднане з двигуном; електрична піч Гереуса для відпалу шліфів і термічної обробки; гальванометри Ле-Шател'є з термопарами і повним устаткуванням для вимірювання високих температур; 2-3 пріометра з гальванометрами; нафтова муфельна піч; мікроскопи Федорова і Мартенса; прес Гагаріна для механічного дослідження проб; пристрій проф. Курнакова для визначення критичних точок; елементи Грена (електричні батареї); реактиви для травлення металів і інших операцій.

Кількість зроблених робіт виражається наступними числами: у 1913 році зроблене від 45912 до 400000 різних досліджень (на різних заводах). Вартість дослідження складала від 47 коп. до 1,2 карбованця (у цінах 1913 року).

Механічна лабораторія Південних заводів, як правило, була обладнана наступними пристріями, що приводились в дію електричним двигуном у 8...12 кінських сил: розривний прес системи Фалькота з максимальним навантаженням у 50 тонн; розривний прес системи Деланос з максимальним навантаженням у 50 тонн; розривний прес системи Федергоф з максимальним навантаженням у 50 тонн; гідрравлічний прес системи Федергоф для статичних досліджень з максимальним навантаженням у 60 тонн; копер Шарпі для досліджень на удар; прес Бринеля для досліджень на твердість; дзеркальний пристрій Мартенса для визначення межі пружності; пріометр Феррі з гальванометром (до 1600 °C); розривний прес гідрравлічний

системи Буктон з максимальним навантаженням у 50 тонн, що приводився в дію електричним двигуном у 2,7 кінських сили; гідролічний прес Бринеля потужністю в 5 тонн; мікроскоп Цейса для виміру лунки, одержуваної при дослідженні по Бринелю; ручний свердлильний верстат, слюсарний верстат з тисками.

Кількість зроблених досліджень: у 1913 році склала близько 20000 на кожнім заводі. Вартість одного дослідження складала від 0,7 до 0,72 карбованця золотом (у цінах 1913 року). Для порівняння кошторису досліджень можна згадати, що кваліфікований робітник заробляв в 1912 році 400...420 золотих карбованців в рік [17].

Таким був початок досліджень металів в нашій країні.

Список літератури: 1. *Бек Т.* Очерки по истории машиностроения. ГТТИ, М.-Л. – 300 с., с. 70-81. 2. *Рубцов Н.Н.* История литейного производства в СССР. Т. 1, М., ГНТИ машиностроительной литературы, 1962.- 288 с. 3. *Фесенко В.О.* 130 років Луганського ливарного заводу. До ювілею першої домни на Україні. Будинок науки й техніки. Луганське, 1930.- 28 с. 4. Развитие металлургии в Украинской ССР. / З.И. Некрасов, Ю.А. Анисимов, В.В. Врублевский и др. К., Наукова думка, 1980. – 960 с. 5. Развитие литейного производства в Украинской ССР / К.И. Ващенко, А.М. Петриченко, Ю.А.Шульте. / Под ред. В.А. Ефимова. К., Наукова думка, 1988. - 376 с. 6. Зворыкин А.А. и др. История техники. М. 1962. - 780 с. 7. *Маркевич А.* Руководство к артиллерийскому искусству. СПБ. т. 1, 1820. 8. *Журило А.Г.*, А.Ф. Мевиус – первый профессор металургии чавуну і сталі в Україні. // Вестник Национального технического университета «ХПІ» № 8, 2008, С. 72 – 81. 9. *Мевиус А.Ф.* Чугунолитейное производство. Харьков, Типография университета, 1859. – 622 с. 10. *Журило А.Г.* Некоторые вопросы становления металлургии Юга России / Вестник НТУ «ХПИ» № 9, 2011. С. 52-61. 11. *Темник Ю.А.* Столетнее горное гнездо. Луганский завод (1795 — 1887 гг.) Луганск. 2001. 12. *Флеров А.В.* Материаловедение и технология художественной обработки металлов. М., Высшая школа, 1981, 228 с. 13. *Журило А.Г.* Первая мировая война как технологическая категория металлообработки. Металлургия Украины в начале XX века // Процессы литья, № 4, 2011. С. 67–73. 14. *Золоторевский В.С.* Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. - 350 с. 15. *Костин П.П.* Физико – механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов. М.: Машиностроение, 1990. - 255 с. 16. Металлургические заводы Юга России. Х.: Редакционно-издательский отдел УСНХ. – 506 с. 17. Вестник Металлопромышленности 1922 г., № 12. - с. 23

Надійшла до редакції 12.04.12

Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, докт. техн. наук, проф. СНУ ім. В.Даля, Северодонецьк;

О.В. КУЗНЕЦОВА, аспірант, СНУ ім. В.Даля, Северодонецьк;

О.В. ПОРКУЯН, докт. техн. наук, проф. СНУ ім. В.Даля, Северодонецьк

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПЛІВКОВОГО ВИПАРНОГО АПАРАТУ ЗА КОНЦЕНТРАЦІЄЮ УПАРЕНОГО РОЗЧИНУ

У роботі наведено результати теоретичних досліджень технологічних параметрів плівкового випарного апарату для аміачної селітри з врахуванням реологічних перетворень. Показано, що реологічні переходи викликають нелінійні явища, які впливають на роботу системи контролю та управління процесом випарювання у виробництві аміачної селітри.

В работе приведены результаты теоретических исследований технологических параметров пленочного выпарного аппарата для аммиачной селитры с учетом реологических преобразований. Показано, что реологические переходы вызывают нелинейные явления, которые влияют на работу системы контроля и управления процессом выпаривания в производстве аммиачной селитры.

The results of theoretical researches of technological parameters of film evaporator for ammoniac nitre taking into account rheological conversions are given in the work. It is shown that the rheological transitions cause nonlinear phenomena that affect to work of control system of evaporation process in production of ammoniac nitre.

Вступ. Процеси упарювання розчинів відносяться до складних, які супроводжуються реологічними перетвореннями, котрі засновані на перенесенні кількості маси, руху та теплової енергії [1,2]. Наявність реологічних перетворень призводить до зміни технологічних параметрів процесу, що впливає на точність контролю концентрації упареної аміачної селітри та управління процесом упарювання. Особливо це стосується процесів які супроводжуються одночасною зміною маси, тепла й кількості руху, що впливає на похиби вимірювального контролю, а відповідно відхилення процесу упарювання від оптимального режиму роботи [3]. У виробництві аміачної селітри розчин останньої, який створюється при нейтралізації азотної кислоти газоподібним аміаком, з концентрацією не нижче 80 відсотків підлягає упарюванню до 99,5-99,8 відсотків з подальшою її грануляцією [4]. Процес упарювання розчину аміачної селітри є двостадійним. Перша стадія упарювання відноситься до найбільш простої, при котрій розчин доводиться до кипіння у внутрішньому кип'ятильнику. На другій стадії упарювання використовується плівковий принцип, при якому розчин аміачної селітри вільно стікає у вигляді плівки по трубках, котрі нагріваються перегрітою парою. До основних технологічних параметрів, які підлягають вимірювальному контролю на цій стадії, відносяться витрати матеріальних потоків, теплоносія, температури кипіння, а також рівня упареного розчину. Однією з основних задач таких способів упарювання є

підтримання оптимальних співвідношень між основними технологічними параметрами, котрі визначаються шляхом вимірюваного контролю або розраховуються за відповідними алгоритмами.

Постановка задачі. Випарні апарати відносяться до багатопараметричних об'єктів, для яких основною технічною задачею є оптимізація процесу контролю та управління за рахунок стабілізації матеріального балансу та температурного поля. Для оптимізації управління технологічним процесом упарювання використовують, як правило, температурний режим, який є достатньо інерційним, а при наявності сильних збурюючих впливів призводить до появи процесів, котрі викликають відхилення від оптимального режиму роботи випарних апаратів [4,5]. Як показали експериментальні дослідження, управління процесом упарювання за температурною депресією та приростом різниці між вхідними та вихідними матеріальними потоками на ефективність технологічного процесу є сильнішим, ніж, наприклад, управління за зміною окремих технологічних параметрів. Другою задачею таких процесів є визначення впливу технологічних параметрів на результатуючий параметр випарного апарату, який визначає ефективність його роботи. При цьому основна увага звертається на автоматичне регулювання рівня та густини розчину у випарному апараті [4,6]. Для пілевкових випарних апаратів, які найчастіше використовуються на останніх стадіях упарювання аміачної селітри, одним з основних параметрів, котрі характеризують якісні показники є концентрація упареного розчину та його витрата.

Основна частина. У випарних апаратах з використанням зовнішнього тепла на упарювання розчину протікають тепло- і масообмінні процеси, які супроводжуються його розділенням на упарену речовину (субстант) та пароподібну фазу (вторинну пару), які постійно виводяться з апарату. Нехай у деякій області випарного апарату існує неоднорідне розподілення матеріальних речовин (упарюючого субстанту та парової фази). Позначимо неоднорідність розподілу потенціалу перенесення маси цього субстанту через $\phi(\bar{r}, \theta)$, де \bar{r} - вектор напрямленості руху перенесення маси у випарному апараті; θ - час перенесення. Це викликає відхилення від стану рівноваги упарюючого розчину і є причиною виникнення потоків перенесення, а відповідно, від оптимального режиму роботи випарного апарату. У цій області має місце макроскопічний рух субстанту й вторинної пари, який характеризується полем швидкостей $v(\bar{r}, \theta)$. Стоком потенціалу перенесення є упарений субстант густиною ρ_c і пара. В інтегральній формі умовою зберігання потенціалу перенесення маси розчину для деякого об'єму V буде наступне рівняння [3]

$$\int_V \frac{\partial \phi}{\partial \theta} dV = - \oint_S Q d\bar{f} + \int_V \gamma_c dV , \quad (1)$$

де S - поверхня упарювання; $d\bar{f} = \bar{n}d\sigma$ - елемент поверхні; \bar{n} - одиничний вектор елемента $d\sigma$; Q - сумарний потік перенесення маси; γ_c - швидкість стоку субстанту.

Для довільного об'єму розчину упарювання рівняння (1) матиме таку форму

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \operatorname{div} Q - \gamma_c = 0. \quad (2)$$

Враховуючи, що в результаті упарювання розчину створюються потоки перенесення субстанта та вторинної пари, то рівняння (2) можна записати в наступному вигляді

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \operatorname{div}(\varphi \bar{v}) = -\operatorname{div} \bar{q} + \gamma_c, \quad (3)$$

де \bar{q} - сумарний потік перенесення упареного розчину.

Якщо в деякому об'ємі випарного апарату має місце фізичне перетворення, котре є наслідком взаємодії розчину й теплою енергії, то, позначивши $\rho_p(\bar{r}, \theta)$ - поле густин в об'ємі розділення, $v(\bar{r}, \theta)$ - поле швидкостей і $\gamma_c(\bar{r}, t)$ - інтенсивність стоку упареного розчину в одиниці об'єму за одиницю часу t , рівняння перенесення приймає наступну форму

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial \theta} + \operatorname{div}(\rho_p \bar{v}) = \operatorname{div}(D \nabla \rho_p) + \gamma_c(t), \quad (4)$$

де D - коефіцієнт дифузії; t - час стоку упареного розчину.

Так як при упарюванні має місце макроскопічний рух розчину, а швидкість перенесення упареного розчину $\bar{v}(\bar{r}, \theta) > 0$, то, приймаючи до уваги односторонній характер перенесення руху упареного розчину та вторинної пари, рівняння (4) матиме вигляд

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial \theta} + v \frac{\partial \rho_p}{\partial \xi} = D \frac{\partial^2 \rho_p}{\partial \xi^2} + \gamma_c(t). \quad (5)$$

де ξ - умовний напрямок перенесення маси упареного розчину.

Інтенсивність стоку результату упарювання $\gamma_c(t)$ являє собою зміну маси упареної аміачної селітри, яка виводиться з випарного апарату за одиницю часу t і є його швидкістю. При $t \rightarrow \infty$ процес стоку упареної

аміачної селітри закінчується. Процес збільшення густини упареного розчину за рахунок виведення вторинної пари описується диференціальними рівняннями Фіка. Випарні апарати характеризуються наступними вихідними координатами, котрі підлягають стабілізації: концентрацією Q (або густину ρ_y) упареного розчину, температурою кипіння T , рівнем L розчину у випарному апараті та тиском P вторинної пари. Якщо процес упарювання аміачної селітри здійснюється при атмосферному тиску, а рівень L стабілізується за рахунок переливу, то такий випарний апарат характеризуватиметься двома координатами стоку: концентрацією (або густину) упареного розчину та температурою кипіння. У загальному випадку можна записати, що швидкість стоку упареного розчину аміачної селітри є функцією від швидкості стоку теплової енергії $\gamma_T(t)$, яка витрачається на упарювання, тобто $\gamma_c(t) = f[\gamma_T(t)]$. Як показано в [3,7], ця залежність установлюється сумісним рішенням рівняння матеріального балансу за концентрацією упареного розчину та теплового балансу і виражається наступним рівнянням

$$\gamma_c(t) = \frac{d}{dt} \left(\tau_2^2 \frac{d^2 \rho_y}{dt^2} + \tau_1 \frac{d \rho_y}{dt} + \rho_y \right), \quad (6)$$

де $\tau_1 = (\tau' + \tau'')$; $\tau' = \delta_V V_0 / F_{c0}$ - стала часу за зміною густини упареного розчину; $\tau'' = \delta_V m_k c_k T_0 / \Pi$ - стала часу за зміною температури упарювання; δ_V - відносна допустима зміна об'єму упареного розчину у випарному апараті; $V_0 = S L_0$ - номінальний об'єм упареного розчину в апараті; S - поперечний перетин апарату упарювання; L_0 - номінальний рівень упареного розчину в апараті; F_{c0} - номінальна витрата стоку упареного розчину; m_k - маса упареного розчину; c_k - питома теплоємність упареного розчину; T_0 - номінальна температура кипіння;

$$\Pi = c_k T_0 F_{c0} \rho_k \left[1 + 0,5 \frac{F_{n0}}{F_{c0}} \frac{c_n}{c_k} + r_p \frac{(r F_{T0} - F_{p0} c_p T_{p0})}{F_{c0} (c_p T_{p0} + c_k T_0)^2} \right] = c_k T_0 F_{c0} \rho_k K_\Pi;$$

ρ_k - густина упареного розчину; F_{n0} - витрата вторинної пари; c_n - питома теплоємність вторинної пари; r_p - теплота фазового переходу розчинника упарюючого розчину; r - теплота фазового переходу гріючої пари, яка

подається в кип'ятильник; F_{p0}, c_p, T_{p0} - витрата, питома теплоємність і температура свіжого розчину відповідно.

Сталі часу процесу стоку упареного розчину аміачної селітри дорівнюють:

$$\tau_1 = \delta_V K_{\tau_1} V_0 / F_{c0}, \quad (7)$$

де $K_{\tau_1} = 1 + m_k / V_0 \rho_k K_{\Pi}$;

$$\tau_2^2 = \delta_V^2 V_0^2 / F_{c0}^2 K_{\Pi}. \quad (8)$$

Підставивши рівняння (6) у (5), одержуємо

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial \theta} + D \frac{\partial^2 \rho_p}{\partial \xi^2} + v_p \frac{\partial \rho_p}{\partial \xi} = - \left(\tau_2^2 \frac{d^3 \rho_y}{dt^3} + \tau_1 \frac{d^2 \rho_y}{dt^2} + \frac{d \rho_y}{dt} \right). \quad (9)$$

При випарюванні розчину аміачної селітри мають місце тепло- і масообмінні процеси, як правило, незворотні й зазнають деформацію в області фазового переходу. Внутрішні переходи приводять до утворення упареної аміачної селітри з деяким приростом концентрації $\Delta Q = Q_y - Q_p$, де Q_y - концентрація упареного розчину; Q_p - концентрація аміачної селітри у свіжому розчині. Розглядаючи процес упарювання $\rho_p(\theta, \xi) = f(\xi)$ як деяку ступінчасту функцію від « a » до « b » (див. рис. 1, a), можна записати наступне рівняння

$$\rho_p(\xi) = \begin{cases} 1 & \xi \leq a; a < b; \xi \rightarrow x \\ 0 & \xi \geq b; a < \xi < b; \xi \rightarrow x \end{cases}.$$

Швидкість перенесення густини упареного розчину ρ_p у випарному апараті можна визначити за формулою $v_p = d\xi / d\theta$. Якщо процес масоперенесення здійснюється конвективно-кондуктивним дифузійним шляхом без стоку, то таке масоперенесення описуватиметься наступним рівнянням

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial \theta} = D \frac{\partial^2 \rho_p}{\partial \xi^2} + v_y \frac{\partial \rho_p}{\partial \xi}, \quad (10)$$

де D - ефективний коефіцієнт конвективно-кондуктивного дифузійного процесу; v_y - лінійна швидкість перенесення густини упареного розчину.

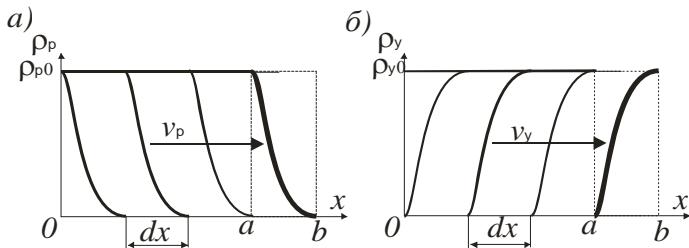


Рис. 1. Графіки функцій незворотних фазових переходів:
а) маси розчину аміачної селітри у випарному апараті;
б) маси стоку упареного розчину

Стоком буде процес накопичення упареної аміачної селітри (див. рис. 1, б). Цей процес теж проходить за координатою $\xi = x$, але за деякий час t . Швидкість накопичення упарених комплексів $v_y = dx/dt$ і практично визначається швидкістю дії теплоти на розчин. На рис. 2 показані криві зміни густини розчину аміачної селітри у випарному апараті $\rho_p(x, \theta)$ та упареної аміачної селітри $\rho_y(x, t)$ на виході з апарату. Процес упарювання розчину аміачної селітри є незворотним і описується наступною розривною функцією

$$\rho_y(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ 0 & x < a \end{cases}.$$

Зону, в якій проходить упарювання розчину аміачної селітри, можна описати інтегральною імпульсною δ -функцією Дірака. Згідно з теорією узагальнених функцій похідна ступінчастої функції приводить до символічної рівності

$$\delta(x) = \frac{d}{dx} f(x), \quad (11)$$

де $\delta(x)$ - інтегральна імпульсна дельта-функція Дірака; $f(x)$ - довільна функція, неперервна в околі $\xi = x_0$.

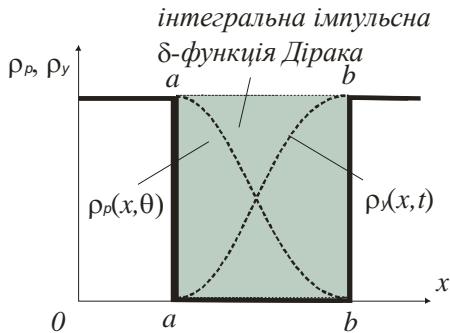


Рис. 2. Графіки функцій незворотних фазових переходів

Якщо функція $f(x)$ у рівнянні (9) описує процес упарювання розчину аміачної селітри, то інтегральна імпульсна δ -функція Дірака є асиметричною та описується таким інтегральним рівнянням

$$\int_{a+0}^b f(\xi) \delta(\xi - x_0) d\xi = \begin{cases} 0 & x_0 < a, x_0 \geq b \\ f(x_0 + 0) & a < x_0 < b \end{cases}. \quad (12)$$

Із визначення рівняння (12) випливає наступна несумісна умова дельта-функції Дірака

$$\delta(x) = 0, \quad x \neq 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\xi) d\xi = 1. \quad (13)$$

Рівняння (7) запишемо через масу $\beta = \rho_p (F_p + F_u) t_0$ упарюваного розчину і масу $\alpha = \rho_y F_y t_0$ упареної аміачної селітри, яка виводиться з апарату, де F_p, F_u, F_y - об'ємна витрата свіжого розчину, рециклу та упареного розчину відповідно; $t_0 = F_c / SL_0$ - час перебування розчину аміачної селітри в апараті. Тоді отримуємо

$$\frac{\partial \beta}{\partial \theta} + D \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial \beta}{\partial x} = - \frac{d}{dt} \left(\tau_2^2 \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \tau_1 \frac{d\alpha}{dt} + \alpha \right). \quad (14)$$

Позначимо $\varphi(t) = \frac{d}{dt} \left(\tau_2^2 \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \tau_1 \frac{d\alpha}{dt} + \alpha \right)$. Нехай функція $\varphi(t)$ є ступінчастою функцією згідно з рис. 2. Тоді похідна цієї функції

$\frac{\partial}{\partial t} \varphi(t) = \delta(t)$ є теж інтегральною імпульсною δ -функцією Дірака.

Виходячи з несумісності умови узагальненої дельта-функції Дірака, при $t = 0$ остання дорівнює нулю. Так як на границях « $a - a$ » і « $b - b$ »

інтегральної імпульсної дельта-функції Дірака $\frac{d\beta}{d\theta_a} = 0$, $\frac{d\beta}{d\theta_b} = 0$, $\frac{d\alpha}{dt_a} = 0$ і

$\frac{d\alpha}{dt_b} = 0$ (див. рис. 2), то рівняння (12) розділяється на систему з наступних

диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \theta} = -D \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2} + v_y \frac{\partial \beta}{\partial x}; \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\tau_2^2 \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \tau_1 \frac{d\alpha}{dt} + \alpha \right) = 0. \quad (16)$$

Через те, що область фазового переходу являє собою інерційну ланку, на вхід якої діє одинична ступінчаста функція $l(\theta)$, то з (16) отримуємо:

$$\tau_2^2 \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \tau_1 \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = l(\beta). \quad (17)$$

У рівнянні (15) приймемо, що складова $v_y \partial \beta / \partial x$ являє собою деяке умовне джерело маси розчину аміачної селітри, який постійно вводиться у випарний апарат та забезпечує додаткове масоперенесення маси β . Якщо прийняти, що це джерело є сталим, то можна записати:

$v_y \frac{\partial \beta}{\partial x} \approx v_y \beta / x = \beta S / F_p \theta \approx \frac{S}{F_p} \frac{\partial \beta}{\partial \theta}$. У результаті маємо

$$\left(v_y \frac{S}{F} + 1 \right) \frac{\partial \beta}{\partial \theta} = -D \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2}, \quad (\theta > 0, \quad 0 < x \leq x_0)$$

або

$$\frac{\partial \beta}{\partial \theta} = -D_{ek} \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2}, \quad (\theta > 0, \quad 0 < x \leq x_0), \quad (18)$$

де $D_{ek} = D / (1 + v_y S / F_p)$ - еквівалентний коефіцієнт дифузії упарюючої аміачної селітри.

Розв'язком рівняння (18) за граничних умов $\beta(0, x) = 0$, $\beta(\infty, x) = \beta_0$,
 $\frac{\partial \beta(\theta, x = x_0)}{\partial x} = 0$ буде

$$\beta(\theta, x) = \beta_0 \operatorname{erf}\left(x / 2\sqrt{D_{ek}\theta}\right). \quad (19)$$

Розкладши функцію $\operatorname{erf}\left(x / 2\sqrt{D_{ek}\theta}\right)$ рівняння (19) у ряд, та виключивши члени п'ятого і вищих порядків одержуємо вираз для маси речовини β у такій спрощеній формі

$$\beta(\theta, x) = k_0 \beta_0 \left(x / 2\sqrt{D_{ek}\theta}\right)^3, \quad (20)$$

де k_0 - деяка стала.

Так як стік упареного розчину на виході з випарного апарату є дійсною аперіодичною величиною, то диференціальне рівняння (17) має наступний розв'язок

$$\alpha(t) = \alpha_0 \left[1 - \frac{p_1}{p_1 - p_2} \exp(-p_1 t) + \frac{p_2}{p_1 - p_2} \exp(-p_2 t) \right], \quad (21)$$

де $p_{1,2} = -\frac{\tau_1}{2\tau_2^2} \pm \sqrt{\left(\frac{\tau_1}{2\tau_2^2}\right)^2 - \frac{1}{2\tau_2^2}}$ - корені характеристичного рівняння.

Аналіз коренів $p_{1,2}$ показує, що корінь $p_2 \ll p_1$, яким можна у першому наближенні знехтувати. Тоді, враховуючи рівняння (7) і (8), з (21) отримуємо

$$\alpha(t) \approx \alpha_0 \left[1 - \exp\left(-K_\alpha \frac{F_{c0}}{V_0} t\right) \right], \quad (22)$$

де $K_\alpha = K_{\tau_1} K_\Pi / \delta_V$.

Враховуючи, що відносне значення перенесеної маси аміачної селітри $\beta(\theta, x) / \beta_0$ повинно дорівнювати відносному значенню маси стоку $\alpha(t) / \alpha_0$, то прирівнявши (20) і (22), знаходимо

$$x = 2 \frac{\sqrt{D_{ek}\theta}}{k_0^3} \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)^{1/3} = 2 \frac{\sqrt{D_{ek}\theta}}{k_0^3} \left[1 - \exp\left(-\frac{F_{c0}}{V_0} K_\alpha t\right) \right]^{1/3}. \quad (23)$$

Концентрацію упареного розчину, який виводиться з випарного апарату можна визначити за формулою

$$\Delta Q = \alpha / F_y t_0 = \alpha / v_y S t_0 = \alpha / \pi v_y t_0 x^2 . \quad (24)$$

Підставивши (22) і (23) у рівняння (24) і враховуючи, що $D_{ek} = DF_p / (F_p - v_y S)$, $D\theta = L^2$ і $F_{c0} = \alpha_0 / t_0$, маємо

$$\Delta Q = \frac{k_0^6 F_{cm} \left(F_{po} - v_y S \right) \left[1 - \exp \left(- K_\alpha \frac{F_{c0}}{V_0} t_0 \right) \right]^{1/3}}{4\pi F_{po} v_y L^2} . \quad (25)$$

Рівняння (25) являє собою математичну модель плівкового випарного апарату за концентрацією упареного розчину. Час перебування t_0 розчину в апараті визначається кількістю свіжого розчину, яка поступає у випарну установку. Тобто можна записати, що $t_0 = V_0 / F_p$. Підставивши це рівняння в (25), маємо

$$\Delta Q = \frac{k_0^6 F_{cm} \left(1 - \frac{v_y S}{F_{po}} \right) \left[1 - \exp \left(- K_\alpha \frac{F_{c0}}{F_{po}} \right) \right]^{1/3}}{4\pi v_y L^2} . \quad (26)$$

Так як добуток $v_y S$ є нічим іншим як об'ємною витратою F_{co} стоку упареного розчину, то в кінцевій формі рівняння (26) приймає такий вигляд

$$\Delta Q = \frac{k_0^6 F_{cm} (1 - N_0) [1 - \exp(-K_\alpha N_0)]^{1/3}}{4\pi v_y L^2} , \quad (27)$$

де $N_0 = F_{co} / F_{po}$.

Ураховуючи, що масова витрата стоку упареного розчину $F_{cm} = \rho_0 F_{co} = \rho_0 v_y L^2$, то рівняння приймає наступну форму

$$\Delta Q = K_Q \rho_0 (1 - N_0) [1 - \exp(-K_\alpha N_0)]^{1/3} . \quad (28)$$

Приймаючи до уваги, що $(1 - N_0) = \Delta F / F_{po}$, а $N_0 = 1 - \Delta F / F_{po}$, то рівняння (28) можна записати в такій формі

$$\Delta Q = K_Q \rho_0 \frac{\Delta F}{F_{po}} \left[1 - \exp \left(- K_\alpha \left(1 - \frac{\Delta F}{F_{po}} \right) \right) \right]^{1/3} , \quad (29)$$

де $\Delta F = F_{po} - F_{co}$.

Рівняння (29) являє собою математичну модель плівкового випарного апарату за концентрацією упареного розчину, з якого випливає, що високу концентрацію упареного розчину можна отримати шляхом стабілізації співвідношення об'ємних витрат стоку F_{co} та свіжого розчину F_{po} . Як видно з (29), залежність $\Delta Q_y = f(\Delta F)$ близька до лінійної, що забезпечує високу точність управління таким процесом упарювання. Потрібно відмітити, що різниця витрат ΔF є функцією температури T упарювання, а відповідно й концентрація упареного розчину змінюватиметься в залежності від цієї температури. З рівняння (29) випливає наступний висновок. Якщо $F_{po} = const$, то концентрація упареного розчину повністю визначається різницею ΔF об'ємної витрати F_{po} свіжого розчину та витрати F_y упареного розчину.

Висновок. На основі теорії реологічних перетворень вперше показано, що масоперенесення розчину аміачної селітри суттєво впливає на технологічний процес плівкового упарювання. Процес плівкового упарювання повністю визначається відношенням об'ємних витрат упареного та свіжого розчинів, різниця яких залежить від температури кипіння. Для плівкових випарних апаратів немає необхідності контролювати рівень упареного розчину в апараті. Витрату свіжого та упареного розчину аміачної селітри, а також їх співвідношення можна визначати з достатньо високою точністю, що дозволяє вести постійний контроль за концентрацією упареного розчину опосередкованим методом, шляхом її розрахунку за відповідним алгоритмом. Результати досліджень можуть бути використані для розробки оптимізаційного контролю та управління випарними апаратами різного типу.

Список літератури: 1. Таганов И.Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса. – Л.: Химия, 1979. – 203 с. 2. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. – М.: Химия, 1974. – 688 с. 3. Стенцель Й.І. Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: Науковий журнал.–Луганськ, 2007.- №5 (111), Ч.2. – с. 91–96. 4. Миниович М.А. Производство аммиачной селитры. – М.: Химия, 1974. – 276 с. 5. Авт. Свид. СССР № 700546, кл. С 13 G 1/06, 1978. «Способ автоматического управления пленочным выпарным аппаратом». Авт. А.Н. Чагаров, В.Н. Филоненко, П.А. Прядко, А.П. Ладанюк. 6. Патент Российской Федерации № 2133023. Кл. G01N9/26. «Способ автоматического контроля уровня и плотности раствора выпарном аппарате». Авт. Живописцев В.А., Зыков Н.А., Морозов А.А., Назарова О.В., Солдатенко В.Ф., Скляров Г. Я., Столляр В.К. 7. Стенцель Й.І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування. – К.: ІСДО, 1993. – 328 с.

Надійшла до редакції 12.04.12

Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, докт. техн. наук, проф. СНУ ім. В. Даля, Северодонецьк;

О.І. ПРОКАЗА, аспірант, СНУ ім. В. Даля, Сєвєродонецьк;

О.В. ПОРКУЯН, докт. техн. наук, проф. СНУ ім. В. Даля, Северодонецьк;

К.А. ЛІТВІНОВ, студент СНУ ім. В. Даля, Сєвєродонецьк

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АПАРАТУ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ЗА ВИТРАТОЮ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ

У роботі наведено результати теоретичних досліджень технологічних параметрів апарату нейтралізації з врахуванням реологічних перетворень. Показано, що реологічні перетворення викликають нелінійні явища, які впливають на роботу системи контролю та управління процесом нейтралізації кислоти у виробництві аміачної селітри.

В работе приведены результаты теоретических исследований технологических параметров аппарата нейтрализации с учетом реологических преобразований. Показано, что реологические преобразования вызывают нелинейные явления, которые влияют на работу системы контроля и управления процессом нейтрализации кислоты в производстве аммиачной селитры.

The results of theoretical researches of technological parameters of neutralization apparatus taking into account rheological conversions are given in the work. It is shown that the rheological conversions cause nonlinear phenomena that affect to work of control system of neutralization process in production of ammoniac nitre.

Вступ. Технологічні процеси при нейтралізації кислоти у виробництві аміачної селітри супроводжуються реологічними перетвореннями, в основі яких є перенесення кількості маси, руху перетворюваних речовин та теплової енергії, яка створюється внаслідок екзотермічної реакції між неконцентрованою азотною кислотою та газоподібним аміаком [1-3]. Як показано в [3,4] наявність того чи іншого реологічного переходу призводить до зміни технологічних параметрів процесу, а відповідно до появи похибок управління процесом нейтралізації. Особливо це стосується хімічних процесів з одночасним перенесенням маси, тепла й руху матеріальних потоків, для котрих від точності вимірювального контролю залежить збереження оптимального режиму роботи [5]. Тому забезпечення точності вимірювального контролю при управлінні процесом нейтралізації кислоти у виробництві аміачної селітри є важливою науковою задачею.

Постановка задачі. Технічною задачею є оптимізація процесу управління багатопараметричним об'єктом, до якого відноситься апарат нейтралізації кислоти, за рахунок стабілізації температурного поля в склянці нейтралізатора кислоти. Задача вирішується стабілізацією температурного поля, яке визначається за різницею температури в реакційній зоні склянки апарату нейтралізації та температурою рорзчину аміачної селітри на виході з неї, за рахунок зміни витрати сокової пари, котра рециклом подається в

реакційну зону апарату нейтралізації. Для оптимізації управління технологічним процесом стадії нейтралізації азотної кислоти використовують, як правило, температурний режим, який є достатньо інерційним, а при наявності сильних збурюючих впливів призводить до появи процесів, що викликають відхилення від оптимального режиму роботи апарату нейтралізації. Як показали експериментальні дослідження, управління процесом нейтралізації за різницею між температурою в реакційній зоні і розчину аміачної селітри на виході зі склянки апарату нейтралізації на ефективність технологічного процесу є сильнішим, ніж, наприклад, управління за зміною потенціалу платинового електроду відносно стандартного хлорсербного, за рахунок того, що термопари встановлюються безпосередньо в реакційну зону (зону максимальної температури реакції) і в розчин аміачної селітри на виході зі склянки апарату нейтралізації [6].

Основна частина. В апаратах використання тепла нейтралізації (далі ВТН) виробництва аміачної селітри протікають масообмінні процеси, які супроводжуються хімічними перетвореннями. Нехай у деякій області апарату ВТН існує неоднорідне розподілення матеріальних речовин - неконцентрованої азотної кислоти й газоподібного аміаку. Позначимо неоднорідність розподілу потенціалу перенесення маси через $\varphi(\bar{r}, \theta)$, де \bar{r} - вектор напрямленості руху перенесення; θ - час перенесення. Це призводить до відхилення від стану рівноваги і є причиною виникнення потоків перенесення за рахунок хімічного перетворення. У цій області має місце макроскопічний рух речовини, який характеризується полем швидкостей $v(\bar{r}, \theta)$. Стоком потенціалу перенесення маси є розчин аміачної селітри об'ємною густиноро ρ . В інтегральній формі умовою зберігання потенціалу перенесення маси для деякого реакційного об'єму V буде наступне рівняння [3]

$$\int_V \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} dV = \oint_S q_\Sigma d\bar{f} + \int_V \gamma dV , \quad (1)$$

де S - реакційна поверхня об'єму; $d\bar{f} = \bar{n} d\sigma$ - елемент поверхні; \bar{n} - одиничний вектор елемента $d\sigma$; q_Σ - сумарний потік перенесення; γ - швидкість стоку.

Для довільного об'єму рівняння (1) матиме таку форму

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \operatorname{div} q_\Sigma - \gamma = 0 . \quad (2)$$

Враховуючи, що в результаті хімічної реакції створюються потоки перенесення розчину аміачної селітри, рівняння (2) можна записати в наступному вигляді

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \operatorname{div}(\varphi \bar{v}) = -\operatorname{div} \bar{q} + \gamma, \quad (3)$$

де \bar{q} - потік перенесення розчину аміачної селітри.

Якщо в деякому об'ємі апарату ВТН має місце хімічне перетворення, котре є наслідком взаємодії двох речовин, то, позначивши $\rho(\bar{r}, \theta)$ - поле густин, $v(\bar{r}, \theta)$ - поле швидкостей і $\gamma(\bar{r}, \theta)$ - інтенсивність стоку результату хімічного перетворення речовин в одиниці об'єму за одиницю часу t , рівняння перенесення приймає наступну форму

$$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} + \operatorname{div}(\rho \bar{v}) = \operatorname{div}(D \nabla \rho_i) + \gamma(t), \quad (4)$$

де D - ефективний коефіцієнт дифузії аміачної селітри.

Якщо має місце макроскопічний рух розчину аміачної селітри, а швидкість перенесення $\bar{v}(\bar{r}, \theta) > 0$, то, приймаючи до уваги односторонній характер перенесення руху розчину аміачної селітри, рівняння перенесення матиме вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \gamma(t). \quad (5)$$

Інтенсивність стоку результату хімічного перетворення $\gamma(t)$ являє собою зміну маси розчину аміачної селітри, яка виводиться з реакційної зони за одиницю часу t і є його швидкістю. При $t \rightarrow \infty$ цей процес стоку розчину аміачної селітри закінчується. Процес зменшення реагуючих речовин (неконцентрованої азотної кислоти й газоподібного аміаку) за рахунок хімічної реакції описується диференціальним рівнянням Фіка. Так як хімічне перетворення цих речовин є одностадійним, то для стоку можна записати наступну рівність

$$\gamma(t) = \tau_c \frac{d^2 \rho}{dt^2} + \frac{d\rho}{dt}, \quad (6)$$

де τ_c - стала часу стоку розчину аміачної селітри, яка залежить від концентрації реагуючих речовин, коефіцієнта хімічної активності, температурного режиму тощо.

Підставивши рівняння (6) в (5), одержуємо

$$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} + D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} = - \left(\tau_c \frac{d^2 \rho}{dt^2} + \frac{d \rho}{dt} \right). \quad (7)$$

При нейтралізації кислоти в апаратах ВТН мають місце хемосорбційні процеси, які є незворотними й зазнають деформацію в області фазового переходу. Внутрішні хімічні кінетики приводять до утворення розчину аміачної селітри, кількість якої позначимо символом α . Фізична модель хемосорбційного процесу створення розчину аміачної селітри показана на рис. 1.

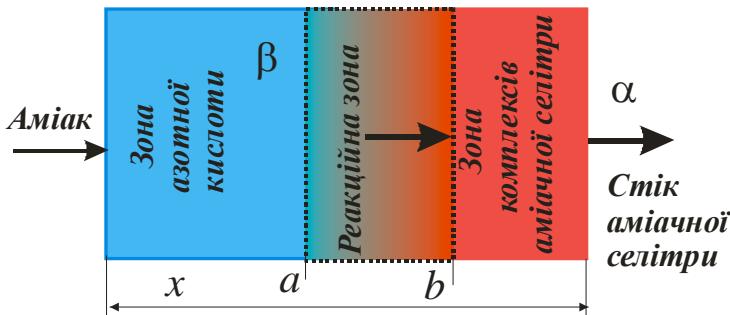


Рис. 1. Фізична модель хемосорбційного процесу нейтралізації кислоти

Фізичну модель умовно можна розділити на три частини: зона азотної кислоти, реакційна зона і зона розчину аміачної селітри. Якщо позначити β - масу неконцентрованої азотної кислоти в одиниці об'єму реакційної зони, то можемо отримати структурно-реологічні моделі цього процесу, які показані на рис. 2. Розглядаючи процес $\beta(\theta, x) = f(x)$ як деяку ступінчасту функцію від « a » до « b » (див. рис. 2, a), можна записати наступне рівняння

$$\beta(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a; a < b; \\ 0 & x \geq b; a < x < b \end{cases}.$$

Швидкість перенесення маси азотної кислоти β можна визначити за формулою $v_\beta = dx/d\theta$. Якщо процес масоперенесення здійснюється конвективно-кондуктивним дифузійним шляхом, то таке масоперенесення описуватиметься наступним рівнянням

$$\frac{\partial \beta}{\partial \theta} = D_{e\phi} \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2} + v_r \frac{\partial \beta}{\partial x}, \quad (8)$$

де $D_{e\phi}$ - ефективний коефіцієнт конвективно-кондуктивного дифузійного процесу; v_r - лінійна швидкість подачі газоподібного аміаку.

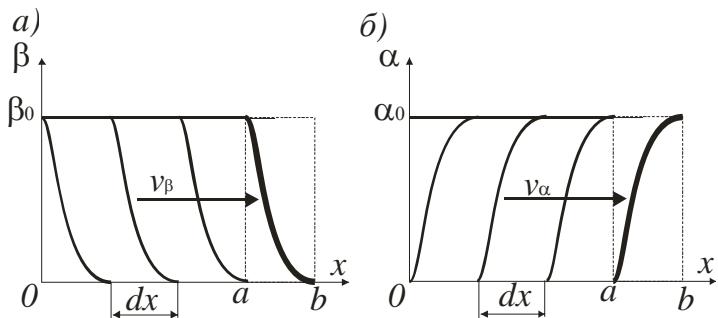


Рис. 2. Графіки функцій незворотних фазових переходів:

- a)* маси азотної кислоти;
- б)* аміачної селітри

Стоком буде процес накопичення комплексів α аміачної селітри (див. рис. 2, б). Цей процес теж проходить за координатою x , але за деякий час t . Швидкість накопичення комплексів аміачної селітри: $v_\alpha = dx/dt$ і практично визначається швидкістю хімічної реакції. На рис. 3 показані криві зміни маси азотної кислоти $\beta(x, \theta)$ і аміачної селітри $\alpha(x, t)$ у реакційній зоні апарату ВТН, які створюють умовну реакційну зону, которую назовемо інтегральною імпульсною δ -функцією Дірака. Процес створення комплексів аміачної селітри є незворотним і описується наступною розривною функцією

$$\alpha(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ 0 & x < a \end{cases}$$

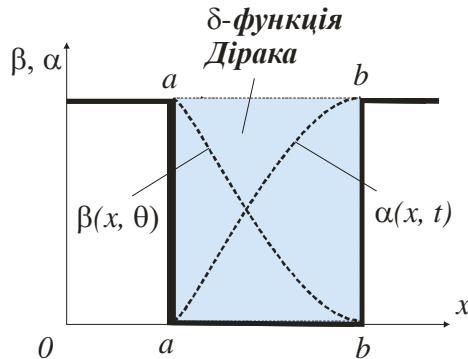


Рис. 3. Графіки функцій незворотних фазових переходів

Зону, в якій проходить хімічне перетворення азотної кислоти й аміаку, можна описати інтегральною імпульсною δ -функцією Дірака. Довжина фазового переходу залежить від концентрації реагуючих компонентів в

реакційній зоні та швидкості хімічної реакції. Згідно з теорією узагальнених функцій похідна ступінчастої функції приводить до символічної рівності

$$\delta(x) = \frac{d}{dx} f(x), \quad (9)$$

де $\delta(x)$ - інтегральна імпульсна дельта-функція Дірака; $f(x)$ - довільна функція, неперервна в околі $x = x_0$.

Якщо функція $f(x)$ у рівнянні (10) описує процес утворення сполук аміачної селітри, то інтегральна імпульсна δ -функція Дірака є асиметричною та описується таким інтегральним рівнянням

$$\int_{a+0}^b f(\xi) \delta(\xi - x_0) d\xi = \begin{cases} 0 & x_0 < a, x_0 \geq b \\ f(x_0 + 0) & a < x_0 < b \end{cases}. \quad (10)$$

Із визначення рівняння (10) випливає наступна несумісна умова δ -функції Дірака

$$\delta(x) = 0, \quad x \neq 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\xi) d\xi = 1. \quad (11)$$

Рівняння (7) запишемо через масу β азотної кислоти, яка вступає в хімічну реакцію, і масу α аміачної селітри, яка створилася в результаті цієї реакції. Тоді отримуємо

$$\frac{\partial \beta}{\partial \theta} + D \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^2} + v \frac{\partial \beta}{\partial x} = - \left(\tau_c \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{d \alpha}{dt} \right). \quad (12)$$

Позначимо $\varphi(t) = \tau_c \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{d \alpha}{dt}$. Нехай функція $\varphi(t)$ є ступінчастою

функцією згідно з рис. 3. Тоді похідна цієї функції $\frac{\partial}{\partial t} \varphi(t) = \delta(t)$ є теж інтегральною імпульсною δ -функцією Дірака. Згідно з теорією узагальнених функцій, $\delta(t)$ є символічною функцією, що дозволяє формально представити функціональне перетворення $\varphi(\xi) \rightarrow \varphi(x)$ як інтегральне, де ξ - умовна відстань масоперенесення. Виходячи з несумісності умови узагальненої дельта-функції Дірака при $t = 0$ остання дорівнює нулю. Так як на границях « $a - a$ » і « $b - b$ » інтегральної імпульсної дельта-функції Дірака $d\beta/d\theta_a = 0$, $d\beta/d\theta_b = 0$, $d\alpha/dt_a = 0$ і $d\alpha/dt_b = 0$ (див. рис. 3), то рівняння (12) розділяється на систему з наступних двох диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial \beta(x, \theta)}{\partial \theta} + D \frac{\partial^2 \beta(x, \theta)}{\partial x^2} - v \frac{\partial \beta(x, \theta)}{\partial x} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\tau \frac{d\alpha}{dt} + \alpha \right) = 0. \quad (14)$$

Через те, що область фазового переходу являє собою інерційну ланку, на вхід якої діє одинична ступінчаста функція $1(\theta)$, то з (14) отримуємо:

$$\tau \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = K_\alpha \beta(x, \theta). \quad (15)$$

де K_α - стехіометричний коефіцієнт.

При розв'язанні рівняння (13) можна прийняти, що складова $v\partial\beta/\partial x$ являє собою деяке умовне джерело маси азотної кислоти, яке постійно вводиться в реакційну зону та забезпечує додаткове її масоперенесення. Позначивши $\xi = F\theta/S$, де F - об'ємна витрата азотної кислоти; S - поперечний перетин конвективного потоку азотної кислоти, отримуємо

$$\left(v \frac{S}{F} + 1 \right) \frac{\partial \beta(x, \theta)}{\partial \theta} = -D \frac{\partial^2 \beta(x, \theta)}{\partial x^2}, \quad (\theta > 0, \quad 0 < x \leq x_0)$$

або

$$\frac{\partial \beta(x, \theta)}{\partial \theta} = -D_{ek} \frac{\partial^2 \beta(x, \theta)}{\partial x^2}, \quad (\theta > 0, \quad 0 < x \leq x_0), \quad (16)$$

де $D_{ek} = D/(1 + vS/F)$ - еквівалентний коефіцієнт дифузії азотної кислоти масою β .

Розв'язком рівняння (16) за граничних умов $\beta(0, \xi) = 0$, $\beta(\infty, \xi) = \beta_0$, $\frac{\partial \beta(\theta, x = x_0)}{\partial x} = 0$ буде

$$\beta(x, \theta) = \beta_0 \operatorname{erf} \left(x / 2\sqrt{D_{ek}\theta} \right). \quad (17)$$

Розкладавши функцію $\operatorname{erf} \left(x / 2\sqrt{D_{ek}\theta} \right)$ рівняння (17) у ряд, виключивши члени п'ятого і вищих порядків, одержуємо вираз для кількості речовини $\beta(x, \theta)$, яка надходить в область фазового переходу

$$\beta(x, \theta) = k_0 \beta_0 \left(x / 2\sqrt{D_{ek}\theta} \right)^{1/3}. \quad (18)$$

Так як стік результата фазового хімічного перетворення є дійсною величиною, то диференціальне рівняння (15) має наступний розв'язок

$$\alpha(t) = \beta(x, \theta)[1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (19)$$

Кількість речовини $\beta(\theta, x)$, яка вступає в реакцію, пропорційна кількості $\alpha(t)$ утворених сполук аміачної селітри. Тому, прирівнявши (18) і (19), знаходимо довжину реакційної зони

$$x = 5,31k_0\sqrt{D_{ek}\theta}[1 - \exp(-t/\tau)]^{1/3}. \quad (20)$$

Сталу часу стоку розчину аміачної селітри можна визначити з рівняння матеріального балансу, яке для області фазового переходу має вигляд

$$\frac{1}{F_M} \frac{d\alpha}{dt} = -k_a \beta(x, \theta)/\beta_0, \quad (21)$$

де F_M - масова витрата розчину аміачної селітри; k_a - коефіцієнт; $\beta(x, \theta)$, β_0 - кількість азотної кислоти, яка вступила в реакцію за час t і повна кількість азотної кислоти, яка поступає в апарат ВТН.

Виходячи зі сказаного і враховуючи, що $d\alpha = k_\beta d\beta$, отримуємо

$$\tau = \frac{k_\tau}{k_a} \frac{Q_k F_k}{Q_a F_A}, \quad (22)$$

де k_τ - узагальнений коефіцієнт сталої часу; Q_k , Q_a - масова концентрація азотної кислоти та аміаку відповідно; F_k , F_a - об'ємна витрата неконцентрованої азотної кислоти та аміаку відповідно.

Так як $k_a = k_0 \exp(-E/RT)$, де k_0 - стала (передекспоненційний множник); E - енергія активації; R - універсальна газова стала; T - абсолютна температура реакції, то помноживши ліву та праву частини рівняння (20) на швидкість v_c стоку аміачної селітри, а також прийнявши до уваги, що $D_{ek} = D/(1 + v_c S/F_k)$, $H = \sqrt{D\theta}$, маємо $F_c = v_c S = \pi v_c x^2$, або з врахуванням рівняння (20) маємо

$$F_c(t) = 28,2 \frac{H^2 v F_k k_0^2}{(F_k + vS)} \left\{ 1 - \exp \left[-t \frac{Q_k}{k_\tau Q_a} \frac{k_a F_k}{(F_k + vS)} \left(\frac{F_k}{F_a} \right) \exp \left(\frac{E}{RT} \right) \right] \right\}^{2/3}.$$

Якщо прийняти, що $F_k \equiv v_c S$ і позначивши $v_c S = k_v F_k$ то рівняння спрощується і приймає вигляд

$$F_c(t) = N_0 \left(H^2 v_c \right) \left\{ 1 - \exp \left[-t N_1 k_a \left(\frac{F_k}{F_a} \right) \left(\frac{Q_k}{Q_a} \right) \exp \left(\frac{E}{RT} \right) \right] \right\}^{2/3}, \quad (23)$$

де $N_0 = 28,2 k_0^2 / (1 + k_v)$; $N_1 = 1 / k_\tau (1 + k_v)$.

З рівняння (23) випливає, що до основних технологічних параметрів, за якими потрібно вести вимірювальний контроль, відносяться: об'ємні витрати F_k азотної кислоти та газоподібного аміаку F_a , співвідношення F_k / F_a , масові концентрації азотної кислоти Q_k та аміаку Q_a , їх співвідношення, а також температура T в реакційній зоні. Концентрація азотної кілоти згідно з регламетом може змінюватися практично від 40 до 60 відсотків, у той час, як концентрація аміаку є сталою. Так як масова витрата азотної кислоти $F_{km} = F_k Q_k$, а аміаку $F_{am} = F_a Q_a$, то, приймаючи до уваги, що процес нейтралізації забезпечується об'ємною витратою $F_k = k_k H^2 v_c$, де k_k коефіцієнт пропорційності, маємо

$$F_c(t) = N'_0 F_k \left\{ 1 - \exp \left[-t N_1 k_a \left(\frac{F_{km}}{F_{am}} \right) \exp \left(\frac{E}{RT} \right) \right] \right\}^{2/3}, \quad (24)$$

де $N'_0 = N_0 (H^2 v_c)$.

Таким чином, з рівняння (24) видно, що ефективність роботи апарату ВТН визначається витратою F_k азотної кислоти і залежить від співвідношення масових витрат азотної кислоти й аміаку, а також температури T в реакційній зоні. Залежність витрати розчину аміачної селітри від співвідношення витрат F_k / F_a є нелінійною. Для оптимального режиму роботи апарату нейтралізації, приймаючи до уваги, що час t є часом перебування кислоти в апараті ВТН, тобто $t = V_k / F_k$, рівняння (24) приймає наступну форму

$$F_c(t) = N'_0 F_k \left\{ 1 - \exp \left[-N_1 k_a \frac{V}{F_a} \left(\frac{Q_k}{Q_a} \right) \exp \left(\frac{E}{RT} \right) \right] \right\}^{2/3}. \quad (25)$$

Якщо врахувати, що $Q_k = \delta_k \rho_k$, $Q_a = \delta_a \rho_a$, $\delta_a \approx 1$, а відношення $n_\rho = \rho_k / \rho_a = const$, то рівняння (25) приймає вигляд

$$F_c(t) = N'_0 F_k \left\{ 1 - \exp \left[-N_1 k_a \delta_k n_\rho \frac{V}{F_a} \exp \left(\frac{E}{RT} \right) \right] \right\}^{2/3}. \quad (26)$$

Позначивши $N'_1 = N_1 k_a n_\rho V \left[m^3 / \varepsilon \right]$, маємо

$$F_c(t) = N'_0 F_k \left\{ 1 - \exp \left[- N'_1 \left(\frac{\delta_k}{F_a} \right) \exp \left(\frac{E}{RT} \right) \right] \right\}^{2/3}. \quad (27)$$

З рівняння (27) випливає, що процес нейтралізації кислоти можна вести за відносною концентрацією азотної кислоти, об'ємними витратами аміаку та азотної кислоти та температурою в реакційній зоні. Якщо температуру в реакційній зоні стабілізувати за рахунок зміни об'ємної витрати азотної кислоти, то процес нейтралізації можна вести за відношенням відносної концентрації азотної кислоти до об'ємної витрати аміаку.

Висновок. На основі теорії реологічних перетворень вперше показано, що масоперенесення реагуючих речовин суттєво впливає на характер процесу нейтралізації кислоти у виробництві аміачної селітри. Ефективність технологічного процесу повністю визначається обємною витратою неконцентрованої азотної кислоти й залежить від відношення масових концентрацій реагуючих речовин. До основних контролюючих технологічних параметрів, котрі визначають ефективність роботи апаратів ВТН, відносяться: масова витрата F_k азотної кислоти, масова витрата газоподібного аміаку, їх співвідношення, а також температура в реакційній зоні. Суттєвий вплив на процес нейтралізації, а також на ефективність роботи апаратів ВТН чинить концентрація азотної кислоти в її розчині.

Список літератури: 1. Таганов И.Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса. – Л.: Химия, 1979. – 203 с. 2. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. – М.: Химия, 1974. – 688 с. 3. Стенцель Й.І. Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: Науковий журнал. – Луганськ, 2007. - №5 (111), Ч.2. – С. 91 – 96. 4. Поркуян О.В., Стенцель Й.І., Проказа О.І. Реологічні моделі технологічного контролю параметрів з внутрішніми зв'язками у виробництві аміачної селітри. Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. «Електроенергетика и преобразовательная техника». – Харків: НТУ «ХПІ» - № 12. – 2010. – с. 21 – 28. 5. Стенцель Й.І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування. – К.: ІСДО, 1993. – 328 с. 6. Патент України 43404, С2, C01N27/48, 17.12.2001 «Спосіб автоматичного управління процесом нейтралізації кислоти у виробництві аміачної селітри в апараті використання тепла нейтралізації». Авт. Анохін А.О., Бєлік С.В., Довгалов Л.Ю., Паталаха В.В., Циглевський П.М., Чистоклестов М.В. 7. Миниович М.А. Производство аммиачной селитры. – М.: Химия, 1974. – 276 с.

Надійшла до редакції 12.04.12

Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, докт. техн. наук, проф. СНУ ім. В.Даля, Северодонецьк;

А.В. РЯБІЧЕНКО, аспірант, СНУ ім. В.Даля, Северодонецьк;

А.В. ТОМСОН, канд. техн. наук, стар. викл. СНУ ім. В.Даля, Северодонецьк

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ РІВНЯ РІДИННИХ СЕРЕДОВИЩ З КОМПЕНСУЮЧИМ СПРИЙМАЮЧИМ СИГНАЛОМ

У роботі наведено результати математичного моделювання фізичних процесів в ультразвукових засобах контролю рівня рідинних середовищ на основі теорії реологічних переходів та методі нульового градієнта. Показано, що в ультразвукових засобах контролю рівня мають місце перетворення ультразвукових сигналів, які описуються градієнтними нелінійними диференціальними рівняннями переносу імпульса енергії та руху. Одержано математичні моделі вимірювального та реперного каналів ультразвукових засобах контролю рівня рідинних середовищ.

В работе приведены результаты математического моделирования физических процессов в ультразвуковых средствах контроля уровня жидкых сред на основе теории реологических переходов и методе нулевого градиента. Показано, что в ультразвуковых средствах контроля уровня происходят преобразования ультразвуковых сигналов, которые описываются градиентными нелинейными дифференциальными уравнениями переноса импульса энергии и движения. Получены математические модели измерительного и реперного каналов ультразвуковых средствах контроля уровня жидкых сред.

The results of mathematical modeling of physical processes in ultrasound control device of liquid mediums' level based on the theory of reological conversions and the zero gradient method are given in the work. It is shown that the conversions of ultrasound signals occurred in ultrasound level control devices were described by gradient nonlinear differential equations of transferring pulse of energy and movement. The mathematical models of measuring and reference channels of ultrasound control devices of liquid mediums' level are received.

Вступ. В ультразвукових засобах контролю рівня (УЗКР) рідинних середовищ (РС) у більшості випадках використовуються п'єзокерамічні елементи (ПКЕ), які призначені для створення ультразвукових коливань (УЗК) [1 – 4]. Під дією електродинамічного зусилля (ЕДЗ), яке створюється електричним збуджуючим імпульсом (ЕЗІ), ПКЕ деформується подібно металевій мембрани, яка жорстко закріплена за периметром. Після припинення дії ЕДЗ ультразвуковий випромінювач (УЗВ) здійснює вільні механічні коливання, частота яких знаходитьться в ультразвуковому діапазоні [5]. З іншої сторони, механічні коливання наводять в УЗВ електрорушійну силу (ЕРС) з такою ж частотою, яка створює ЕДЗ, котре направлене протилежно до напрямку руху УЗВ, створюючи гальмувочу дію. За рахунок цього загасання коливань УЗВ здійснюється швидше, що призводить до формування короткого УЗС у формі інтегральної δ – функції Дірака, а також

є причиною додаткової нелінійності статичної характеристики УЗКР. Як правило, більшість УЗКР засновано на вимірюванні часу проходження ультразвукового сигналу (УЗС) подвійної відстані від УЗВ до поверхні РС. Точність таких УЗКР невелика, як правило, не перевищує 0,25 (абсолютна похибка складає 7 – 10 мм), а градуювальні характеристики мають суттєві нелінійні похибки вимірювального контролю. У багатьох випадках такі метрологічні характеристики є незадовільними, особливо при госпрозрахункових операціях. Тому підвищення точності вимірювального контролю та лінійності градуювальних характеристик у широкому діапазоні зміни рівня РС є актуальною задачею.

Постановка задачі. В УЗКР рідинних середовищ УЗВ одночасно служить як випромінювачем, так і приймачем УЗС. ЕЗІ амплітудою E_I перетворюється в УЗК, котрі після відбиття від поверхні РС перетворюються в сприймаючий електричний сигнал e_c . Так як реологічні перетворення здійснюються послідовно та розділені в часі, то створення ЕРС відстає від початку дії ЕЗІ E_I на час $t(L)$, де L - рівень РС в апараті. В УЗКР мають місце наступні перетворення УЗС, котрі описуються такими градієнтними нелінійними диференціальними рівняннями [6]:

1. Енергія ЕЗІ з амплітудою E_I перетворюється в електродинамічне зусилля $F_{\partial o}(\bar{r}_o, t_1)$ (зусилля Ампера), яке можна описати наступним рівнянням

$$f_1(\xi) = \frac{\partial E_I}{\partial \theta_1} = \operatorname{div}(D_E \nabla E_I) + \frac{dF_{\partial o}(\bar{r}_o, t_1)}{dt_1}, \quad (1)$$

де D_E - коефіцієнт перенесення електричної енергії в ЕДЗ; \bar{r}_o - вектор напрямку дії ЕДЗ; θ_1 - час перенесення ЕЗІ; t_1 - час стоку ЕДЗ.

2. ЕДЗ приводить до механічного руху мембрани УЗВ у напрямку x

$$f_2(\xi) = \frac{\partial F_{\partial o}}{\partial \theta_2} = \operatorname{div}(D_o \nabla F_{\partial o}) + \frac{x(\bar{r}_x, t_2)}{dt_2}, \quad (2)$$

де D_o - коефіцієнт перенесення ЕДЗ у переміщення x мембрани; θ_2 - час перенесення ЕДЗ; \bar{r}_x - вектор напрямку руху мембрани; t_2 - час стоку вимушеного переміщення мембрани.

3. Після припинення переміщення мембрани під дією ЕДЗ остання здійснює вільний механічний рух y_o мембрани УЗВ з ультразвуковою частотою. Такий реологічний перехід описується наступним градієнтним рівнянням

$$f_3(\xi) = \frac{\partial x}{\partial \theta_3} = \operatorname{div}(D_x \nabla x) + \frac{dy_o(\bar{r}_y, t_3)}{dt_3}, \quad (3)$$

де D_x - коефіцієнт перенесення кількості руху мембрани; θ_3 - час перенесення кількості руху; \bar{r}_y - вектор напрямку руху вільних коливань мембрани; t_3 - час вільних коливань мембрани.

УЗК, по-перше, викликають вимушений рух ПКЕ, а відповідно, створюють вторинну ЕРС e_1 , котра викликає гальмуочу дію мембрани УЗВ, а по-друге, - ці УЗК розповсюджуються в газовому середовищі (ГС) технологічного апарату, в котрому контролюється рівень. Ці два реологічні переходи походять паралельно.

4. Вторинна ЕРС e_1 , яка створюється в ПКЕ описується наступним градієнтним рівнянням

$$f_4(\xi) = \frac{\partial y_o}{\partial \theta_4} = \operatorname{div}(D_{y_o} \nabla y_0) + \frac{de_1(\bar{r}_{e_1}, t_4)}{dt_4}, \quad (4)$$

де D_{y_o} - коефіцієнт перенесення кількості руху УЗК в ПКЕ; θ_4 - час його перенесення; \bar{r}_{e_1} - вектор напрямку зміни вторинної ЕРС; t_4 - час стоку вторинної ЕРС.

5. Вторинна гальмуоча дія F_{∂_1} призводить до зменшення амплітуди основних УЗК на величину Δy_{∂_1} (п'ятий реологічний переход) і може бути описана таким градієнтним рівнянням

$$f_5(\xi) = \frac{\partial F_{\partial_1}}{\partial \theta_5} = \operatorname{div}(D_{\partial_1} \nabla F_{\partial_1}) + \frac{d\Delta y_{\partial_1}(\bar{r}_{y_{\partial_1}}, t_5)}{dt_5}, \quad (5)$$

де D_{∂_1} - коефіцієнт перенесення вторинного ЕДЗ мембрани УЗВ; θ_5 - час перенесення ЕДЗ; $\bar{r}_{y_{\partial_1}}$ - вектор напрямку руху мембрани; t_5 - час стоку вимушеної переміщення мембрани.

Таким чином, УЗК, які випромінюються в ГС технологічного апарату, в котрому контролюється рівень рідини, дорівнюватимуть

$$y_{\Gamma_0}(\bar{r}_{\Gamma}, t) = y_o(\bar{r}_y, t_3) - \Delta y_{\partial_1}(\bar{r}_{y_{\partial_1}}, t_5). \quad (6)$$

6. У ГС УЗК $y_{\Gamma}(\bar{r}_{\Gamma}, t)$ поглинаються за законом Бугера-Бера, створюючи шостий реологічний перехід, який можна описати таким градієнтним рівнянням

$$f_6(\xi) = \frac{\partial y_{\Gamma_0}}{\partial \theta_6} = \operatorname{div}\left(D_{y_{\Gamma_0}} \nabla y_{\Gamma_0}\right) + \frac{dy_{\hat{\sigma}_{\Gamma_1}}(\bar{r}_{y_{\Gamma_1}}, t_6)}{dt_6}, \quad (7)$$

де $D_{y_{\Gamma_0}}$ - коефіцієнт перенесення УЗК у ГС; θ_6 - час перенесення; $\bar{r}_{y_{\Gamma_1}}$ - вектор напрямку поглинання УЗК; t_6 - час стоку УЗК в газовому середовищі.

Для спрощення приймемо, що у прийнятому діапазоні частот УЗК рідинним середовищем не поглинаються (що підтверджується експериментальними дослідженнями) і практично повністю відбиваються від ПРС.

7. При проходженні УЗК $\Delta y_{\hat{\sigma}_{\Gamma_1}}(\bar{r}_{y_{\Gamma_1}}, t_6)$ від ПРС до УЗВ у газовому середовищі має місце реологічний перехід, який описується таким градієнтним рівнянням

$$f_7(\xi) = \frac{\partial y_{\hat{\sigma}_{\Gamma_1}}}{\partial \theta_7} = \operatorname{div}\left(D_{y_{\Gamma_1}} \nabla y_{\hat{\sigma}_{\Gamma_1}}\right) + \frac{dy_M(\bar{r}_M, t_7)}{dt_7}, \quad (8)$$

де $D_{y_{\Gamma_1}} = D_{y_{\Gamma_0}}$ - коефіцієнт перенесення УЗК у ГС; θ_7 - час перенесення; \bar{r}_M - вектор напрямку поглинання УЗК; t_7 - час стоку УЗК в газовому середовищі.

8. Так як мембрана жорстко зв'язана з ПКЕ, то в останньому появляється ЕРС e_c , котра поступає в запам'ятовуючий пристрій електричної вимірювальної схеми. Процес створення ЕРА терпить реологічний перехід, який описується таким рівнянням

$$f_8(\xi) = \frac{\partial y_M}{\partial \theta_8} = \operatorname{div}\left(D_M \nabla y_M\right) + \frac{de_c(\bar{r}_c, t_8)}{dt_8}, \quad (9)$$

де $D_M = D_{y_o}$ - коефіцієнт переносу УЗК у ГС; θ - час перенесення; \bar{r}_M - вектор напрямку поглинання УЗК; t - час перенесення ЕРС в ПКЕ.

Стоки енергії чи кількості руху являють собою швидкості зміни процесу перенесення і являють собою інтегруючі динамічні ланки. Враховуючи прийнятий однонаправлений характер перенесення енергії та кількості руху, градієнтні рівняння приводяться до наступної форми

- для першого реологічного переходу

$$\frac{\partial E_I}{\partial \theta_1} - D_E \frac{\partial^2 E_I}{\partial \xi_1^2} = \tau_1 \frac{d^2 F_{\hat{o}}}{dt_1^2} + \frac{dF_{\hat{o}}}{dt_1}; \quad (10)$$

- для другого реологічного переходу

$$\frac{\partial F_{\hat{o}}}{\partial \theta_2} - D_{\hat{o}} \frac{\partial^2 F_{\hat{o}}}{\partial \xi_2^2} = \tau_2 \frac{d^2 x}{dt_2^2} + \frac{dx}{dt_2}; \quad (11)$$

- для третього реологічного переходу

$$\frac{\partial x}{\partial \theta_3} - D_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi_3^2} = \tau_{32}^2 \frac{d^3 y_o}{dt_3^3} + \tau_{31} \frac{d^2 y_o}{dt_3^2} + \frac{dy_o}{dt_3}; \quad (12)$$

- для четвертого реологічного переходу

$$\frac{\partial y_o}{\partial \theta_4} - D_{y_o} \frac{\partial^2 y_o}{\partial \xi_4^2} = \tau_4 \frac{d^2 e_1}{dt_4^2} + \frac{de_1}{dt_4}; \quad (13)$$

- для п'ятого реологічного переходу

$$\frac{\partial F_{\hat{o}_1}}{\partial \theta_5} - D_{\hat{o}_1} \frac{\partial^2 F_{\hat{o}_1}}{\partial \xi_5^2} = \tau_{52}^2 \frac{d^3 y_{\hat{o}_1}}{dt_5^3} + \tau_{51} \frac{d^2 y_{\hat{o}_1}}{dt_5^2} + \frac{dy_{\hat{o}_1}}{dt_5}; \quad (14)$$

- для шостого реологічного переходу

$$\frac{\partial y_{\Gamma_0}}{\partial \theta_6} + D_{y_{\Gamma_0}} \frac{\partial^2 y_{\Gamma_0}}{\partial \xi_6^2} = \tau_6 \frac{d^2 y_{\hat{o}_{\Gamma_1}}}{dt_6^2} + \frac{dy_{\hat{o}_{\Gamma_1}}}{dt_6}; \quad (15)$$

- для сьомого реологічного переходу

$$\frac{\partial y_{\hat{o}_{\Gamma_1}}}{\partial \theta_7} + D_{y_{\Gamma_1}} \frac{\partial^2 y_{\hat{o}_{\Gamma_1}}}{\partial \xi_7^2} = \tau_7 \frac{d^2 y_M}{dt_7^2} + \frac{dy_M}{dt_7}; \quad (16)$$

- для восьмого реологічного переходу

$$\frac{\partial y_M}{\partial \theta_8} + D_M \frac{\partial^2 y_M}{\partial \xi_8^2} = \tau_8 \frac{d^2 e_c}{dt_8^2} + \frac{de_c}{dt_8}, \quad (17)$$

де $\xi_1 - \xi_8$ - напрямок перенесення; $\tau_1 = \tau_4 = \tau_8 = RC$ - стала часу; R, C - активний опір та ємність ПКЕ; $\tau_2 = \tau_6 = \tau_7 = \sqrt{mk_1/c_2^2}$ - стала часу; m - маса мембрани; k_1 - коефіцієнт демпферування; c_2 - жорсткість; $\tau_{31} = \tau_{51} = k_1/c_1$; $\tau_{31}^2 = \tau_{52}^2 = m/c_1$; $\tau_{e1} = \tau_{c1} = RC$.

Рівняння (10) – (17) є нелінійними. Тому для їх аналітичного розв'язку скористаємося методом нульового градієнта [7]. У результаті отримуємо наступні математичні моделі для реологічних переходів:

- для першого реологічного переходу

$$F_{\partial o}(t_1) = E_1 \left(k_1 \xi_1 / \sqrt{D_E \theta_1} \right) [1 - \exp(-t_1 / \tau_E)]^{1/3}; \quad (18)$$

- для другого реологічного переходу

$$x(t_2) = F_{\partial 0} \left(k_2 \xi_2 / \sqrt{D_{\partial} \theta_2} \right) [1 - \exp(-t_2 / \tau_x)]^{1/3}; \quad (19)$$

- для третього реологічного переходу

$$y_0(t_3) = x(t_2) \left(k_3 \xi_3 / \sqrt{D_x \theta_3} \right) \{ \exp(-\alpha_0 t_3) [\cos(\omega_0 t_3)] \}^{1/3}, \quad (20)$$

де $\alpha_0 = -\tau_{31} / 2\tau_{32}^2$ - ступінь загасання УЗК; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{32}^2} - \left(\frac{\tau_{31}}{2\tau_{32}^2} \right)^2}$ - частота

власних коливань мембрани;

- для четвертого реологічного переходу

$$e_1(t_4) = y_o(t) \left(k_4 \xi_4 / \sqrt{D_{y_0} \theta_4} \right); \quad (21)$$

- для п'ятого реологічного переходу

$$y_{\partial_1}(t_5) = e_1(t_4) \left(k_5 \xi_5 / \sqrt{D_{\partial_1} \theta_5} \right) [1 - \exp(-\alpha_1 t_5)] [\cos(\omega_0 t_5)]^{1/3}, \quad (22)$$

де $\alpha_1 = -\frac{\tau_{51}}{2\tau_{52}^2}$ ступінь загасання; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{52}^2} - \frac{\tau_{51}}{2\tau_{52}^2}}$ - частота власних

коливань;

- для шостого реологічного переходу

$$y_{\partial_{\Gamma_1}}(t_6) = y_{\Gamma_0}(t_5) \left(k_6 \xi_6 / \sqrt{D_{y_{\Gamma_0}} \theta_6} \right); \quad (23)$$

- для сьомого реологічного переходу

$$y_M(t_7) = y_{\partial_{\Gamma_1}}(t_6) \left(k_7 \xi_7 / \sqrt{D_{y_{\Gamma_1}} \theta_7} \right); \quad (24)$$

- для восьмого реологічного переходу

$$e_c(t_8) = y_M(t_7) \left(k_8 \xi_8 / \sqrt{D_M \theta_8} \right). \quad (25)$$

У загальному випадку коефіцієнти перенесення енергії та кількості руху D_i є функціями внутрішніх параметрів того чи іншого реологічного переходу, у тому числі залежать від температури, тиску, в'язкості тощо. Але враховуючи, що ці залежності, як правило, незначні, а аргументи функцій $erf(u)$ достатньо малі, то для інженерних розрахунків можна прийняти, що відношення $\xi_i / \sqrt{D_i \theta_i} \approx k_{iD}$. Так як власна частота коливань для всіх переходів є однакова, то прийнявши, що час стоку $t_1 = t_2 = t_4 = t_I$, де $t_I = const$ - час тривалості ЕЗІ, а також, що час реологічного переходу $t_6 = t_7 = J/c$, де J - відстань від УЗВ до поверхні рідини; c - швидкість УЗК у ГС. Окрім того врахуємо [8], що коефіцієнт тертя газового середовища $\beta = 53,38\pi\sqrt{MT}/r$, де M - молекулярна маса ГС; T - його температура; r - радіус мембрани; $\omega_0 = \beta/m$ - частота власних коливань мембрани при сприйнятті УЗК; де m - маса мембрани; $\alpha_0 = \omega_0^3 x_0/g$ - ступінь загасання УЗК. Так як процес проходження УЗК через ГС супроводжується поглинанням ультразвукової енергії, то аргумент експоненціальної функції рівнянь (23) і (24) збільшується на величину цього поглинання, яке дорівнює $A = \varepsilon_\lambda \rho J$, де ε_λ - молярний коефіцієнт світлопоглинання; $\rho = MP/zT$ - густина газового середовища; P, T - тиск і температура ГС; z - поправочний множник.

Згідно зі структурною схемою рис. отримаємо наступне рівняння для робочого вимірювального каналу

$$e_c = F_{\partial o} x (y_0 - e_1 y_{\partial 1}) y_{\partial \Gamma} y_M . \quad (26)$$

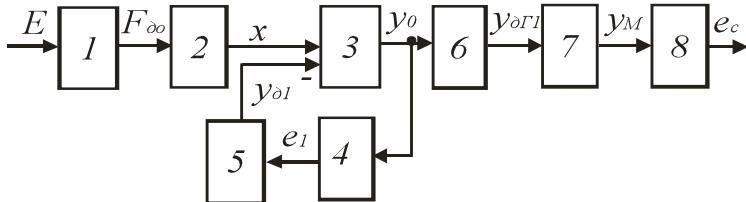


Рис. Структурна схема реологічних перетворень вимірювального каналу УЗКР

Ураховуючи обумовлене, з врахуванням (18 – 24) рівняння (26) набуває наступної форми

$$e_c = K_0 E_1 \left[1 - \exp \left(-2J \left(\frac{\alpha_2}{c} - \varepsilon_\lambda \frac{MP}{zT} \right) \right) \cos(\omega_0 t_0) \right]^{1/3} \times \\ \times \left\{ \left[1 - \exp \left(-\frac{t_I}{RC} \right) \right] \left[1 - \exp \left(-\frac{t_I c_2}{\sqrt{mk_1 / c_2^2}} \right) \right] \right\}^{1/3}. \quad (27)$$

де $K_0 = k_1 k_2 k_7 k_8 (k_3 - k_4 k_6)$ - узагальнений коефіцієнт передачі; $\alpha_2 = \alpha_0 - \alpha_1$.

При сташих внутрішніх параметрах УЗВ можна прийняти, що

$$\left\{ \left[1 - \exp \left(-\frac{t_I}{RC} \right) \right] \left[1 - \exp \left(-\frac{t_I c_2}{\sqrt{mk_1}} \right) \right] \right\}^{1/3} = E_{10} = \text{const}. \quad (28)$$

Прийнявши, що $\cos(\omega_0 t_0) \approx 1$, рівняння (27) спрощується і приймає такий вигляд

$$e_c = K_0 E_{10} \left[1 - \exp \left(-2J \left(\frac{\alpha_2}{c} - \varepsilon_\lambda \frac{MP}{zT} \right) \right) \right]^{1/3}. \quad (29)$$

З рівняння (29) видно, що залежність сприймаючого сигналу e_c УЗКР від зміни відстані J є нелінійною. З цього рівняння знайдемо відстань J :

$$J = \frac{zcT}{2(zT\alpha_2 - \varepsilon_\lambda cMP)} \ln \left[1 - \left(\frac{e_c}{K_0 E_{10}} \right)^3 \right]. \quad (30)$$

Для реперного каналу маємо

$$J_p = \frac{zcT}{2(zT\alpha_2 - \varepsilon_\lambda cMP)} \ln \left[1 - \left(\frac{e_{cp}}{K_0 E_{10}} \right)^3 \right]. \quad (31)$$

З рівнянь (30) і (31) випливає, що для забезпечення рівності $J = J_p$ необхідно, щоби були рівними аргументи логарифмічних функцій, або були рівними між собою сприймаючі сигнали e_c і e_{cp} . Так як $J = f(L)$, де L - рівень рідини в апараті, є лінійною функцією, то для забезпечення рівності $J = J_p$ необхідно виконати рівність $e_c = n e_{cp}$, де n - параметр, котрий визначає зміну сприймаючого сигналу робочого каналу відносно такого ж

сигналу реперного каналу, а відповідно зміну відстані J відносно J_p . Зі сказаного видно, що залежність $n = f(J) = f(L)$ є лінійною.

Висновок. У результаті досліджень УЗКР, які використовуються для вимірювального контролю рівня РС установлено, що при компенсації сприймаючого сигналу робочого каналу вимірювання за рахунок відповідної зміни сприймаючого сигналу реперного каналу статична характеристика такого УЗКР є лінійною. Теоретичні дослідження підтвердженні експериментальними [9]. Такі УЗКР мають незначні температурні та барометричні похибки, а також практично незалежні від зміни складу газового середовища. При такому принципі вимірювального контролю рівня задача може приводитися до оптимізаційної з одним або двома закріпленими кінцями (оптимізаційна задача Ейлера).

Список літератури: 1. Крым А.Е. Применение ультразвуковых уровнемеров в различных областях промышленности / А.Е. Крым // Сборник докладов семинара ЗАО «Взлёт». – Санкт-Петербург, 2007. – С. 97 – 100. Режим доступу: www.vzljot.ru/files/publications2007/014.pdf – Назва з титул.екрану. 2. Бабиков О.И. Контроль уровня с помощью ультразвука / О.И. Бабиков – Л.: Энергия, 1971. – 98 с. 3. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник / Перевод с английского Ю.А. Заболотной под ред. Е.Л. Свищова. – Москва: Техносфера, 2006. – 592 с. 4. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики / В.В. Малов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.: ил. 5. Датчики уровня акустические (ультразвуковые) ЭХО5-5Н и ЭХО-5Н-В [Электрон. ресурс] : Уровнемеры акустические (ультразвуковые) для жидких, сыпучих и кусковых материалов: Уровнемеры и ограничители уровня: Продукция / ОАО «Завод «СТАРОРУСПРИБОР». – Режим доступу: <http://staroruspribor.ru/catalog/741/> – Назва з титул.екрану. 6. Стенцель Й.І. Фізичні моделі перетворень в ультразвукових засобах контролю рівня рідинних середовищ / Й.І. Стенцель, А.В. Рябіченко, К.А. Літвінов // Весник національного технічного університету «ХПІ». Сборник наукових трудов «Електроенергетика і преобразовательная техника». – Харків: НТУ «ХПІ» - №19. -2011. – С. 3-18. 7. Стенцель Й.І. Математичні моделі ультразвукових рівнемірів рідин / Й.І. Стенцель, А.В. Томсон, А.В. Рябіченко // МНТЖ „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. –Хмельницький, 2006. №2 (28). – С. 55-58. 8. Рябіченко А.В. Математичні моделі ультразвукового рівнеміра рідини з компенсатором вихідних сигналів / А.В. Рябіченко, Й.І. Стенцель // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ «ХПІ» - № 48. – 2008. – С. 61-65. 9. Пат. 32894 Україна, МПК G01F23/28. Ультразвуковий рівнемір / Рябіченко А. В., Стенцель Й. І. - № 2007 13822; заявл. 10.12.2007; опубл. 10.06.08; Бюл. №11.

Надійшла до редакції 12.04.12

Й.І. СТЕНЦЕЛЬ, докт. техн. наук, проф. СНУ ім. В.Даля,
Сєвєродонецьк;
В.В. ЄВСЮКОВ, аспірант СНУ ім. В.Даля, Сєвєродонецьк;
А.В. ТОМСОН, канд. техн.наук, стар. викл. СНУ ім. В.Даля,
Сєвєродонецьк;
К.А. ЛІТВІНОВ, студент СНУ ім. В.Даля, Сєвєродонецьк

ДОСЛДЖЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ МЕТОДОМ ІНТЕГРАЛЬНОГО ФУНКЦІОНАЛУ

У роботі наведено результати досліджень похибок ультразвукових засобів контролю рівня методом інтегрального функціоналу. Показано, що градуувальна характеристика ультразвукових засобів контролю рівня є не лінійною з нерівномірним її розподілом уздовж діапазону вимірювального контролю. Нелінійність градуувальної характеристики обумовлена нелінійним розподіленням похибок вимірювального контролю. Визначення похибок вимірювального контролю для ультразвукових засобів контролю рівня з реперним пристроями зводиться до вирішення оптимізаційної задачі Ейлера з одним закріпленим кінцем, яка вирішується використанням методу інтегрального функціоналу.

В работе приведены результаты исследования погрешностей ультразвуковых средств контроля уровня методом интегрального функционала. Показано, что градировочная характеристика ультразвуковых средств контроля уровня является нелинейной с неравномерным распределением во всем диапазоне измерительного контроля. Не линейность градуировочной характеристики обусловлена нелинейным распределением погрешностей измерительного контроля. Определение погрешностей измерительного контроля для ультразвуковых средств контроля уровня с реперными устройствами сводится к решению оптимизационной задачи Эйлера с одним закрепленным концом, которая решается использованием метода интегрального функционала.

The results of researches of ultrasound level control device errors by the integral functional method are given in the work. It is shown that calibration characteristic of ultrasound level control device was nonlinear with maldistribution in whole measuring control range. Determination of measuring control errors of ultrasound level control device with reference unit is done by the solving the Euler optimization problem with one fixed end-point with using the integral functional method

Вступ. Метрологічні характеристики є тими параметрами, за якими оцінюють якість вимірювального приладу, перетворювача, пристрою чи засобу контролю [1, 2]. Одні вимірювальні засоби характеризуються статичною та градуувальною характеристиками й похибками вимірювання, інші, як наприклад, засоби неруйнівного контролю – похибками вимірювального контролю [3]. Статичні, а відповідно й градуувальні характеристики можуть бути як лінійними, так і не лінійними, у той час як градуувальні, як правило, є умовно лінійними, не лінійними зі заданою не лінійністю або лінійними [4, 5]. Наприклад, рівнеміри, у тому числі ультразвукові, згідно з відповідними нормативними документами [6,7] повинні мати лінійну градуувальну характеристику та забезпечувати певну точність вимірювального контролю. Якщо статичні характеристики засобів

вимірювання чи контролю є нелінійними, то градуюальні у більшості випадків лінеаризуються з тою чи іншою похибкою [8]. У таких випадках при зміні як внутрішніх, так і зовнішніх впливових факторів появляються не тільки адитивні та мультиплікативні похибки, але й суттєві нелінійні їх складові. У науковій літературі описуються різні методи дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювального контролю, котрі, в основному, зводяться до визначення абсолютнох похибок, як різниці між вимірюваним і дійсним значенням вимірювальної величини, визначення мультиплікативної складової, котра рахується, як правило, лінійною. Як показують експериментальні результати досліджень метрологічних характеристик різноманітних засобів вимірювального контролю, у тому числі й ультразвукових, їх статичні характеристики можуть бути не «гладко» нелінійними, тобто такими, для котрих похідна de/dx є знакозмінна, де e, x - вихідна та входна координата засобу контролю відповідно. Тому задача визначення та дослідження похибок вимірювального контролю є важливою та актуальною. Особливо це стосується засобів вимірювального контролю, які мають реперні пристрой для уведення поправок до результату цього контролю.

Ультразвукові рівнеміри мають реперний пристрій у вигляді металевої пластини або шайби, який викорис товується, як правило, для зменшення адитивної складової вимірювального (робочого) каналу, а фактично для приведення результату вимірювального контролю після подачі імпульсу ультразвукового сигналу (УЗС) до деякого нормованого значення [9 - 11]. Так як реперний пристрій (далі репер) розташовується на невеликій відстані від мембрани ультразвукового випромінювача (УЗВ), то УЗС спочатку відбивається від репера і сприймається ультразвуковим приймачем (УЗП), а тільки через деякий час цей же сигнал доходить до поверхні рідинного середовища (ПРС), відбивається від нього і сприймається тим же УЗП. Так як реперний і робочий сигнали випромінюються одним і тим же УЗВ і проходять через одне й теж газове середовище (ГС), то зміна електромеханічних параметрів УЗВ й фізико-хімічних параметрів газового середовища дещо компенсується. Але, враховуючи, що відстань від репера до ПРС є змінною, а робочий УЗС може поглинатися рідиною, то повної компенсації впливу збурюючих параметрів не відбувається. За рахунок цього градуюальна характеристика такого засобу контролю є умовно нелінійною з нерівномірним її розподілом уздовж діапазону вимірювального контролю.

Постановка задачі. В ультразвукових засобах контролю рівня (УЗКР) з реперним пристроєм при кожній подачі електричного збуджуючого імпульсу (ЕЗІ) створюється УЗВ пакет ультразвукових коливань (УЗК), тривалість котрих дорівнює часу вільних коливань його мембрани. Спочатку цей сигнал досягає поверхні реперного пристроя, відбивається від нього і сприймається ультразвуковим приймачем, яким у більшості випадків є той же УЗВ, і

створює сприймаючий електричний сигнал e_p . Той же пакет УЗК направляється в газове середовище технологічного апарату, доходить до ПРС, відбивається від нього і сприймається тим же УЗП, створюючи електричний сигнал e_c . Так як сигнали e_p і e_c розділені в часі, то вони запам'ятовуються у відповідних запам'ятувуючих пристроях вимірюальної системи (мікроконтролері) і визначається їх різниця $\Delta e = e_p - e_c$. Так як $e_c = f(L)$, то зі зменшенням рівня в технологічному апараті цей сигнал зменшуватиметься і при $e_c = 0$, що відповідає «насиченню» статичної характеристики вимірюального каналу, має місце перша точка «насичення» статичної характеристики ($L \geq L_{min}$). Якщо $\Delta e = 0$, тобто $e_p = e_c$, то має місце друге «насичення» статичної характеристики вимірюального каналу, яке відповідає умові $L \leq L_{max}$.

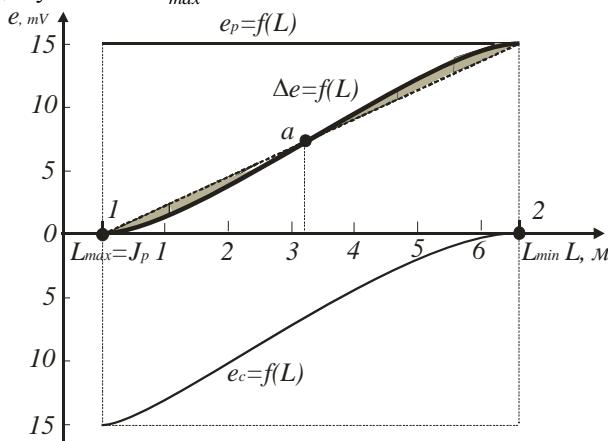


Рис. 1. Статичні характеристики: реперного каналу $e_p = f(L)$; робочого каналу без репера $e_c = f(L)$; робочого каналу з репером $e = f(L)$; лінеаризована (пунктирна)

Між кривою $e = f(L)$ і пунктирною є зона, яка називається зоною нелінійності, або зоною нелінійної похибки вимірюального контролю. При розробці засобу контролю з метою забезпечення мінімальної похибки нелінійності стараються, щоб точка «*a*» (оптимальна точка) на градуювальній характеристиці знаходилася приблизно посередині діапазону вимірювання. Під впливом різних внутрішніх і зовнішніх факторів оптимальна точка може зміщатися за діапазоном вимірювання як вліво, так і вправо, збільшуючи нелінійність у тій чи іншій частині шкали, а тим самим похибки вимірюального контролю. Як показали експериментальні дослідження ультразвукових засобів контролю рівня рідинних середовищ,

розподілення похибок вимірювання вздовж діапазону вимірювального контролю є нерівномірним, викликає значні труднощі їх визначення особливо в режимі їх промислової експлуатації. У звязку з цим, постає задача знайти ефективний спосіб визначення похибок вимірювального контролю за контролючими параметрами та враховувати їх у результаті вимірювання. При такій постановці задачі, коли повністю компенсиуються похибки вимірювального контролю тільки в одній точці, (у розглядуваному випадку в точці «1» при $L_{max} = J_p$, де J_p - відстань від УЗВ до реперного пристрою), а точка «2» є вільно плаваючою, то така задача відповідає оптимізаційній задачі Ейлера з одним закріпленим кінцем.

Основна частина. Критеріальне рівняння, яке описує оптимізаційну задачу для дослідження похибок УЗКР, має наступну форму [11]

$$\int_0^{L_2} e(L, v) dL \pm \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v)}{\partial v} (\delta v) dL - (0.5 \pm \delta_2) e_2 L_2 = 0, \quad (1)$$

де L_2, L - максимальна і поточна зміна рівня рідинного середовища; $e(L, v)$ - функція залежності сприймаючого сигналу у залежності від рівня L та впливаючого параметра v ; δ_2 - відносна похибка, яка притаманна відстані L_2 ; e_2 - сприймаючий сигнал, який відповідає рівню L_2 .

У рівнянні (1) варюючим параметром є впливаюча величина v та відносне відхилення δ_2 . Кожному значенню δ_2 відповідає така величина v , при котрій виконується рівність (1). Залежність $\Delta v = f(\delta_2)$ показує зміщення верхньої точки статичної характеристики засобу, а відповідно, відхилення останньої від її нормованого положення. Відхилення δ_2 може бути знайдено як відношення тої чи іншої складової абсолютної похибки або її повного значення до номінальної функції $f_0(L, v)$ при $L = L_2$. Впливаючим може бути як деякий індивідуальний параметр, наприклад, напруга живлення, температура, тиск або склад газового середовища тощо, так і узагальнюючий, яким може бути деяка сукупність фізичних параметрів, пов'язаних між собою певною функціональною залежністю. Виконамо дослідження основних похибок УЗКР, обумовлених різними індивідуальними та сукупними впливаючими факторами. Для номінальної статичної характеристики $\delta_2 = 0$, тому вона описуватиметься таким інтегральним рівнянням

$$\int_0^{L_2} e(L, v_0) dL \pm \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v_0)}{\partial v} (\delta v) dL - (0.5) e_{20} L_2 = 0, \quad (2)$$

де $e(L, v_0)$, e_{20} - поточне і максимальне значення вихідного сигналу УЗКР; v_0 - номінальне значення впливаючого параметра.

Графічне пояснення методу інтегрального функціоналу показано на рис. 2, де: $S_0 = e_2 L_2$ - площа обмежена максимальним значенням відстані L_2 і вихідним сигналом e_2 , який відповідає відстані L_2 ;

$$\Delta S(v_0, L) = \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v_0)}{\partial v} (\delta v) dL$$

- площа, яка обмежена змінними параметрами

$$v \text{ i } L \text{ (на рис. 2 показана темною заливкою); } S(L) = \int_0^{L_2} e(L, v_0) dL$$

- площа, яка обмежена номінальною статичною характеристикою.

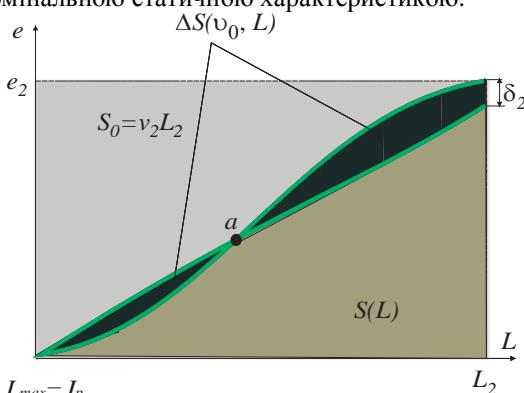


Рис. 2. Графічне пояснення методу інтегрального функціоналу

Для оптимізаційної задачі з одним закріпленим кінцем, коли початкова відстань $L_{max} - J_p = 0$, площа під лінійною статичною характеристикою $S_0 = 0,5e_{20}L_2$. Для абсолютно лінійної статичної характеристики при $v = v_0 = kL$, де k - деяка стала, маємо

$$\int_0^{L_2} e(L, v_0) dL - (0,5)e_{20}L_2 = 0. \quad (3)$$

Другий інтеграл у рівняння (2) характеризує вклад нелінійної складової на характер статичної характеристики засобу контролю. Так як в основу дослідження похибок покладена класична оптимізаційна задача з одним закріпленим кінцем ($L_{max} - J_p = 0, \Delta e = 0$) то при зміні різних впливаючих факторів змінюватиметься тільки вільний кінець статичної характеристики при $L_2 = L_{min}$, $\Delta e(L_2) = \text{var}$. Відносною похибкою δ_2 може бути як

мультиплікативна так і нелінійні складові загальної похибки контролю, котрі можуть бути визначені варіаційним методом [13]. Загальна похибка такого засобу складається з мультиплікативної, нелінійної квадратичної та нелінійної кубічної складової. Для цих похибок можна записати наступні рівняння:

$$\Delta_{\mu} = K_{\mu}(v_0)\Delta_v, \Delta_{H2} = K_{H2}(v_0)\Delta_v^2, \Delta_{H3} = K_{H3}(v_0)\Delta_v^3. \quad (4)$$

Так як у методі інтегрального функціоналу використовується відносна похибка контролю, то доцільно загальну похибку контролю записати у такій формі

$$\delta_{\Sigma} = K_{\mu}^0 \delta_v + K_{H2}^0 \delta_v^2 + K_{H3}^0 \delta_v^3, \quad (5)$$

$$\text{де } \delta_{\Sigma} = \frac{\Delta_{\Sigma}}{e(L_2)}; \quad \delta_v = \frac{\Delta_{\mu}}{v_0}; \quad \delta_{H2} = \left(\frac{\Delta_{H2}}{v_0} \right)^2; \quad \delta_{H3} = \left(\frac{\Delta_{H3}}{v_0} \right)^3;$$

$$K_{\mu}^0 = K_{\mu}(v_0) \frac{v_0}{\Delta e(L_2)}; \quad K_{H2}^0 = K_{H2}(v_0) \frac{v_0^2}{\Delta e(L_2)}; \quad K_{H3}^0 = K_{H3}(v_0) \frac{v_0^3}{\Delta e(L_2)}.$$

Ураховуючи рівності (4) для похибок вимірювального контролю отримуємо наступні рівняння:

- для мультиплікативної складової

$$\int_0^{L_2} e(L, v) dL + \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v)}{\partial v} (\delta v) dL - (0,5 \pm K_{\mu}^0 \delta_{\mu}) e(L_2) L_2 = 0; \quad (6)$$

- для нелінійної квадратичної складової

$$\int_0^{L_2} e(L, v) dL + \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v)}{\partial v} (\delta v) dL - (0,5 \pm K_{H2}^0 \delta_{H2}^2) e(L_2) L_2 = 0; \quad (7)$$

- для нелінійної кубічної складової

$$\int_0^{L_2} e(L, v) dL + \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, v)}{\partial v} (\delta v) dL - (0,5 \pm K_{H3}^0 \delta_{H3}^2) e(L_2) L_2 = 0; \quad (8)$$

Виконамо дослідження похибок вимірювального контролю для ультразвукового ЗКР з компенсуючим входним сигналом. Рівняння статичної характеристики має вигляд

$$e_c(L, n) = K_{L0} e_p \left\{ 1 - \frac{L}{H} \left(\frac{H}{L} - 1 \right) \left[1 + n L \left(\frac{H}{L} - 1 \right) \right] \right\}, \quad (9)$$

де $K_{L0} = \frac{K_L}{1 + D_2 \left(1 - \left(\left(53,38 \pi \frac{T_C}{rm} \sqrt{\frac{\gamma_C}{P_C}} \right)^3 D_1 \right) \right)}$; $K_L = H / J_p$;

$$n = \frac{1}{2\varepsilon} \left(1 - \left(\left(53,38 \pi \frac{T_C}{rm} \sqrt{\frac{\gamma_C}{P_C}} \right)^3 D_1 \right) \right); \quad e_p - \text{сприймаючий сигнал за реперним}$$

каналом; H - відстань від УЗВ до дна апарату; T_C, P_C, γ_C - температура, тиск і густина газового середовища відповідно; r, m - радіус і маса мембрани УЗВ; ε_λ - молярний коефіцієнт поглинання УЗК газовим середовищем; D_1, D_2 - коефіцієнти перенесення кількості руху та ультразвукової енергії відповідно.

Критеріальне рівняння (1) для статичної характеристики запишемо таким чином

$$\int_0^{L_2} e(L, n_0) dL \pm \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, n_0)}{\partial n} (\delta n) dL - (0,5 \pm k \delta_n) e_2 L_2 = 0, \quad (10)$$

де $n = e_c / e_p$ - коефіцієнт відношення сприймаючого сигналу робочого каналу до сприймаючого сигналу реперного каналу; n_0 - градуувальне значення цих сигналів.

Нехай найбільш сильними впливаючими (варюючими) параметрами є k і n . Діапазон зміни рівня L змінюється від репера (максимальний рівень рідини) до дозволеного за технологічним регламентом рівня L_2 (мінімальний рівень рідини). Залежність $S = f(J)$ приведена на рис. 3, з якого видно, що критеріальні точки (a_1, a_2, a_3, a_4) для пропорційних відстаней відповідно: $J = 6 \text{ м}$, $J = 4,5 \text{ м}$, $J = 3 \text{ м}$, $J = 1,5 \text{ м}$, де J - відстань від реперного пристрою до поверхні рідинного середовища, розподілені за шкалою нерівномірно. Таке розподілення критеріальних точок свідчить про те, що формально статична характеристика є нелінійною, яка збільшується зі збільшенням рівня J . Залежності $\Delta S_n = f(J)$, які обумовлені зміною параметра n , для таких же відстаней (критеріальні точки b_1, b_2, b_3, b_4) показані на рис. 4. Залежність $\Delta S_n = f(J)$ є нелінійною і для

статичної характеристики має мінімум при відстані $J = 2450 \text{ mm}$. Експериментальні дослідження статичної характеристики показують, що біля цієї точки статична характеристика максимально близька до прямої лінії.

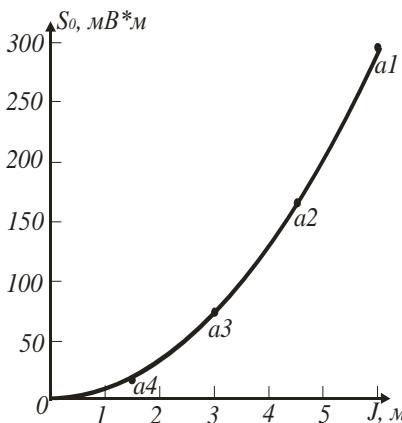


Рис. 3. Залежність $S_n = f(J)$

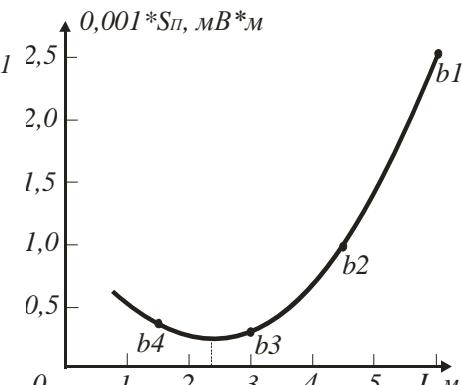


Рис. 4. Залежність $\Delta S_n = f(J)$

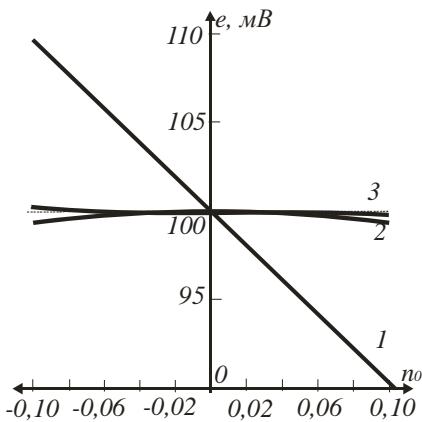


Рис. 5. Графіки складових похибок для відстані $J = 6 \text{ m}$, обумовленіх зміною впливаючого параметра n

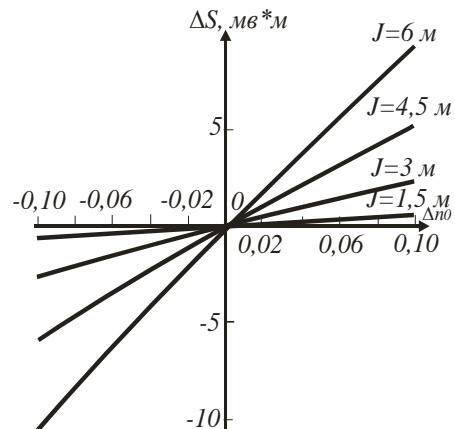


Рис. 6. Залежність загальних похибок для різних точок статичної характеристики

На рис. 5 показані криві складових похибок вимірювального контролю для відстані $J = 6 \text{ m}$: 1 – мультиплікативна; 2 – нелінійна квадратична і 3 – нелінійна кубічна складові відповідно. З рис. 5 видно, що при зміні впливаючого параметра n на $\pm 10\%$ від градуювального значення нелінійні

складові похибки незначні, якими при практичних дослідженнях можна знехтувати. Залежності сумарної похибки від зміни впливаючого параметра показані на рис. 6, з якого видно, що для всіх критичних точок статичної характеристики залежності $\delta_{\Sigma} = f(J)$ є нелінійними. Це свідчить про те, що зміна впливаючого параметра n приводить до появи нелінійності статичної характеристики, яка збільшується по мірі збільшення відстані до поверхні рідинного середовища. Одночасно збільшується й похибка вимірювального контролю.

Для дослідження температурної похибки УЗКР рівняння (9) приведемо до наступної форми

$$e(L, T_C) = K_L \left\{ - \left(1 - \frac{L}{H} \right) \frac{\left[1 + (0,5\varepsilon(H-L)) \left[1 + (B_1 T_C^3) \right] \right]}{\left[1 + D_2 \left[1 + (B_1 T_C^3) \right] \right]} \right\}, \quad (11)$$

$$\text{де: } B_1 = D_1 \left(\frac{53,38\pi}{rm} \sqrt{\frac{z\gamma_C}{P}} \right)^3.$$

Критеріальне рівняння (1) для температурної залежності запишемо наступним чином

$$\int_0^{L_2} e(L, T_C) dL \pm \int_0^{L_2} \frac{\partial e(L, T_C)}{\partial T_C} (\delta T_C) dL - (0,5 \pm k_{T_C} \delta_{T_C}) e_2 L_2 = 0. \quad (12)$$

Впливаючим фактором є температура газового середовища T_C . Графіки складових температурної похибки вимірювального контролю приведені на рис. 7, які отримані при таких параметрах: $e = 64,78 \text{ mV}$, $J = 6 \text{ м}$, $K_{\mu T} = 0,25$, $K_{H2T} = 0,15$, $K_{H3T} = 0,50$ та зміні температури на $\pm 50^0\text{C}$ від номінальної $T_C = 293 \text{ K}$: 1 – мультиплікативна; 2 – нелінійна квадратична; 3 – нелінійна кубічна складові відповідно. З рисунка видно, що при відносному збільшенні температури T_C мультиплікативна та нелінійні складові є односторонніми, що призводить до великої сумарної температурної похибки. Якщо T_C зменшується, то нелінійна квадратична складова температурної похибки є протилежною до мультиплікативної та нелінійної кубічної складової, що призводить до зменшення загальної температурної похибки. Ці теоретичні висновки підтверджуються експериментальними дослідженнями, які показують, що при збільшенні температури від нормальної $T_C = 293 \text{ K}$ температурна похибка приблизно в 1,25 рази більша, ніж при її зменшенні на таку ж величину. Залежності $\Delta S_T = f(J)$ (див. рис. 8), які обумовлені зміною температури T_C , для

відстаней $J = 6 \text{ м}$, $J = 4,5 \text{ м}$, $J = 3 \text{ м}$, $J = 1,5 \text{ м}$, (критеріальні точки b_1 , b_2 , b_3 , b_4). Це свідчить про те, що температурні похибки розподіляються практично рівномірно вздовж діапазону вимірюваного контролю (рис. 9). Експериментальні дослідження підтверджуються теоретичними.

Для дослідження похибки УЗКР, обумовленої зміною тиску газу рівняння (9) приведемо до наступної форми

$$e(L, P) = K_L \left\{ 1 - \left(1 - \frac{L}{H} \right) \frac{\left[1 + (1/2\varepsilon(H-L)) \left(1 + \left(B_1/P_C \sqrt{P_C} \right) \right) \right]}{\left[1 + D_2 \left(1 + \left(B_1/P_C \sqrt{P_C} \right) \right) \right]} \right\}. \quad (13)$$

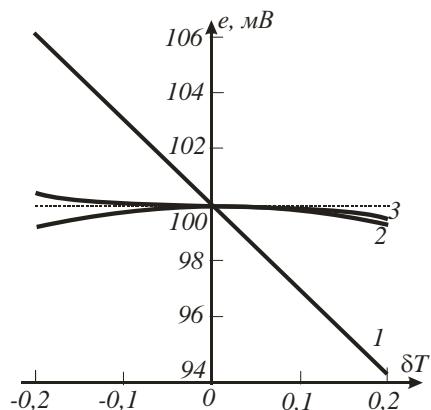


Рис. 7. Графіки складових температурних похибок для $J = 6 \text{ м}$

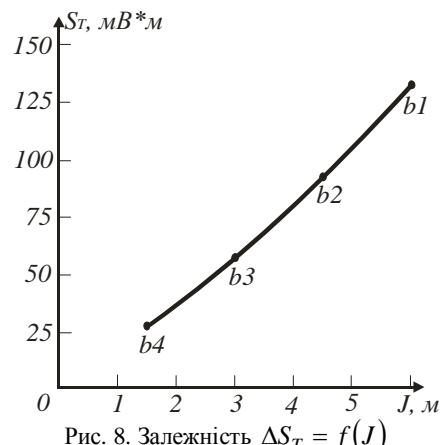


Рис. 8. Залежність $\Delta S_T = f(J)$

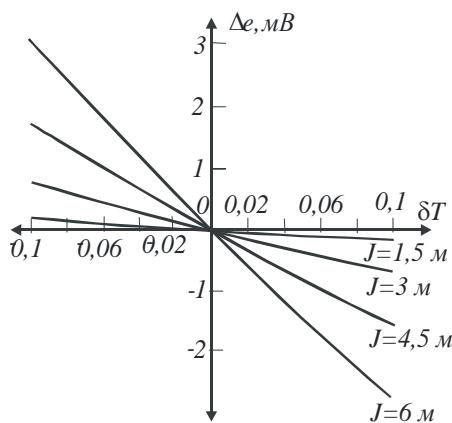


Рис. 9. Залежність загальних температурних похибок для різних точок статичної характеристики

Критеріальне рівняння (1) при зміні тиску газового середовища запишемо наступним чином

$$\int_0^{J_\Pi} e(J, P) dJ \pm \int_0^{J_\Pi} \frac{\partial e(J, P)}{\partial P} (\delta P) dJ - (0,5 \pm k_P \delta_P) e_\Pi J_\Pi = 0. \quad (14)$$

Впливаючим фактором є тиск газу P . Графіки складових похибки вимірювального контролю, обумовлених зміною тиску газу, приведені на рис. 10 (1 – мультиплікативна складова; 2 – нелінійна квадратична складова; 3 – нелінійна кубічна складова), які отримані при таких параметрах: $n = 64,78$, $J = 6$, $K_{\mu T} = 0,0015$, $K_{H2T} = 0,00025$, $K_{H3T} = 0,00150$ та зміні тиску від 70 до 130 кПа відносно номінального $P_C = 103$ кПа. Залежність $S_P = f(J)$ практично ідентична до аналогічної кривої нормальної статичної характеристики. Графік приросту цієї залежності, обумовленої зміною тиску газового середовища (рис. 11) показує, що площа під статичною характеристикою є значною, що свідчить про великий вплив зміни тиску на похибку вимірювального контролю. Залежність $\Delta S_P = f(J)$ має значну нелінійність, що говорить про суттєве зростання похибки, обумовленої зміною тиску газового середовища при збільшенні відстані до рідинного середовища. Залежності загальної похибки, обумовленої зміною тиску газу, вздовж діапазону вимірювального контролю, показані на рис. 12. Залежності нелінійні та мають явно виражену S -подібну форму.

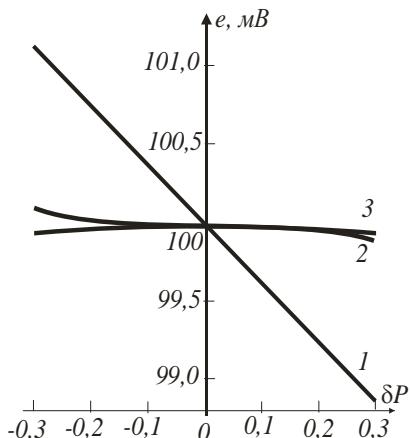


Рис. 10. Графіки складових похибки ЗКР, обумовлених зміною тиску газового середовища

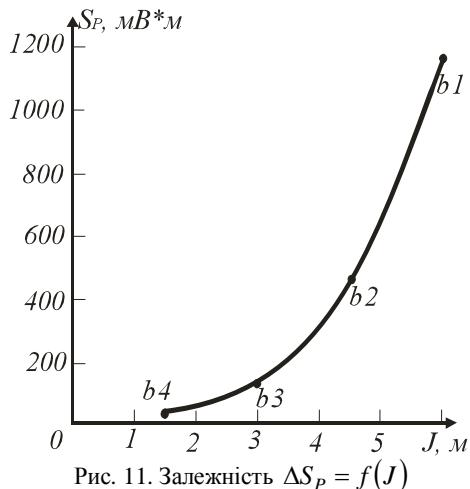


Рис. 11. Залежність $\Delta S_P = f(J)$

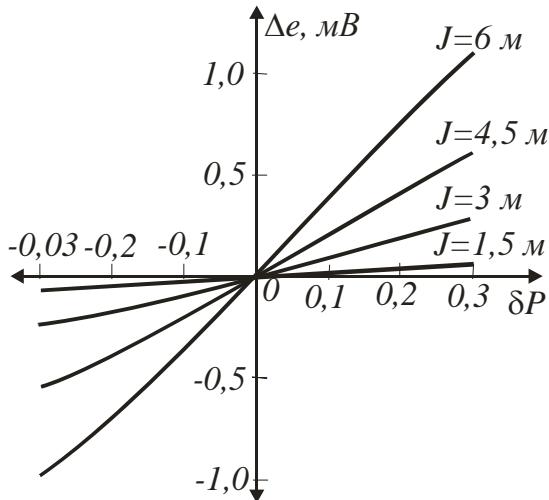


Рис. 12. Залежність загальних похибок, обумовлених з міною тиску газу для різних точок статичної характеристики

Висновок. У результаті досліджень встановлено, що засоби вимірювального контролю, які мають номінальну статичну характеристику та робочу, яка характеризується наявністю мультиплікативної та нелінійних складових, обумовлених відхиленням впливових факторів від їх номінальних значень, а також реперний пристрій, сигнал якого призначений для уведення поправки до початку або кінця діапазону вимірювального контролю, можна розглядати як оптимізаційну задачу з одним закріпленим кінцем. Рішення оптимізаційної задачі дозволяє визначити вплив того чи іншого збурюючого фактора (температури, тиску тощо) на похибки вимірювального контролю та відповідним чином їх оптимізувати не тільки у вимірювальній точці але й за шкалою. Метод дозволяє оптимізувати статичну характеристику закону вимірювального контролю за рахунок вибору таких конструктивних параметрів, при яких різниця між приростами нелінійності діапазону вимірювання були б мінімальними. Метод дозволяє за відповідним алгоритмом розраховувати вплив збурюючого параметра на положення статичної характеристики і вводити відповідні поправки для підвищення точності вимірювального контролю.

Список літератури: 1. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств / П.В. Новицкой. - Л.: Энергия, 1968. - 246 с. 2. Дунаев Б.Б. Точность измерений при

- контроле качества / Б.Б. Дунаев. – К.: Техника, 1981. – 152 с.: ил. **3.** Бабиков О.И. Контроль уровня с помощью ультразвука / О.И. Бабиков. – Л.: Энергия, 1971. – 98 с. **4.** Азидов А.М. Точность измерительных преобразователей / А.М. Азидов, А.Н. Гордов. – Л.: Энергия, 1975. – 256 с. **5.** Сурикова Е.И. Погрешности приборов и измерений / Е.И. Сурикова. - Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1975. - 155с. **6.** Рівнеміри робочі. Методика повірки: МПУ 138/03-2003. – Київ: УкрЦСМ, 2003. – 9 с. – (Нормативний документ УкрЦСМ. Інструкція). **7.** Приборы для измерения уровня жидкостей и сыпучих материалов. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ 28725-90 (СТ СЭВ 2419-89). – [Чинний від 1992-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 14 с. – (Государственный стандарт Союза ССР). **8.** Стенцель Й.І. Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній технології: Навч. посібник. Ч.1. / Й.І. Стенцель, В.В. Тицук. – Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім.. В. Даля, 2000. – 264 с. **9.** Стенцель Й.І. Математичні моделі ультразвукових рівнемірів рідин / Й.І. Стенцель, А.В. Томсон, А.В. Рябіченко // МНТЖ „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. –Хмельницький, 2006. №2 (28). – С. 55-58. **10.** Стенцель Й.І. Аналіз похибок вимірювання ультразвукових рівнемірів / Й.І. Стенцель, А.В. Томсон, А.В. Рябіченко // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ «ХПІ» - № 48. – 2008. – С. 55-60. **11.** Зайцев Г.Ф. Основы автоматического управления и регулирования / Г.Ф. Зайцев, В.И. Костюк, П.И. Чинаев. - Киев: Техника, 1977. - 460 с. **12.** Рабинович С.Г. Погрешность измерений / С.Г. Рабинович. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с., ил. **13.** Гельвфонд И.М. Вариационное исчисление / И.М. Гельвфонд, С.В. Фомин. - М.: Физматгиз, 1961. - 385 с.

Надійшла до редакції 12.04.12

О.Г. АРХИПОВ, докт техн. наук, доц., СНУ ім. В.Даля, Сєвєродонецьк;

О.Г. БОЯРЧУК, студент, СНУ ім. В.Даля, Сєвєродонецьк;

Д.О. КОВАЛЬОВ, асп., СНУ ім. В.Даля, Сєвєродонецьк;

Г.О. ТАТАРЧЕНКО, канд.. техн. наук, доц., СНУ ім. В.Даля, Сєвєродонецьк

БЕЗКОНТАКТНИЙ ІМПУЛЬСНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНИХ ПОШКОДЖЕНЬ

Запропоновано блок-схему безконтактного електрохімічного імпульсного методу контролю корозійно-механічних пошкоджень технологічного обладнання, яке експлуатується в середовищі рідких електролітів. Розроблений метод дає можливість оцінювати стан технологічного обладнання, як за інтенсивністю появи імпульсів руйнування, які фіксуються за певний інтервал часу, так і за зміною в часі потенціалу металу обладнання.

Предложена блок-схема безконтактного электрохимического импульсного метода контроля коррозионно-механических повреждений технологического оборудования. Разработанный метод дает возможность оценивать состояние технологического оборудования, как по интенсивности появления импульсов разрушения, которые фиксируются за определенный интервал времени, так и по изменению во времени потенциала металла оборудования.

The flowchart of non-contact pulsed electrochemical method for monitoring corrosion and mechanical damages technological of equipment proposed in this paper. The method developed assesses the state of technological equipment, such as the intensity of occurrence of impulses of destruction, which for certain fixed period of time, and to change the potential metal of equipment at the time.

Вступ. В хімічній і нафтопереробній галузях промисловості актуальною проблемою є своєчасне виявлення корозійно-механічних пошкоджень та подовження ресурсу обладнання, яке знаходитьться в експлуатації вже тривалий час. Зазвичай технологічні процеси в названих галузях промисловості протікають в середовищі рідких електролітів, отже корозійно-механічні пошкодження мають електрохімічний характер, що обумовлює розвиток і використання електрохімічних методів корозійного моніторингу.

На сучасному етапі відомі такі електрохімічні методи моніторингу:

- вимірювання поляризаційного опору;
- визначення електродного потенціалу корозії;
- вимірювання змінострумового імпедансу;
- вимірювання електрохімічного шуму.

За допомогою даних методів можна визначити такі характеристики, як загальна корозійна стійкість металу, корозійна активність речовин [1], можливість проведення діагностування технічного стану металоконструкцій і визначення ефективності різних способів захисту металів від корозії.

Вказані електрохімічні методи мають практичне застосування безпосередньо для визначення поточного стану трубопровідного транспорту, резервуарів та обладнання [2, 3].

Недоліками названих методів є:

- потреба висококваліфікованої оцінки пошкоджень і глибокого вивчення властивостей конкретної конструкції;
- складність реалізації автоматичного контролю стану обладнання в режимі реального часу;
- необхідність автоматичного контролю одночасно з введенням обладнання в експлуатацію;
- необхідність врахування попередньої “історії” експлуатації обладнання.

Однією з найважливіших складових безпечного протікання технологічних процесів на виробництві є постійний моніторинг стану обладнання. Під моніторингом розуміється регулярний контроль певних технологічних параметрів, які повинні змінюватись в заданих інтервалах. Це певна система діагностування і прогнозування стану обладнання з метою контролю і попередження можливих негативних наслідків, пов’язаних з експлуатацією, і руйнівних дій корозії.

Як правило, для оцінювання корозійно-механічних пошкоджень імпульсним методом використовувались одноелектродні електрохімічні датчики [4, 5], принцип роботи яких засновано на явищі протікання специфічної хімічної реакції (електрохімічної реакції) в ємності з розчином електроліту. Використання такого датчика потребує втручання в технологічний процес, а враховуючи те, що хімічні і нафтопереробні виробництва – це дуже небезпечні об’єкти, на яких обладнання працює під високим тиском, температурою тощо, отже виникають труднощі. Пропонується використовувати замість названого датчика, безконтактний накладний вихрострумовий датчик, який встановлюється зовні об’єкту [6].

Основна частина. Для забезпечення постійного моніторингу стану обладнання була розроблена логічна блок-схема безконтактного імпульсного пристрою для постійного моніторингу корозійно-механічних пошкоджень обладнання в режимі реального часу (рис. 1).

Алгоритм роботи блок-схеми наступний. Електричні імпульси, які генеруються при корозійно-механічному руйнуванні обладнання, знімаються з об’єкта контролю безконтактним датчиком руйнувань БДР [6]. Постійний сигнал фіксується і посилюється підсилювачем постійного сигналу ПП (серії INA 128) і надходить на 1-й канал реєстратора РЕ МТМ-160.

Блок ІІР – імітатор імпульсів руйнування призначений для імітації штучних імпульсів з метою перевірки робочого стану системи контролю.

Імпульси руйнування, які є змінними сигналами, також фіксуються датчиком БДР і посилюються окремим буферним підсилювачем ПІ (серії

INA 128) для виключення впливів зовнішніх сигналів на систему контролю, які генерує реєстратор РЕ МТМ-160.

Посилені імпульси надходять на формувач сигналів стандартного рівня ФСС, який формує імпульс додатньої полярності з різнополярних вхідних імпульсів. Сформовані імпульси надходять на формувач тривалості сигналу ФТС, далі, за необхідності, імпульси надходять на лічильник з індикацією ЛІ, що дозволяє візуально контролювати імпульси руйнування.

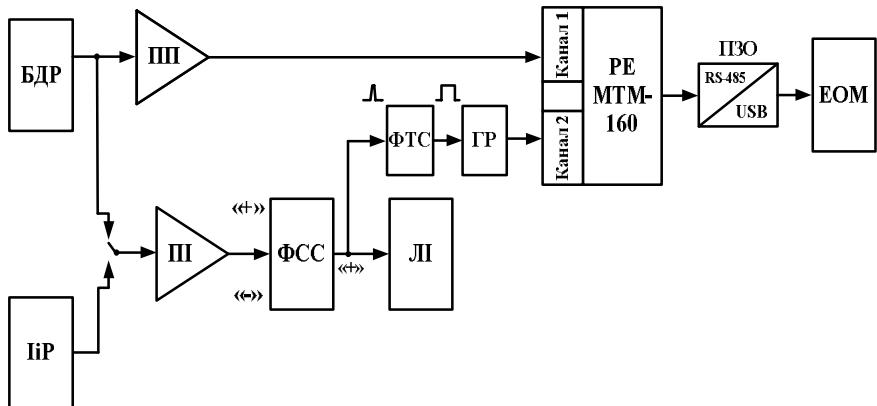


Рис. Блок-схема імпульсного пристрою для корозійного моніторингу технологічного обладнання:

БДР – безконтактний датчик руйнування;

IiP – імітатор імпульсів руйнування;

PIP – підсилювач постійного сигналу (потенціалу);

PIP – підсилювач змінного сигналу (імпульсів руйнування);

ФСС – формувач сигналу стандартного рівня;

«+», «-» – сигнали додатньої і від’ємної полярності;

ЛІ – лічильник імпульсів руйнування з індикацією;

ФТС – формувач тривалості сигналу;

ГР – гальванічна розв'язка;

РЕ МТМ-160 – реєстратор електронний;

ПЗО – пристрій зв'язку з об'єктом;

RS-485 – послідовний інтерфейс;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина (комп'ютер).

Імпульси руйнування через ФТС надходять на оптичну розв'язку ГР, яка є перемикачем в гальванічно розв'язаних електричних колах. В цей же час відкривається канал пропускання імпульсів. Після прийняття кожного імпульсу руйнування вхід оптичної розв'язки закривається і сигнал передається на 2-й канал реєстратора РЕ МТМ-160.

У приладі РЕ МТМ-160 при досягненні певної заданої інтенсивності появи імпульсів руйнування за обраний період часу, спрацьовує аварійна сигналізація (кофіцієнт пропорційності задається величиною певної вставки). Далі через послідовний інтерфейс RS-485 отримані результати передаються на ЕОМ.

Висновки. Розроблено блок-схему безконтактного імпульсного методу контролю корозійно-механічних пошкоджень обладнання.

Запропонований безконтактний імпульсний метод оцінювання ступеня корозійно-механічних пошкоджень контролюваних ділянок обладнання, дозволяє проводити моніторинг, як за інтенсивністю появі імпульсів руйнування, які фіксуються за певний інтервал часу, так і за зміною в часі потенціалу обладнання.

Встановлено, що суттєвою відмінністю і перевагою безконтактного імпульсного методу порівняно з раніше відомими є можливість розпочинати автоматичний моніторинг на будь-якому етапі експлуатації обладнання.

Список літератури: 1. Чвірук В.П., Поляков С.Г., Герасименко Ю.С. Академперіодика. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ. – К.: 2007. – 321с. 2. Новицкий В.С., Кузуб В.С. Контроль коррозионного состояния технологического оборудования по потенциалу коррозии // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – № 1. – с. 76-82. 3. Новицкий В.С., Писчик Л.М. Промышленный коррозионный контроль химической аппаратуры // Физ.-хим. механика материалов. – 2001. – Спец. выпуск № 1. – с. 10-15. 4. Пат. 46156 Україна, МПК (2009) G01N 3/32, G01N 27/26. Імпульсно-динамічний спосіб оцінки ступеня корозійно-механічного пошкодження / Похмурський В.І., Хома М.С., Архипов О.Г. та ін.; заявник і патентовласник Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – №u200906274, заяв. 16.06.2009, опубл. 10.12.2009, бюл. №23. 5. Пат. 55489 Україна, МПК (2010) G01N 3/32, G01N 27/26. Імпульсний спосіб / Похмурський В.І., Хома М.С., Архипов П.О. та ін.; заявник і патентовласник Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – №u201008556, заяв. 08.07.2010, опубл. 10.12.2010, бюл. №23. 6. Каневский, И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. Пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 109 с.

Надійшла до редакції 15.04.12

В.Д. РИЖИКОВ, докт. фіз.-мат. наук, проф., зав. відділення РП, ІСМА НАНУ, Харків;

О.Д. ОПОЛОНИН, заст. зав. відділу ІСМА НАНУ, Харків;

В.Г. ВОЛКОВ, заст. зав. відділу ІСМА НАНУ, Харків;

О.К. ЛИСЕЦЬКА, канд. хім. наук, ст. наук. співроб., ІСМА НАНУ, Харків;

С.М. ГАЛКІН, канд. хім. наук, зав. відділу ІСМА НАНУ, Харків;

Є.Ф. ВОРОНКІН, канд. техн. наук, заст. зав. відділу, ІСМА НАНУ, Харків

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРИЙМАЛЬНО-ДЕТЕКТУЮЧОГО ТРАКТУ ДЛЯ ЦИФРОВИХ РАДІОГРАФІЧНИХ СИСТЕМ З ПОКРАЩЕНИМ ПРОСТОРОВИМ РОЗДІЛЕННЯМ

Для отримання тіньових рентгенівських зображень було проведено розробку приймально-детектуючого тракту з лінійкою 32-канальних детекторів «сцинтилятор-фотодіод» нового дизайну для поля сканування $200 \cdot 10^{-3}$ м. За допомогою макетів цифрової радіографічної системи та стандартних тестових об'єктів визначено просторову роздільну здатність (не гірше 1,25 пар ліній/мм) та виявну здатність (краша ніж $0,2 \cdot 10^{-3}$ м сталого дроту за $6 \cdot 10^{-3}$ м сталі).

Для получения теневых рентгеновских изображений было проведено разработку приемно-детектирующего тракта с линейкой 32-канальных детекторов «сцинтилятор-фотодиод» нового дизайна для поля сканирования $200 \cdot 10^{-3}$ м. С помощью макетов цифровой радиографической системы и стандартных тестовых объектов определено пространственное разрешение (не хуже 1,25 пар линий / мм) и выявляющую способность (лучше чем $0,2 \cdot 10^{-3}$ м стальной проволоки по $6 \cdot 10^{-3}$ м стали).

For obtaining shadow X-ray images, a receiving-detecting circuit with the 32-channel detector array "scintillator-photodiode" of new design was developed for $200 \cdot 10^{-3}$ m scanning field. Using model digital radiographic systems and standard testing we have evaluated spatial resolution (not worse than 1.25 line pairs/mm) and detecting ability (better than $0.2 \cdot 10^{-3}$ m steel wire behind $6 \cdot 10^{-3}$ m steel).

Вступ. Плівковий радіографічний контроль (ПРК) показує, що не завжди забезпечуються точні оцінки ушкоджень [1-6]. Також проведення ПРК потребує дорогих матеріалів та значних часових витрат. Матеріали дев'ятої Європейської конференції з неруйнівного контролю вказують, що головним напрямом розвитку цифрових радіографічних систем (ЦРС) є підвищення просторового розділення (ПР) [6]. ЦРС поступається ПРК по роздільній здатності, однак за контрастною чутливістю по щільності значно перевершує: (0,8-1)% та (1-2)% відповідно.

Мета даної роботи є пошук резервів для поліпшення ПР, роздільної здатності по товщині та виявної здатності ЦРС на базі детекторів рентгенівського випромінення типу «сцинтилятор-фотодіод» (СЦ-ФД).

Попередні дослідження показали, що на шляху створення детекторів СЦ-ФД з підвищеним ПР існують дві основні технологічні проблеми [1-3, 7].

Одна з них – це виготовлення сцинтиляційних лінійок (збірок) з малою апертурою окремого сцинтиляційного елемента. Друга – це компактне розташування попередніх підсилювачів (ПП).

Нами розроблені технічні рішення для виготовлення та вдосконалення ФД та сцинтиляційних збірок з кількістю каналів 32 на одному ФД та конструкції детектора у цілому.

Розробка конструкції детектора з підвищеним ПР. Детектор рентгенівського випромінення типу СЦ-ФД складається з двох головних елементів – багатоканального ФД та сцинтиляційної лінійки (збірки).

Попередня конструкція 16 та 32 канальних ФД обмежує напрямок опромінення детекторів, створених на їх базі. Коректне використання таких детекторів можливе тільки у випадку, коли опромінення є в напрямку, перпендикулярному площині фоточутливих елементів [2,3].

Спільно з НДІ Мікроприладів, м. Київ, нами була розроблена нова конструкція 32 канального ФД (рис.1), яка має такі переваги [4,7,8]:

- усі контакти фоточутливих елементів розварені по один бік кремнієвої пластини;
- наявність та розташування роз'єма забезпечує можливість довільного розміщення плати ПП відносно напрямку опромінення детектора;
- на передній (вільній від контактів) стороні корпусу передбачено 2 юстировочні отвори.

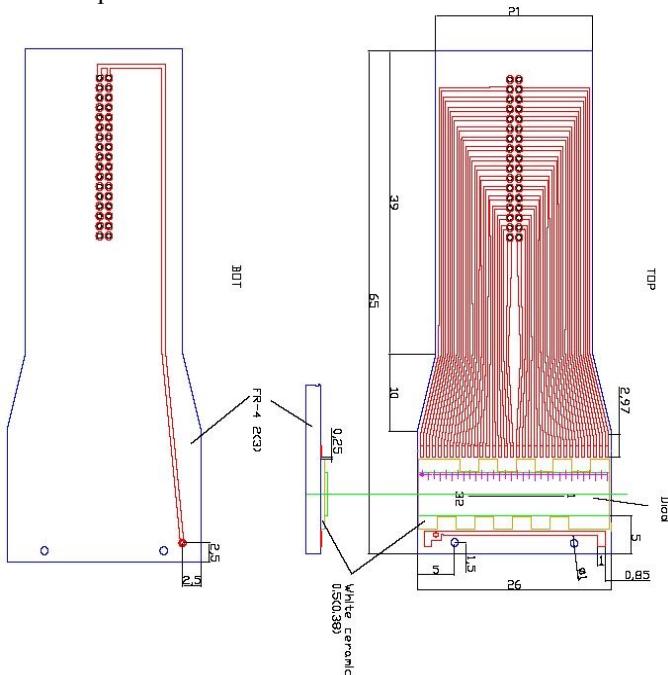


Рис.1. 32 канальний фотодіод нової конструкції

Перша та третя особливість конструкції дозволяє при використанні детектора в двохенергетичних ЦРС досягти найбільшої ідентичності характеристик пари детекторів високих та низьких енергій [4]. Друга особливість конструкції 32 каналного ФД надає можливість легкого стикування детекторів з мінімальним зазором між ними, що важливо для збереження кроку каналів у лінії $0,8 \cdot 10^{-3}$ м. Також розташування ФД забезпечує значну відстань між детектором та платою ПП, що надає більше можливостей щодо захисту елементної бази ПП від впливу прямого та розсіянного іонізуючого випромінення. Захист елементів електроніки набуває важливого значення при використанні високoenергетичних джерел рентгенівського випромінення (ДРВ) з анодною напругою до 450 кВ тощо [9,10].

Виготовлення дослідних зразків 1D-лінійок проводили з використанням монолітних заготівок сцинтиляторів. Виготовлені з пластини 32-х каналні сцинтиляційні збірки мають розміри $(25,4 \times 4 \times 0,6) \cdot 10^{-3}$ м, високу однорідність сцинтиляційних характеристик та можуть бути точно розміщені на фоточутливих елементах багатоканального ФД [9].

Виготовлення макетних зразків детекторів та дослідження їх характеристик. Виготовлено макетні зразки 32 каналних детекторів рентгенівського випромінення. Вимоги до параметрів 32 каналного детектора рентгенівського випромінення були сформульовані на рівні закордонних аналогів. Параметри детекторів приведені у табл.1.

Таблиця 1.

Параметри 32 каналного детектора

Найменування	Параметри
Площа вхідного вікна детектора	$(0,6 \times 0,6) \cdot 10^{-3}$ м ²
Крок детектора	$0,8 \cdot 10^{-3}$ м
Статичний струм детектора за відсутності впливу випромінення (T=293 K, Узміщ. = 10^{-2} V)	$< 20 \cdot 10^{-12}$ А
Спад сигналу детектора через $10 \cdot 10^{-3}$ с CsI(Tl) ZnSe(Te) CdWO ₄	До рівня 2% До рівня 0,2% До рівня 0,1%
Ємність детектора (T=293K, Узміщ. = $100 \cdot 10^{-3}$ V)	$< 50 \cdot 10^{-12}$ F

32-канальний детектор з сцинтиляційними елементами різної товщини зображене на рис.2.

Топологія модуля детекторів повинна забезпечувати можливість послідовного стикування модулів у лінію із збереженням кроку детекторів в місті стикування модулів.

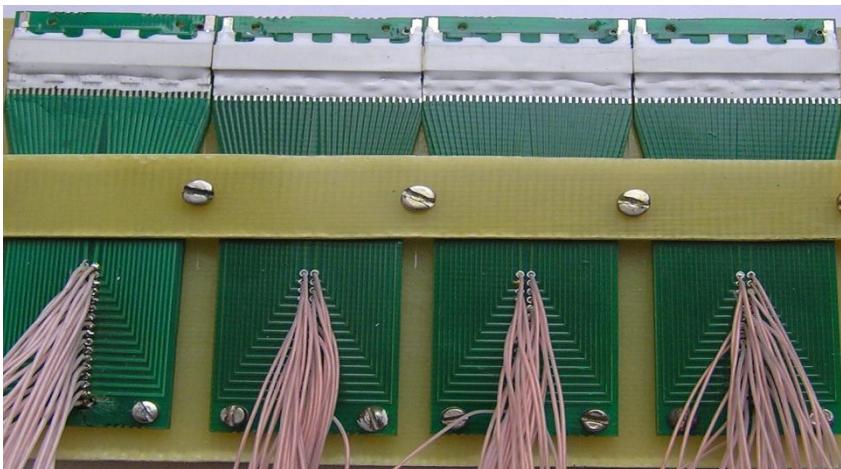


Рис.2. 32-канальний детектор з сцинтиляційними елементами різної товщини

Випробування 32-канальної лінійки детекторів у складі макету ЦРС на базі приймально-детектуючого тракту. Було змонтовано макетний зразок ЦРС на базі приймально-детектуючого тракту (ПДТ) з лінійкою 32 каналльних детекторів. Для отримання тіньових рентгенівських зображень було проведено розробку ПДТ з лінійкою детекторів нового дізайну для поля сканування $200 \cdot 10^{-3}$ м. ПДТ було послідовно інтегровано до двох макетів ЦРС.

Перший макет ЦРС-1 складався з ПДТ, лінійного двигуна (мінімальний крок переміщення менше 1 мкм, довжина більше $1600 \cdot 10^{-3}$ м) та ДРВ типу Isovolt Titan E ($U_{a\max}=160$ кВ, $I_{a\max}=45$ мА, максимальна потужність 4,5 кВт).

Другий макет ЦРС-2 складався з ПДТ, механізму переміщення та обертання об'єкта контролю та ДРВ типу РАПАН 140/140 ($U_{a\max}=140$ кВ, $I_{a\max}=1$ мА). Наявність у складі макету механізму обертання забезпечило реалізацію режиму багаторакурсного сканування (60 ракурсів), що здатний суттєво підвищити інформативність неруйнівного контролю та технічної діагностики.

За допомогою означених макетів ЦРС та стандартних тестових об'єктів - EN 462-5 (набір пар дротиків), канавочний еталон чутливості №2 (ГОСТ 7512-82), набір залізних дротиків DIN 62 Fe (10 ISO 16), комплект автомобільних щупів різної товщини (від $0,1 \cdot 10^{-3}$ м до $0,02 \cdot 10^{-3}$ м) та зварне з'єднання сталевих пластин товщиною $6 \cdot 10^{-3}$ м визначено ПР. Зовнішній вигляд тестових об'єктів зображене на рис. 3. Розміри дротиків, що входять у набір стандартних тестових об'єктів EN 462-5 та DIN 62 Fe (10 ISO 16) показані у табл. 2 та 3 відповідно.

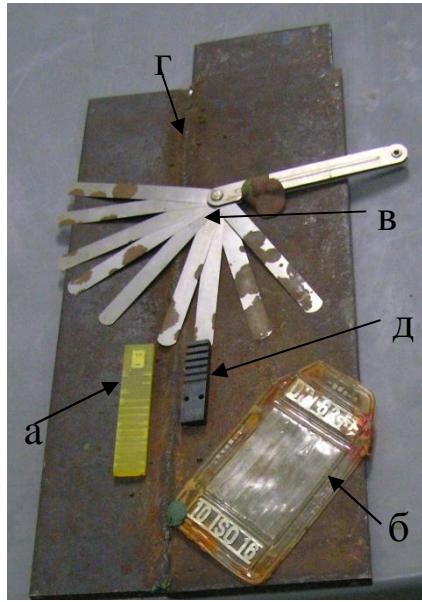


Рис. 3. Зовнішній вигляд стандартних тестових об'єктів: EN 462-5 - набір пар дротиків а), набір залізних дротиків DIN 62 Fe (10 ISO 16) б), комплект автомобільних щупів в) та зварне з'єднання сталевих пластин товщиною $6 \cdot 10^{-3}$ м г), канавочний еталон чутливості №2 (ГОСТ 7512-82) д).

Розміри пар дротиків тестового об'єкту - EN 46 2-5

Пара	1D	2D	3D	4D	5D	6D	7D	8D	9D	10D	11D	12D	13D
Діаметр мм	1.6	1.26	1.0	0.80	0.64	0.5	0.4	0.32	0.26	0.2	0.16	0.13	0.11

Таблиця 2.

Розміри дротиків тестового об'єкту -
DIN 62 Fe (10 ISO 16).

№ дротику	Діаметр, мм	
W10	0.40	
W11	0.32	± 0.01
W12	0.25	
W13	0.20	
W14	0.16	
W15	0.125	
W16	0.100	
W17	0.080	± 0.05

Проведені випробування лінійки детекторів з різною товщиною сцинтиляційних елементів у складі макетів ЦРС з отриманням тіньових рентгенівських зображень тест – об’єкту (калібриваний набір пар дротиків) показали, що в залежності від товщини використаної при виготовленні детекторів сцинтиляційної збірки просторове розділення становить $1 \div 1,25$ пар ліній/мм, а виявна здатність краща ніж $0,2 \cdot 10^{-3}$ м стального дроту (рис. 4).

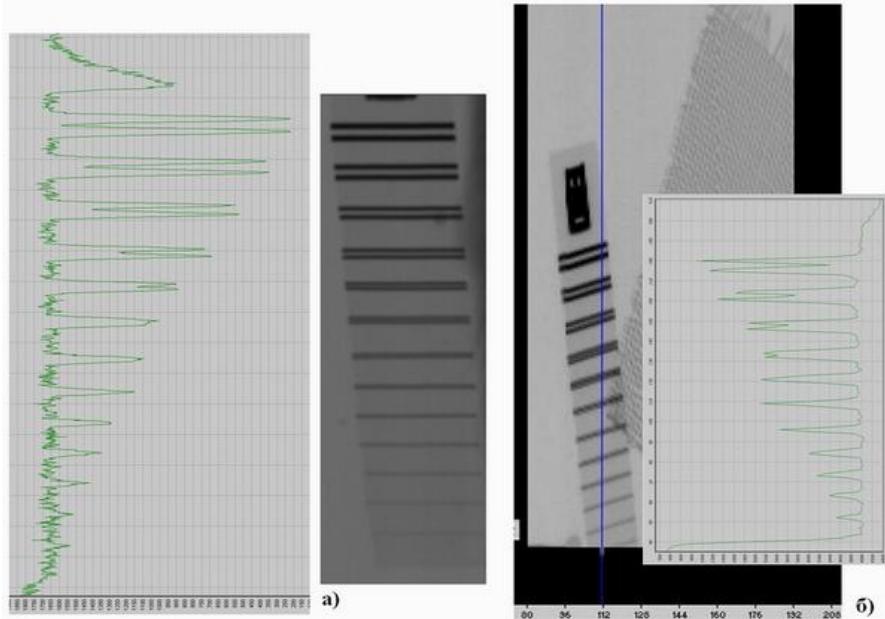


Рис.4. Оцінка просторової роздільної здатності ЦРС а) перший макет ЦРС, об’єкт EN 462 -5 розташовано за 6мм сталі, збільшення ≈ 2 ; б) другий макет ЦРС - об’єкт EN 462 -5 розташовано без перешкод, збільшення $\approx 1,3$.

Використання 16 розрядного аналого - цифрового перетворювача у складі ПДТ дозволило збільшити динамічний діапазон та підвищити, порівняно з попередніми результатами [9], роздільну здатність по товщині з $\approx 0,9\%$ до $\approx 0,4\%$ за $6 \cdot 10^{-3}$ м сталі (рис.5).

Таким чином, проведені вимірювання показали, що виготовлена лінійка детекторів для отримання тіньових рентгенівських зображень з високим ПР може бути з успіхом використана з ДРВ, що має анодну напругу до 160 кВ.

Розроблені та виготовлені детектори рентгенівського випромінення можуть бути з успіхом використані для створення швидкодіючих ЦРС з покращеним ПР. Їх застосування включає контроль зварних з’єднань, трубопроводів, металоконструкцій та металообробку. Також можна використовувати у інспекційних системах, включаючи анти-терористичну діяльність, технічну діагностику та медицину [1, 4, 7, 9, 10].



Рис.5 . Оцінка роздільної здатності ЦРС по товщині (за $6 \cdot 10^{-3}$ м сталі).

Вдячність: ця робота була частково проведена за підтримки проекту NATO SfP-982823.

Список літератури: 1. Ryzhikov, V.D., Opolonin O.D., Galkin S. M. et al. In: Proc. SPIE Optics+Photonics (Optical Engineering + Application), San Diego, USA, vol. 7450(2009) p.p. 0J1-0J6. 2. Ryzhikov, V.D., Opolonin, O.D., Kozin, D.N. et al., Nucl. Instr. and Meth. A, vol. 505, p.p.192-199 (2003). 3. Ryzhikov, V.D, Kozin, D.M, Grynyov, B.V et al., Nucl. Instr. and Meth. A, vol. 505, p.p.181-184 (2003). 4. Naydenov, S.V., Ryzhikov, V.D., Smith, C.F et al. In: Proc. SPIE Optics+Photonics (Optical Engineering + Application), San Diego, USA, vol. 6319(2006), p.p.A1-A8. 5. Seminozhenko, V.P., Ryzhikov, V. D., Opolonin, A.D. et al., In: Proc. SPIE Optics+Photonics (Optical Engineering + Application), San Diego, USA, vol. 6319(2006), p.p. B1-B8. 6. Bavendiek, K., Ewert U., Zscherpel, Meade, U. In: Proc. the 9-th European Conference on NDT, Berlin, Germany, vol.2(2006), p.p.44-48. 7. Гриньов, Б.В., Рижиков, В.Д., Семиноженко В.П, Сцинтиляційні детектори та системи радіаційного моніторингу на їх основі.– Київ: Наукова думка, (2007) – 447 с. 8. Ryzhikov, V., Grynyov, B., Opolonin, A et al., Radiation Measurements, vol.42, p.p. 915– 920 (2007). 9. Ryzhikov, V. D., Opolonin, O., Galkin, S. M. et al. In: Proc. SPIE Optics+Photonics (Optical Engineering + Application), San Diego, USA (2010), Vol. 7805, pp. P1-P9. 10. Ryzhikov,V.D., Opolonin,O.D., Galkin, S.M., Volkov V.G., Lysetska, O K., Kostioukevitch S.O. In: Proc. SPIE Optics+Photonics (Optical Engineering + Application), San Diego, USA, vol. 8142(2011) p.p.81421C-1- 81421C-8

Надійшла до редакції 13.04.12

Н.Н. СИРЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ "ХПИ", Харьков

ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИЯМ ПЕРМЕАМЕТРОВ

Выработан ряд требований, предъявляемых при конструировании автоматизированных промышленных пермеаметров. Предложена методика анализа элементов конструкции пермеаметра при выполнении каждого поставленного требования. Рассмотрена конструкция типового пермеаметра и предложены конкретные конструкционные элементы и меры, направленные на выполнение требований.

Зроблено ряд вимог, що пред'являються при конструюванні автоматизованих промислових пермеаметрів. Запропоновано методику аналізу елементів конструкції пермеаметрів при виконанні кожної поставленої вимоги. Розглянута конструкція типового пермеаметру та запропоновано конкретні конструкційні елементи і заходи, спрямовані на виконання вимог.

Developed a number of requirements in the design of automated industrial permeameter. The method of analysis of structural elements in the performance of each permeameter supplied requirements. The design of a standard permeameter and propose concrete structural elements and measures to fulfill the requirements.

Главным недостатком традиционных устройств для магнитного контроля [1 - 4] изделий различных форм, особенно замкнутой, является трудоемкая и длительная подготовка образца к измерениям, связанная с нанесением на них намагничивающей и измерительных обмоток. Среди свободных от этого недостатка устройств выделяются наиболее простые приспособления с разъемными обмотками [2, 3], а также устройства с магнитопроводами, создающими рабочий магнитный поток в образце и замыкающими его на свои полюсы [1, 3 - 5]. Такие устройства являются наиболее перспективными для процесса автоматизации испытаний ферромагнитных образцов любых форм и называются пермеаметрами [1 - 5].

По метрологической классификации средств измерительной техники пермеаметры являются измерительными преобразователями с магнитопроводами, предназначенными для косвенных измерений магнитных характеристик ферромагнитных изделий без нанесения на них намагничивающих и измерительных обмоток. Развитие конструктивного ряда пермеаметров является важнейшим необходимым условием для автоматизации промышленного неразрушающего контроля качества ферромагнитных изделий как простых, так и сложных форм. Поэтому практически важными становятся задачи конструирования пермеаметров, предназначенных для автоматизации магнитного контроля качества образцов из тонколистовой электротехнической стали, элементов электродвигателей (сердечников статоров, роторов), магнитопроводов трансформаторов, ферромагнитных элементов электрических аппаратов и т.п. Основной задачей при этом является выработка конкретных технических требований при проектировании пермеаметров.

Принцип действия пермеаметров состоит в том, что магнитный поток создается не внутри образца, как это традиционно происходит при испытании образцов с нанесенной намагничивающей обмоткой, а в магнитопроводе самого пермеаметра. Далее этот поток передается с минимальными потерями в образец, замыкаясь на основной магнитопровод пермеаметра. Применение пермеаметров для испытаний как замкнутых образцов (тороидальной, эллиптической и других конфигураций), так и изделий разомкнутой формы (полос, листов) отличается тем, что на результаты измерений не оказывает влияние размагничивающий фактор, поскольку магнитная цепь образца всегда оказывается замкнутой на полюса магнитопроводов.

При разработке конструкций современных пермеаметров необходимо учитывать ряд требований, предъявляемых к их элементам, узлам и материалам. Такими требованиями в первую очередь являются:

- контроль магнитных характеристик ферромагнитных изделий замкнутой и разомкнутой форм широкого ассортимента, т. е. *универсальность применения*;
- минимальное магнитное *сопротивление* системы «пермеаметр-образец»;
- минимальные *рассеяния* основного магнитного потока;
- однородность *намагничивания* изделия в поперечном сечении и вдоль длины;
- повышенная *точность* контроля;
- высокая *чувствительность* при определении магнитных характеристик;
- возможность *автоматизации* магнитного контроля промышленных изделий серийного производства;
- надежность конструкции с целью длительной эксплуатации;
- удобство и простота эксплуатации.

Рассмотрим в качестве примера, как эти требования учитывались при конструировании типового промышленного универсального пермеаметра [5, 6], конструкция которого с размещенным на нем образцом замкнутой (кольцевой) формы приведена на рис. 1. Такой пермеаметр также позволяет контролировать образцы и разомкнутой формы (полоса, лист).

Пермеаметр содержит центральный магнитопровод 1, выполненный в виде ферромагнитного шихтованного стержня с каркасом 2 намагничивающей обмотки. На магнитопроводе 1 установлены шихтованные полюсные наконечники 3 а также подвижные струбцины 4 с упорами 5 и пружинами 6, представляющие собой прижимные приспособления. Там же расположены центрирующие приспособления 7 с направляющей 8 и упорными гайками 9, перемещающимися по винту 10. Каркасы 11 и 12 с секциями измерительной обмотки размещены на краях наконечников 3. Струбцины 4 в частях, охватывающих магнитопровод 1, выполнены с разрезом (воздушным зазором), препятствующим замыканию

вихревых токов в них. Прижимные упоры 5 установлены в струбцинах 4 с возможностью фиксации в отжатом (посредством пружин 6) положении.

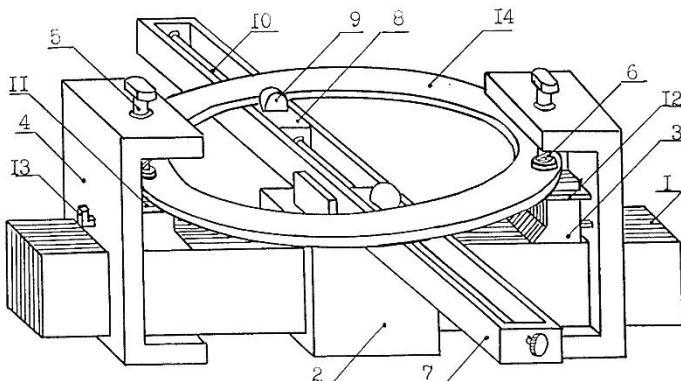


Рис. 1. Пермеаметр с изделием замкнутой формы

Возможность магнитных испытаний изделий различных типоразмеров и форм в рассматриваемом пермеаметре обеспечена рядом следующих конструктивных мер. Во-первых, длина магнитопровода 1 и длина центрирующего приспособления 7 рассчитываются с учетом возможности испытаний изделий максимальных из заданных типоразмеров и различных форм (замкнутой, разомкнутой). Во-вторых, струбцины 4, сопряженные с полюсными наконечниками 3, выполнены подвижными вдоль магнитопровода 1. Кроме этого, длина центрирующего приспособления 7 также выбрана с учетом возможности испытаний изделий различных типоразмеров и форм. Этой же цели служат и подвижные упорные гайки 9, имеющие возможность регулирования положения при перемещении их по винтовой направляющей (элементы 8 и 10 на рис. 2.1). Таким образом обеспечена универсальность пермеаметра по отношению к типоразмерам и формам испытуемых изделий.

Следующим из основных требований является то, что сумма магнитных сопротивлений всех элементов магнитопровода и воздушных зазоров в местах контакта полюсных наконечников и изделия должна быть существенно меньше магнитного сопротивления испытуемого образца. Чтобы выполнить это условие, необходимо было свести к минимуму воздушные зазоры в магнитной цепи системы «преобразователь - образец». Для этого были разработаны прижимные приспособления в виде струбцин 4 с упорами 5 и пружинами 6. Они надежно фиксируют статическое положение системы «пермеаметр-изделие» и обеспечивают в ней минимальные воздушные зазоры. Дополнительной мерой является тщательная шлифовка контактных поверхностей наконечников и магнитопровода.

Также требуется выполнять элементы магнитопровода с площадью их поперечного сечения значительно (примерно в 100 раз и более) превышающей площадь сечения испытуемых изделий. Естественно, в зависимости от массы испытуемого изделия резко увеличивается масса пермеаметра, что является одним из основных его недостатков. Поэтому в таких случаях их выполняют стационарными или, если необходимо их передвигать, на тележках.

Для выполнения условия минимального рассеяния основного магнитного потока необходимо рассматривать магнитную цепь системы «преобразователь - образец» и распределение магнитных потоков в ней.

В качестве примера рассмотрим магнитную цепь типового пермеаметра [5 - 6] с изделием замкнутой формы (рис. 2) и распределение магнитных потоков в этой системе (рис. 3).

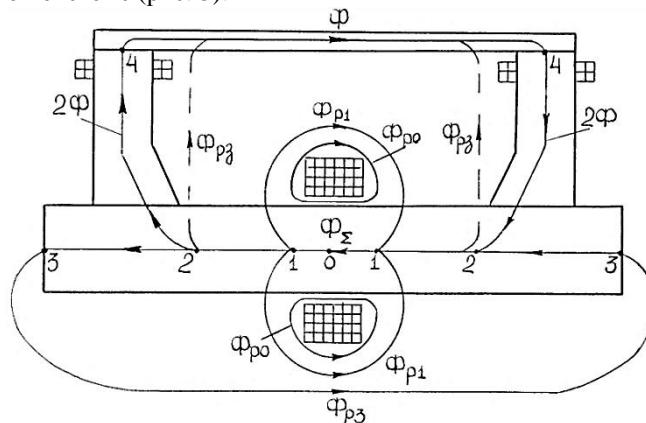


Рис. 2. Магнитная цепь системы «пермеаметр – тороидальный образец»

Анализ распределения потоков показывает следующее. Основной магнитный поток Φ_{Σ} создается в центральном магнитопроводе преобразователя при протекании тока по его намагничивающей обмотке. При проведении магнитного контроля изделия поток Φ_{Σ} разветвляется на два потока Φ , растекающихся по половинам кольцевого образца (полукольцам), а также на несколько характерных потоков рассеяния Φ_{p0} , Φ_{p1} , Φ_{p3} , шунтирующих рабочие потоки Φ . Потоки рассеивания Φ_{p0} и Φ_{p1} замыкаются вокруг намагничивающей катушки пермеаметра, а потоки Φ_{p3} – по воздуху на полюса центрального магнитопровода. Они представляют собой потери основного магнитного потока Φ , зондирующего изделие. Их наличие является источником погрешности определения магнитных характеристик изделия.

Минимальные рассеяния основного магнитного потока обеспечены следующими мерами.

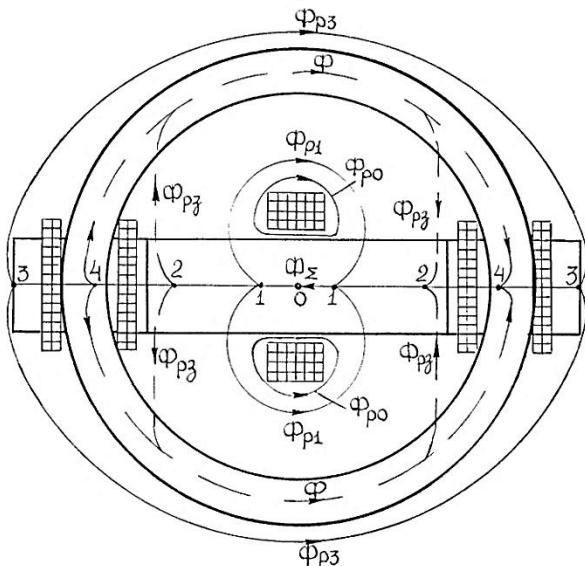


Рис. 3. Распределение магнитных потоков в системе «пермеаметр – тороидальный образец»

Применение в конструкции рассматриваемого преобразователя полюсных наконечников 3 предусматривает достаточное увеличение расстояния (воздушного зазора) между магнитопроводом 1 и образцом 14. Тем самым практически устраняется поток рассеяния Φ_{p3} (рис. 3).

Размещение каркасов 11, 12 с секциями измерительной обмотки на краях наконечников 3 (рис. 1) позволяет измерять только рабочие магнитные потоки Φ , зондирующие испытуемый образец. Потоки рассеяния Φ_{p0} , Φ_{p1} и Φ_{p3} не учитываются, поскольку они не пересекают плоскость измерительных катушек 11 и 12 (рис. 3). Кроме этого, наличие двух секций измерительной обмотки дает возможность увеличить чувствительность преобразователя к измеряемым величинам.

Приспособление 7 (рис. 1) необходимо для точного центрирования образцов различных типоразмеров и форм относительно осей симметрии преобразователя, что особенно важно для обеспечения заданной точности измерений при испытаниях замкнутых образцов.

Таким образом, все перечисленные конструктивные решения в совокупности позволяют реализовать в конструкции преобразователя отстройку от влияния ряда потоков рассеяния на результаты контроля,

улучшить характеристики точности измерений с помощью преобразователя, повысить его чувствительность.

Однако и такому преобразователю свойственны влияющие на точность измерений факторы. Это магнитные сопротивления воздушных зазоров в зонах контактов полюсных наконечников с магнитопроводом и образцом, а также проводимости путей утечек магнитного потока в воздухе, шунтирующие магнитные сопротивления образцов (либо половин детали замкнутой формы).

Для существенного уменьшения влияния магнитных сопротивлений указанных зазоров в конструкции преобразователя также предусмотрен ряд конструктивных и подготовительных мер. Во-первых, это достаточно сильное и стабильное прижатие образца к полюсным наконечникам и последних к магнитопроводу посредством упоров пружин прижимного приспособления. Во-вторых, контактные поверхности наконечников и магнитопровода тщательно пришлифованы. Кроме того, влияние проводимостей путей утечек потока в воздухе, шунтирующих магнитные сопротивления изделия, можно значительно уменьшить, используя предварительную градуировку преобразователя с использованием аттестованных стандартных образцов серийной продукции.

При работе преобразователя в режиме измерений динамических магнитных характеристик для выполнения требования полного промагничивания изделия в его поперечном сечении необходимо выполнение еще двух условий:

- глубина δ проникновения переменного магнитного поля должна быть больше половины толщины контролируемого образца;

- глубина δ проникновения переменного магнитного поля должна быть больше половины толщины пластины шихтованного магнитопровода.

Указанные требования математически можно представить в виде

$$\delta = \sqrt{2 / (\mu_0 \mu_{r0} \sigma_0 \omega)} > \Delta_0 / 2, \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{2 / (\mu_0 \mu_{rM} \sigma_M \omega)} > \Delta_M / 2, \quad (2)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ_{r0} и μ_{rM} - магнитные проницаемости материала образца и пластины шихтованного магнитопровода соответственно; σ_0 и σ_M - удельные электрические проводимости материала образца и пластины магнитопровода соответственно; ω - круговая частота изменения магнитного поля; Δ_0 и Δ_M - толщина образца и пластины магнитопровода соответственно.

Это требование выполняется путем предварительных расчетов величин указанных глубин проникновения и последующего выбора пластин для

шихтованного магнитопровода преобразователя с толщиной не более величины Δ_M с учетом использования его для испытаний образцов, толщина которых не превышает величины Δ_0 .

Удобство применения обеспечивается практически всеми узлами конструкции, в частности элементами прижимного и центрирующего устройств.

Автоматизация процесса подготовки пермеаметра к измерениям (установки и фиксации испытуемого образца на полюсных наконечниках) достаточно легко осуществляется за счет механического сопряжения упоров 5 с простейшим двухпозиционным манипулятором.

Удобство применения обеспечивается практически всеми узлами конструкции, в частности элементами прижимного и центрирующего устройств.

В целом конструкция пермеаметра не перегружена нефункциональными деталями, поэтому является *простой* и достаточно *надежной*.

Следует обратить внимание на то, что элементы конструкций сопряженные с магнитопроводами, их полюсными наконечниками, должны выполняться из немагнитных непроводящих материалов.

Итак, сформулирован ряд требований, предъявляемых к конструированию пермеаметров, которые представляются универсальными и практически важными при решении задач автоматизации магнитного неразрушающего контроля и магнитных измерений. Также предложена методика анализа элементов конструкции пермеаметра при выполнении каждого поставленного требования. На примере конструкции типового пермеаметра предложены конкретные конструкционные элементы и меры, направленные на выполнение поставленных требований.

Задачей дальнейшей работы является разработка методики расчета параметров элементов конструкций пермеаметров и проектирование с учетом поставленных требований конструкций новых пермеаметров, обеспечивающих повышенную точность магнитных измерений и широкий ассортимент контролируемых промышленных изделий.

Список литературы: 1. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. –М.: Энергия, 1969. – 360 С. 2. Испытание магнитных материалов и систем / Под ред. А.Я.Шихина. –М.: Энергоатомиздат, 1984. 3. Селезнев Ю.В., Маслов Ю.Н., Рыжков Г.П., Бабиков М.А. Автоматический контроль магнитных параметров. – М.:Высшая школа, 1971. 4. А.с. 901958 (СССР). Устройство для определения магнитных характеристик ферромагнитных замкнутых образцов / В.П.Себко. Опубл. в Б.И. – 1982. - № 4. 5. А.с. 1377790 (СССР). Устройство для измерения магнитных характеристик ферромагнитных образцов / А.А.Араменко, В.П.Себко, Н.Н.Сиренко. Опубл. в Б.И. – 1988. - № 8. 6. Себко В.П., Сиренко Н.Н. Устройство контроля магнитных характеристик изделий из электротехнических сталей. – В кн.: Вестник Харьковского политехнического института, 1989, № 264. Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок, вып. 16, с. 53 – 55.

А.Н. БОРИСЕНКО, докт. техн. наук, проф., НТУ “ХПИ”, Харьков;
В.И. РЕВУЦКИЙ, преподаватель – стажер, НТУ “ХПИ”, Харьков

СИНТЕЗ ОБОБЩЕННОЙ СТРУКТУРЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЬ - ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С НАДДУВОМ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЕМ

Статья посвящена созданию обобщенной структуры и построения математических моделей преобразователей параметров движения устройства дозирования топлива и скорости вращения турбокомпрессора дизель - генераторной установки с нагнетанием в массу дополнительного воздуха, подаваемого в дизель при резком приросте нагрузки.

Стаття присвячена створенню узагальненої структури та побудови математичних моделей перетворювачів параметрів руху пристрою дозування палива і швидкості обертання турбокомпресора дизель - генераторної установки з нагнітанням в масу додаткового повітря, що подається в дизель при різкому прирості навантаження.

The creation of a generalized structure and mathematical models of motion parameters of transducers fuel dosing body and the rotational speed of a turbocharger diesel engine - generator set with a lot of additional pressurized air to the diesel in the load-on has been described in the article.

Постановка проблемы. Дизель – электрические агрегаты получили широкое распространение в качестве источников электрической энергии во многих отраслях народного хозяйства. Для повышения энергетических показателей эти установки снабжаются автономным турбокомпрессором, подающим воздух в дизель и улучшающим, тем самым, процесс сгорания и превращения энергии топлива механическую работу. Однако в переходных режимах работы, вызванных набросами нагрузки, турбокомпрессор вследствие своей инерциальности не успевает в полной мере наращивать подачу наддувочного воздуха и рабочий процесс дизеля протекает неудовлетворительно [1]. Для улучшения последнего обеспечиваются специальные мероприятия по дополнительному воздухоснабжению дизеля [2].

Анализ литературы показывает, что в настоящее время уже имеются некоторые технические решения, обеспечивающие дополнительное воздухоснабжение дизель – генераторов с газотурбинным наддувом в переходных режимах работы [3 - 6], с учетом ряда управляющих и возмущающих воздействий. При этом, однако, отсутствуют обобщенная структура преобразователя соответствующих параметров в массу дополнительного воздуха и математические модели происходящих при этом процессов.

Цель статьи. Построение математической модели и синтез обобщенной структуры преобразователя параметров управления и режима работы дизель – генератора при массе дополнительно подаваемого воздуха.

Составим математическую модель процессов, описанных в [7 - 9].

На работающем двигателе измеряются скорость движения топливодозирующего органа ВНР и угловая скорость турбокомпрессора ω_k с помощью датчиков, выходные сигналы которых можно записать как

$$U_{HP} = K_{HP} V_{HP} \quad (1)$$

$$U_{TK} = K_{TK} \omega_k, \quad (2)$$

где K_{HP} – коэффициент передачи датчика скорости топливодозирующего органа, K_{TK} – коэффициент передачи датчика угловой скорости ТК.

Разностный сигнал этих датчиков интегрируется

$$U = \frac{1}{T_H} \int_{t_0}^{t_k} (K_{HP} V_{HP} - K_{TK} \omega_k) dt > 0, \quad (3)$$

где T_H – постоянная интегратора, и после усиления подается на обмотку электродинамического преобразователя (ЭДП), управляющего запорным клапаном дополнительного воздухоснабжения.

Перемещение якоря ЭДП определяется по формуле

$$X_{\text{вых}}(t) = \frac{K_{\mathcal{E}M} V_{\mathcal{E}}}{D_3}, \quad (4)$$

где $D_3 = \left(T_3 \frac{di}{dt} + 1 \right) \left(T_1^2 \frac{d^2 X}{dt^2} + T_2 \frac{dX}{dt} + 1 \right);$

T_3 – электрическая постоянная времени электромагнита;

i – мгновенное значение тока в обмотке электромагнита;

X – перемещение якоря электромагнита;

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{k_{II}}};$$

$$T_2 = \frac{\eta_{\mathcal{E}M}}{k_{II}};$$

V_3 – напряжение на обмотке электромагнита;

k_P – жесткость пружины электромагнита;

m – масса подвижных частей электромагнита;

$K_{\text{ЭМ}}$ – коэффициент передачи электромагнита;

$\eta_{\text{ЭМ}}$ – коэффициент демпфирования электромагнита.

$V(t) = K_{PEC} X(t)$, где K_{PEC} – коэффициент пропорциональности между выходным сечением клапана и перемещением якоря электромагнита.

Подача дополнительного воздуха приводит к увеличению давления наддува

$$P_S = P_{TK} + K_b K_{PEC} X(t), \quad (5)$$

где P_{TK} – давление наддува, создаваемое турбокомпрессором;

K_b – коэффициент пропорциональности между массой и давлением дополнительного воздуха.

При резком увеличении топливоподачи в случае наброса нагрузки сигнал (3) растет, поскольку ω_k изменяется много медленнее цикловой подачи топлива (на реальном двигателе), вызывает увеличение хода клапана, согласно (4), и подачу дополнительного воздуха в дизель, масса которого равна с учетом (3), (4), (5)

$$Q_D(t) = \frac{K_{pec}}{T_H} \cdot \frac{K_{\text{ЭДП}} \int_{t_0}^{t_k} (K_{HP} V_{HP} - K_{TK} \omega_k) dt}{D_3}, \quad (6)$$

где $K_{\text{ЭДП}}$ – коэффициент передачи электродинамического преобразователя по перемещению.

Подача дополнительного воздуха приводит к росту ω_k , что ранее уже отмечалось, и уменьшению напряжения (3). Увеличение ω_k влечет за собой возрастание P_{TK} , а снижение напряжения на обмотке исполнительного органа (электромагнитного или электродинамического преобразователя) – снижение массы дополнительного воздуха Q_D . Однако

$$P_s = P_{TK} + K_b Q_D \approx const. \quad (7)$$

При выходе дизеля в установившийся режим работы $K_{HP}V_{HP} = K_{TK}\omega_k$ и дополнительное воздухоснабжение согласно (3) отсутствует.

Таким образом, в рассмотренной модели $Q_D = Q_D(P_{TK}, h_p)$, благодаря чему имеет место согласование топливоподачи и воздухоснабжения дизеля в переходных режимах.

При плавном перемещении или неподвижном органе управления топливоподачей неравенство (3) не выполняется и дополнительный воздух не подается. Модель процессов, описанных в [8], отличается от рассмотренной выше в связи с двумя обстоятельствами. Во-первых, в переходном режиме дизеля, вызываемом изменением нагрузки, напряжение на обмотке запорного органа зависит еще и от разности фактического и минимально допустимого давлений в источнике сжатого воздуха, но не зависит от текущего значения угловой скорости ротора турбокомпрессора ω_k , во-вторых, отключение подачи дополнительного воздуха при окончании переходного процесса происходит при достижении частотой ω_k некоторого порогового значения. Таким образом, можно записать

$$U = \frac{1}{T_H} \int_{t_0}^{t_K} K_{HP}V_{HP} dt + K_{ДД}(P_{ИН} - P_{ИФ}), \quad (8)$$

где $K_{ДД}$ – коэффициент передачи датчика давления;

$P_{ИН}$ – минимально допустимое давление в источнике сжатого воздуха;

$P_{ИФ}$ – фактическое давление в источнике сжатого воздуха.

С учетом (8) вместо (6) запишем соотношение

$$Q_D = \frac{K_{pec}}{T_H} \cdot \frac{K_{ЭДП} \int_{t_0}^{t_K} K_{HP}V_{HP} dt - K_{ДД}(P_{ИН} - P_{ИФ})}{D_3} \quad (9)$$

Кроме того, для момента отключения дополнительного воздухоснабжения имеем $Q_D = 0$ при $\omega_k = \omega_{kn}$,

где ω_{kn} – пороговое значение угловой скорости турбокомпрессора.

Процесс управления двигателя [9] отличается от предыдущего тем, что напряжение на обмотке органа управления дополнительным воздухоснабжением описывается по закону:

$$U = \frac{1}{T_H} \int_{t_0}^{t_{HP}} (K_{HP} V_{HP} - K_{ДД} P_{ИФ}) dt , \quad (10)$$

где t_{HP} – время перемещения топливодозирующего органа.

Соотношение для массы дополнительно подаваемого сжатого воздуха с учетом (10) можно записать в виде

$$Q_D = \frac{K_{pec}}{T_H} \cdot \frac{K_{ЭДП} \int_{t_0}^{t_{HP}} (K_{HP} V_{HP} - K_{ДД} K_{ИФ}) dt}{D_9} . \quad (11)$$

Обобщенная блок – схема устройства подачи дополнительного объема воздуха в дизель показана на рис.

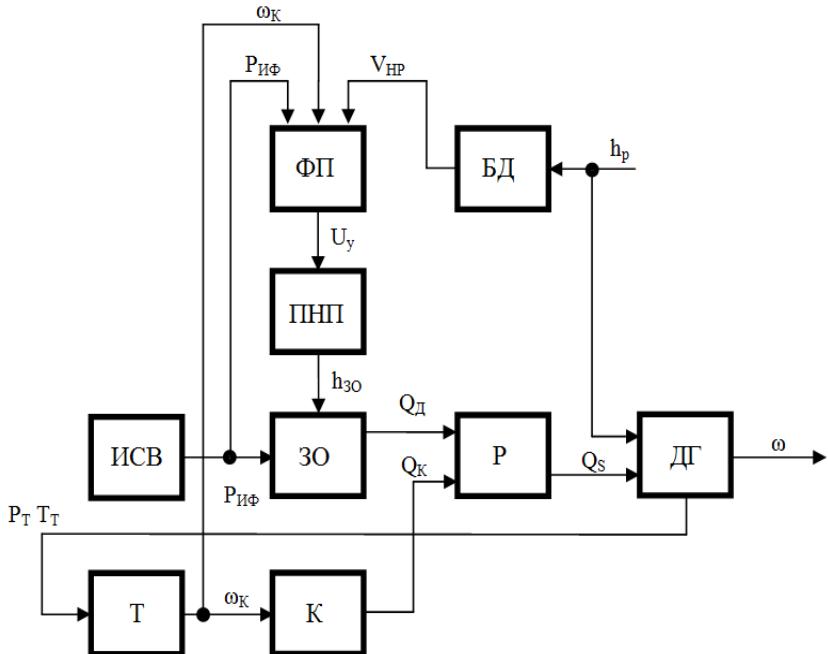


Рис. Обобщенная блок – схема устройства подачи дополнительного объема воздуха

На рисунке обозначены следующие элементы системы подачи дополнительного объема воздуха: ФП – функциональный преобразователь (может представлять собой микроконтроллер и усилитель мощности

выходного сигнала, который подается на исполнительный орган), БД – блок дифференцирования, ПНП – преобразователь «напряжение – перемещение», ИСВ – источник сжатого воздуха, ЗО – запорный орган (представляет собой в простейшем случае клапан с электромагнитным приводом, обеспечивающий два крайних положения (“открыто”/”закрыто”), а в более совершенных системах может использоваться линейный электромагнит, у которого перемещение якоря пропорционально изменению напряжения на обмотке), Р – ресивер, ДГ – дизель – генератор, Т – турбина, К – компрессор, h_p и V_{HP} – выход рейки топливодозирующего органа и скорость ее движения, ω и ω_K – угловая скорость дизель – генератора и компрессора, нагнетающего воздух в цилиндры дизеля, P_t и T_t – давление и температура газов перед турбиной, Q_k , Q_s и Q_d – суммарный расход, расход наддувочного и дополнительного воздуха, U_y – напряжение управления, h_{ZO} – перемещение запорного органа, P_{IF} – фактическое давление в источнике сжатого воздуха. Чтобы входной сигнал микроконтроллера не превышал допустимого диапазона изменения, между первичными датчиками режимов работы двигателей и непосредственно входными каналами микроконтроллера предусмотрены блоки согласования уровней сигналов.

Наиболее эффективно подобная система проявляет себя при увеличении нагрузки, превышающих 25 процентов номинальной мощности агрегата. При меньших приращениях нагрузки штатная система регулирования дизель – генератора обеспечивает его удовлетворительное воздухоснабжение и показатели качества переходного процесса.

Выражения (6), (9) и (11) представляют собой математические модели, достаточно полно описывающие процессы преобразования основных параметров, таких, как скорость движения топливодозирующего органа, угловую скорость турбокомпрессора, фактическое и номинальное давления в источнике сжатого воздуха, коэффициенты передачи и постоянные времени ресивера и электродинамического преобразователя и др. в массу дополнительного подаваемого в дизель сжатого воздуха. Эти модели легли в основу создания обобщенной структуры устройства подачи дополнительного воздуха, показанной выше на рисунке.

Действующий образец рассмотренной системы успешно прошел экспериментальные исследования и был внедрен на ПО “Завод им. Малышева” в составе системы автоматического регулирования дизель – генераторов мощностью около 2000 - 3000 кВт, благодаря чему улучшились показатели качества при эксплуатации. В частности, снизились расход топлива и провал оборотов, сократилась длительность переходного процесса, и уменьшилась дымность отработанных газов энергоустановки при внезапных приращениях нагрузки в среднем на 25 – 35 процентов.

В случае использования дизель – генератора комплексно с рассмотренной системой управления в качестве автономной электростанции

для выработки электроэнергии промышленной частоты наблюдается существенное повышение качества электроснабжения, а именно стабильность частоты и напряжения даже при самых неблагоприятных режимах эксплуатации.

Выводы. На основании разработанных математических моделей синтезирована обобщенная структура преобразователя, обеспечивающего дополнительное воздухоснабжение дизель – генератора при увеличении нагрузки (резком увеличении потребления активной мощности нагрузкой) и, тем самым, повышающего его технико – экономические показатели.

Список литературы: 1. Костромин А.М. Оптимальное управление локомотивом. – М.: Транспорт, 1979. – 119с. 2. Колыбин Ю.Н. Квазиоптимальные электронные регуляторы переходных режимов стационарных дизель-генераторов с дополнительным воздухоснабжением: Автореферат дис. на соискание степени кандидата технических наук/ Харьковский политехнический институт. – Харьков, 1986. – 18с. 3. Богаевский А.Б. Повышение топливной эффективности мощной транспортной дизельной установки за счет применения микроконтроллерного регулятора частоты вращения и мощности. / А.Б. Богаевский // Сборник докладов, XI научно – техническая конференция с международно участие, «Транспорт, экология - устойчиво развитие», ЕкоВарна. – 2005. – с. 459 – 463. 4. Богаевский А.Б. Определение параметров управления мощной транспортной дизель – генераторной установкой в переходных режимах. / А.Б. Богаевский // Вестник НТУ «ХПИ», тем. вып. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Харьков. – 2005. - №45. – с. 291 – 292. 5. Богаевский А.Б. Применение электромагнитных исполнительных двигателей пропорционального типа в системах автоматического регулирования частоты транспортных дизелей / А.Б. Богаевский, А.В. Басов, С.Г. Буряковский // В кн. «Проблемы автоматизированного электропривода». Труды н. – тех. конф. Харьков. – 1997. с. 259 – 260. (Автором запропонована модель електричного виконавчого органу як елементу системи забезпечення подачі палива). 6. Богасьвський О.Б. Оптимізація переходних процесів тепловозних дизелів з застосуванням електронних керуючих систем. / Е.Д. Тартаковський, В.О. Матяш, О.Б. Богаєвський, Д.О. Аулін // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ. – 2007. – вип. 86. – с. 177 – 181. (Автором показані переваги електронних систем при забезпеченні переходних режимів тепловозів). 7. Устройство для регулирования подачи дополнительного воздуха в двигатель внутреннего сгорания: А.с. 1495474. СССР. МКИ F02D41/10,23/02/ Борисенко А.Н., Колыбин Ю.Н. –№4238090/25-06; Заявл.28.04.87; Опубл.23.07.89. Бюл. № 27. – 3 с.:ил. 8. Пристрій керування дизелем з наддуванням : Деклараційний патент на корисну модель. № 8373. М. Кл. F02D43/00 41/00. Опубл. 15.08.2005. Бюл. №8. / Кравець В.О., Колибін Ю.М., Ріттер А.В. 9. Пристрій для керування дизелем з наддуванням: Патент на корисну модель №35848, Україна, 2008 : Кравець В.О., Колибін Ю.М., Заполовський М.Й., Баленко О.І.

Надійшла до редакції 14.04.12

Г.М. СУЧКОВ, докт. техн. наук, профессор, НТУ "ХПИ", Харьков;
О.Н. ПЕТРИЩЕВ, докт. техн. наук, профессор, НТУУ "КПИ", Киев;
С.В. ХАЩИНА, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ЭНЕГО- РЕССУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ С РАЗВИТОЙ ПЛОЩАДЬЮ ПОВЕРХНОСТИ

Приведены результаты исследований и разработок по использованию поверхностных волн для дефектоскопии металлоизделий. Показано, что использование импульсов поверхностных волн возбужденных электромагнитно-акустическим способом дает возможность экономить энергию, металл, инструмент. При этом производительность увеличивается в несколько раз.

Наведено результати досліджень та розробок з використання поверхневих хвиль для дефектоскопії металовиробів. Показано, що використання імпульсів поверхневих хвиль збуджених електромагнітно-акустичним способом дає можливість економити енергію, метал, інструмент. При цьому продуктивність збільшується в кілька разів.

The results of research and development with the use of surface waves for flaw detection hardware. It is shown that pulses of surface waves excited electromagnetic-acoustic method makes it possible to save energy, metal, tool. This performance is increased by several times.

Введение. Миллионы тонн металлопродукции выпускаются путем прокатки – листы, трубы, заготовки и т.д. Эти изделия имеют развитую поверхность, на которой могут быть дефекты: трещины, волосовины, закаты и др. Для исключения попадания к потребителям изделий с дефектами используют методы неразрушающего контроля [1]. Как правило, для обнаружения дефектов поверхности применяют традиционные методы: визуально-оптический [2], капиллярный[3], магнитный [4], вихревоковый [5] или ультразвуковой поверхностными волнами [6]. Они имеют недостатки. Визуально-оптический метод не позволяет обнаруживать дефекты под слоем окалины и загрязнений, особенно это касается дефектов с малым раскрытием. Капиллярный и магнитный, в этом случае, требуют значительных затрат на расходные материалы и подготовку поверхности. Вихревоковый метод требует сложной аппаратурной реализации и много времени для обеспечения контроля изделий по всей площади. Традиционный ультразвуковой метод контроля поверхностными волнами применяется редко из-за использования контактного способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов, что приводит к снижению достоверности

дефектоскопии, значительному расходу энергии и ресурсов при обязательной специальной подготовке поверхности объекта контроля (ОК). Использование бесконтактного электромагнитно-акустического (ЭМА) способа возбуждения и приема позволяет повысить производительность и достоверность контроля, но обладает недостаточной чувствительностью. Следовательно, научно-техническая задача по разработке новых средств высокопроизводительного энерго-ресурсосберегающего метода для контроля объектов с развитой поверхностью является актуальной.

Основная часть. В работе [7] показано, что повысить чувствительность ЭМА контроля возможно за счет увеличения магнитного поля или мощности генератора зондирующих импульсов (ГЗИ). Анализ работы ЭМА дефектоскопа показал, что существенное увеличение величины индукции магнитного поля более 1...1,3 Тл практически невозможно. Кроме того, значительная величина индукции поляризующего магнитного поля приводит к существенному увеличению силы прижатия ЭМА преобразователя (ЭМАП) к контролируемому ферромагнитному изделию. Следовательно, это затрудняет сканирование изделия и не позволяет эффективно обеспечивать контроль по всей развитой поверхности. Существенно увеличить мощность ГЗИ также не удается, поскольку она ограничена возможностями существующих радиоэлементов или требует дорогостоящей разработки. Кроме того, увеличение мощности ГЗИ может приводить к пробою высокочастотной катушки индуктивности ЭМАП и, как следствие, к снижению надежности дефектоскопии.

Повысить чувствительность при высокой производительности контроля возможно за счет совершенствования методов контроля развитых поверхностей с учетом их формы и геометрических размеров. Естественно, что при этом необходимо соответствующим образом изменять характеристики и параметры ЭМАП.

На данный момент авторами разработан вариант возбуждения и приема поверхностных волн ЭМА преобразователями в листовых, трубчатых и других изделиях, имеющих развитые кромки.

Метод реализуется путем сканирования поверхности ОК ЭМА преобразователем преимущественно вдоль изделия в средней его части. Возбуждают одновременно двунаправленные в противоположных направлениях импульсы ультразвуковых колебаний, тем же или другим ЭМА преобразователем. Принимают отраженные импульсы поверхностных ультразвуковых волн и анализируют их характеристики. При появлении импульсов отраженных от дефектов поверхности изделия, последовательно

возбуждают и принимают ультразвуковые импульсы только в одном из определенных противоположно направленных направлений, что позволяет определить координаты местоположения обнаруженного дефекта и его условные размеры по характеристикам принятых односторонних ультразвуковых импульсов.

На рис.1 изображена схема ультразвукового бесконтактного контроля изделий при отсутствии дефектов поверхности рис.1(а) и при наличии дефектов поверхности рис.1(б). На рис.1(а, б) обозначены: 1 - изделие, 2 - электромагнитно-акустический преобразователь 3 - правый (по рисунку) направление распространения поисковых поверхностных ультразвуковых импульсов, 4 - левый (по рисунку) направление распространения поисковых поверхностных ультразвуковых импульсов, 5 - направление сканирования поверхности изделия электромагнитно-акустическим преобразователем, 6, 7 - импульсы отраженные от торцов изделия, 8 - дефект поверхностного слоя изделия, 9 - импульс отраженный от дефекта.

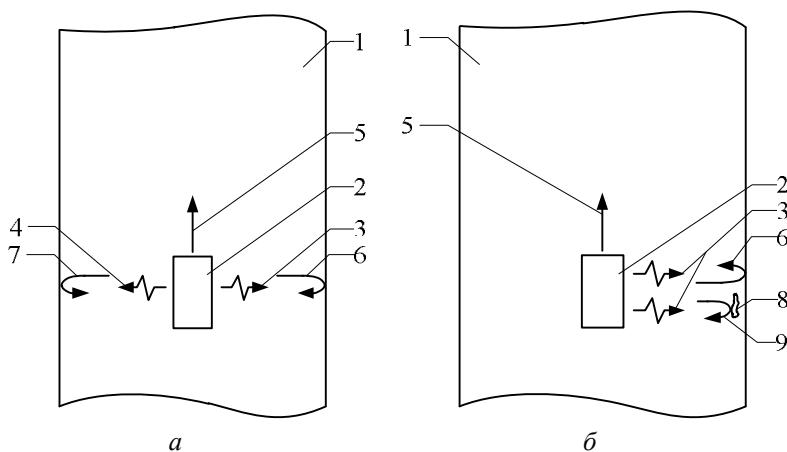


Рис. 1. Схема обнаружения дефектов при ультразвуковом контроле изделий ЭМА преобразователем:

а) при отсутствии дефектов поверхности; *б)* при наличии дефектов поверхности

В соответствии с рисунками на поверхности изделия 1 размещают ЭМАП 2 для возбуждения поверхностных ультразвуковых импульсов, которые распространяются в двух противоположных направлениях 3 и 4. ЭМАП 2 перемещают вдоль середины изделия в направлении 5, сканируя поверхностными ультразвуковыми импульсами поверхность и

приповерхностные слои изделия 1. При отсутствии дефекта поисковые импульсы отражаются от торцов 6, 7 изделия и возвращаются в ЭМАП 2 где после усиления регистрируются.

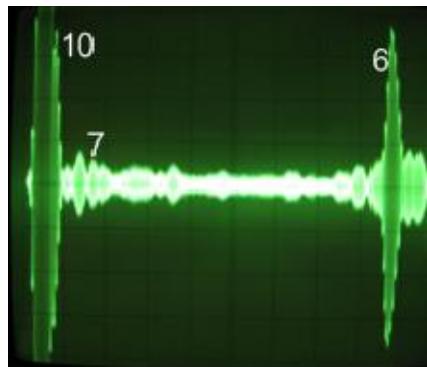


Рис. 2. Разворотка на экране осциллографа при отсутствии дефектов на поверхности листа из стали ст.3 толщиной 30 мм длиной 1000мм.

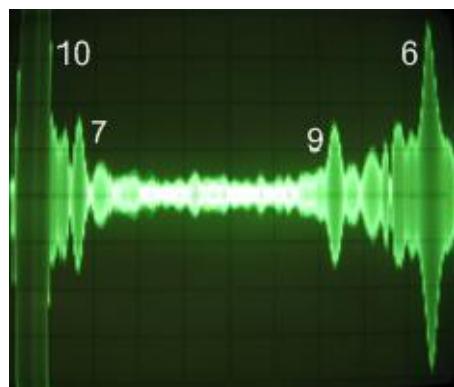


Рис. 3. Разворотка на экране осциллографа при наличии дефекта в виде пропила глубиной 2,2 мм на поверхности листа из стали ст.3 толщиной 30 мм. Расстояние дефекта от ЭМАП – 900 мм

Полученная реализация данного метода на образце размером $1000 \times 200 \times 30$ мм приведена на рис.2. Ввиду геометрического размера образца ЭМАП был смешен к краю ОК. При отсутствии дефекта 8, на временной развертке между зондирующими импульсом 10 и импульсом отраженным от противоположного торца 6 дополнительных импульсов не

будет. Импульс 7 получен от ближнего торца. Таким образом, обеспечивается высокая производительность контроля всей поверхности изделия 1, например металлического листа.

Если при проведении контроля между импульсом 10 и импульсами 6 появится дополнительный импульс 9 от дефекта 8, то дефектоскоп начинает возбуждать поисковые импульсы 3 или 4 по очереди. При этом принятые сигналы будут иметь вид, как показано на рис.3. Так как волна незначительной мощности возбуждается в противоположную сторону и отражается от ближнего торца, то на экране виден импульс 7. Это дает возможность определить местоположение дефекта и оценить его условные размеры и, соответственно, оценить качество изделия. После завершения процедуры определения местоположения дефекта и оценки его условных размеров, дефектоскоп переключается в исходный поисковый режим контроля.

Выводы. 1. Использование ЭМА способа возбуждения и приема поверхностных волн Рэлея при дефектоскопии поверхности листов, труб и аналогичных изделий позволяет, по сравнению с традиционным контактным методом, исключить затраты на контактную жидкость, зачистку поверхности перед проведением контроля, экономить энергию, металл и инструменты. 2. Разработанный новый способ контроля качества поверхности позволяет существенно повысить производительность контроля при высокой точности дефектоскопии. 3. Экспериментально подтверждено, что использование ЭМА преобразователей позволяет выполнять высокопроизводительное обнаружение дефектов по всей поверхности изделия на значительных расстояниях от ЭМАП.

Список литературы: 1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с. 2. Каневский, И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с. ISBN. 3. Глоба С.Н. Капиллярный неразрушающий контроль. Чувствительность и оценка результатов контроля: Учебн.-метод. пособие / С.Н. Глоба, Б.М. Горкунов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – 72 с. 4. Герасимов, В.Г. Неразрушающий контроль. Книга 3. Электромагнитный контроль / В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков: – М.: Высш. шк., 1992. – 312 с. 5. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.2: В 2 кн. – Контроль герметичности. Вихревоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с. 6. Сучков Г.М. Электромагнитно – акустические преобразователи: учеб.-метод. пособие [Текст] / Г.М. Сучков, В.П. Себко. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – 64 с. 7. Повышение чувствительности ЭМА приборов / Г.М. Сучков, А.В. Донченко, Е.Л. Ноздрачева и др. // Дефектоскопия. – 2008. – №2. – С. 15–22.

Надійшла до редакції 15.04.12

I.P. ВАЩИШАК, аспірантка, ІФНТУНГ, Івано-Франківськ

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДЗЕМНИХ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ ЇХ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Описано процес збудження та поширення акустичних коливань в підземних теплових мережах безканальню прокладки з трубопроводами в пінополіуретоновій ізоляції від металевої поверхні трубопроводу до поверхні ґрунту. Розглянуто нові інформативні параметри акустичного поля, які характеризують технічний стан підземної теплової мережі. Проаналізовано вплив виду дефекту трубопроводу і теплової та гідроізоляції теплової мережі на зміну інформативних параметрів.

Описан процесс возбуждения и распространения акустических колебаний в подземных тепловых сетях бесканальной прокладки с трубопроводами в пенополиуретоновой изоляции от металлической поверхности трубопровода до поверхности почвы. Рассмотрены новые информативные параметры звукового поля, которые характеризуют техническое состояние подземной тепловой сети. Проанализировано влияние вида дефекта трубопровода и тепловой и гидроизоляции тепловой сети на изменение информативных параметров.

The process of excitation of acoustic vibrations in underground heating networks with channel-free laying pipelines in pinopolyuretonoviy isolated from the metal surface of the pipeline to the ground. Considers new informative parameters of acoustic fields that characterize the condition of underground heat network. The influence of the type of defect and pipe thermal and hydro insulations thermal network to change the informative parameters.

Останнім часом в Україні для прокладання підземних теплових мереж широко застосовуються трубопроводи з пінополіуретановою ізоляцією (ППУ) в поліетиленовій оболонці. Застосування цих трубопроводів для прокладання теплових мереж безканальним способом повинно забезпечити значне збільшення робочого ресурсу теплових мереж – до 30 років, зменшити кількість пошкоджень в десятки разів та різко знизити теплові втрати – до 2-3%, що зумовить відповідні економічні вигоди [1,2].

Однак, практичний досвід показує, що вже через 3-5 років експлуатації тепломереж з трубами в ППУ-ізоляції мають місце аварійні ситуації, пов'язані з розгерметизацією трубопроводів і витіканням теплоносія. Причинами насикрізного пошкодження металу труб є: неякісне виконання зварних швів; локальна виразкова корозія внутрішніх поверхонь через дефекти металу і порушення водно-хімічного режиму; порушення герметичності муфтових з'єднань і кінцевих заглушок ізоляції з попаданням корозійно-агресивної вологи на зовнішню поверхню труб; попадання вологи в ППУ-ізоляцію при проведенні монтажних робіт; слабка адгезія і відшаровування пінополіуретану від поверхні труб з утворенням порожнин, де може накопичуватися влага, механічне пошкодження поліетиленової гідроізоляції, руйнування елементів операційно-дистанційного контролю [1-3].

Вітчизняний та закордонний досвід експлуатації труб з ППУ-ізоляцією показує, що трубопроводи теплових мереж, які діють без систем сигналізації є потенційно небезпечними через можливість виникнення неконтрольованих витоків теплоносія в ґрунт, оскільки до теперішнього часу практично не існує методів і засобів для визначення місця витоку труби в ППУ-ізоляції, а місцеположення наскрізного дефекту металевої труби в більшості випадків не відповідає місцю виходу теплоносія з-під поліетиленової гідроізоляції.

Найбільш поширений при контролі теплових мереж канальної прокладки метод реєстрації акустичного шуму струменя теплоносія через дефект трубопроводу, для мереж безканальної прокладки з трубопроводами в ППУ-ізоляції застосувати також практично неможливо. Це пояснюється тим, що потужність акустичного випромінювання залежить від швидкості витікання теплоносія через дефект, яка, у свою чергу, залежить від різниці тиску в трубі і затрубному просторі, куди відбувається витік. Оскільки в трубопроводі з ППУ-ізоляцією затрубний простір заповнений теплою ізоляцією, яка зовні ущільнена шаром поліетиленової гідралічної ізоляції, то вода з трубопроводу не попадає в ґрунт, а поступово просочується в затрубний простір, зволожуючи теплою ізоляцію і практично не створюючи акустичного шуму [4]. Коливання стінок трубопроводу, створені за рахунок пульсації рідини в трубах не мають значної потужності, оскільки вони практично повністю поглинаються в шарі теплою ізоляції, і на поверхні ґрунту не реєструються.

Усе вищенаведене дає змогу стверджувати, що питанням контролю технічного стану підземних теплових мереж безканальної прокладки з трубопроводами в ППУ-ізоляції на даний час є доволі актуальним.

Для вирішення цього питання пропонується застосувати удосконалений акустичний метод контролю, суть якого полягає в примусовому збудженні генератором акустичних коливань у металевому трубопроводі такої потужності, що дасть змогу коливанням поширитись через шари ізоляції трубопроводу та засипок до поверхні ґрунту і зареєструвати їх на поверхні ґрунту приймачем (мікрофоном).

Збуджені акустичні коливання, поширюючись від металевого трубопроводу до поверхні ґрунту, змінююватимуть свої характеристики в залежності від наявності того чи іншого виду дефекту тепловмережі.

Щоб визначити параметри, які несуть інформацію про технічний стан підземного трубопроводу з ППУ-ізоляцією, змоделюємо процес поширення акустичних коливань від одиничного трубопроводу за схемою: генератор – поверхня металевого трубопроводу – теплова ізоляція - гідроізоляція – піщана засипка - ґрунтовая засипка – ґрунт – приймач.

Генерування акустичної хвилі в металевому трубопроводі відбувається наступним чином. Генератор подає в метал трубопроводу сигнал у вигляді акустичного збудження металу труби з інтенсивністю J ($\text{Вт}/\text{м}^2$). При цьому трубопровід можна представити як акустичний випромінювач, що генерує циліндричну акустичну хвилю з такими характеристиками [5]:

- потенціалом швидкості:

$$\phi = \frac{A_0}{\sqrt{r}} \cdot e^{j(\omega t - k r)}, \quad (1)$$

де $\frac{A_0}{\sqrt{r}}$ – амплітуда, ($\text{м}^2/\text{с}$); r – радіус циліндричної хвилі, м; $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ –

хвильове число, $1/\text{м}$; c – швидкість звуку, $\text{м}/\text{с}$; ω – циклічна частота, Гц; t – час, с;

- коливальною швидкістю:

$$v_r = \frac{A_0}{\sqrt{r}} \cdot \left(j \cdot k - \frac{1}{2 \cdot r} \right) \cdot e^{j(\omega t - k r)}; \quad (2)$$

- акустичним тиском:

$$p = j \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot \phi, \quad (3)$$

де ρ_0 – густина середовища (металевий трубопровід), в якому поширюється акустична хвиля, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Оскільки безпосередньому вимірюванню піддається тільки дійсна частина комплексних швидкості та тиску, то в подальшому будемо розглядати зміни тільки дійсних частин цих комплексних величин.

При моделюванні процесу проходження акустичних коливань через граници розділу середовищ з різними акустичними характеристиками системи «трубопровід – ґрунт» особливе значення має врахування граничних умов. В даному випадку як граничну умову приймемо рівність коливальних швидкостей на границях розділу середовищ. Кінцевою задачею моделювання є визначення напрямку поширення та величини коливальної швидкості від металевої поверхні трубопроводу до поверхні ґрунту і величини звукового тиску на поверхні ґрунту. Моделювання здійснюватимемо відносно заданої інтенсивності акустичного збудження, яка є функцією коливальної швидкості, частоти і звукового тиску.

Інтенсивність акустичного збудження для циліндричної хвилі, згідно з [5] рівна:

$$J = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot A_0^2}{\lambda^2 \cdot r} \cdot \rho_0 \cdot c_0, \quad (4)$$

де c_0 – швидкість звуку в металевому трубопроводі, м/с; λ – довжина хвилі, м.

Підставивши у формулу (4) вирази $A_0 = v_r \cdot \sqrt{r}$ та $\lambda = \frac{c_0}{f}$, отримаємо формулу для визначення коливальної швидкості у місці акустичного збудження на металевій поверхні трубопроводу:

$$v_r = \sqrt{\frac{J \cdot c_0}{2 \cdot \pi^2 \cdot \rho_0 \cdot f^2}}, \quad (5)$$

де f – частота сигналу збудження, c^{-1} .

Безпосереднє використання теорії поширення циліндричної хвилі для опису процесу розповсюдження акустичної хвилі від підземного трубопроводу з ППУ-ізоляцією до поверхні ґрунту наштовхується на значні труднощі, оскільки акустична система «трубопровід – ґрунт» складається з багатьох середовищ з різними акустичними характеристиками. Крім того при переході акустичної хвилі через межу розділу середовищ відбуваються процеси її заломлення і відбивання, а геометричні параметри акустичної системи «трубопровід – ґрунт» задають жорсткі обмеження на використання детально опрацьованих теоретичних моделей акустики. Тому для опису процесу розповсюдження акустичної хвилі застосуємо певні спрощення [6].

Виріжемо в поперечному перерізі системи «трубопровід – ґрунт» тонкий шар Δz і розглянемо поширення циліндричної хвилі вздовж променя OB (рис.1). За початок координат приймемо вісь трубопроводу. При досить малій товщині шару Δz поширення акустичної циліндричної хвилі в малому радіусі $\frac{\Delta z}{2}$ навколо акустичного променя можна вважати як поширення плоскої хвилі з амплітудою коливальної швидкості, рівної v_r .

Оскільки система «трубопровід – ґрунт» (рис.1) симетрична відносно площини $x = 0$ достатньо розглядати поведінку акустичної хвилі в I-ому квадранті ($x \geq 0, y \geq 0$).

Основним фактором формування акустичного поля на поверхні ґрунту над трубопроводом тепломережі є поступове поглинання енергії акустичних коливань при розповсюджені їх в різних середовищах.

В загальному випадку затухання коливальної швидкості акустичної хвилі визначається з виразу [7]:

$$v = v_0 \cdot e^{-\alpha \cdot l}, \quad (6)$$

де v_0 – початкова амплітуда коливальної швидкості, м/с; α – коефіцієнт поглинання акустичної хвилі, 1/м; l – довжина ходу акустичної хвилі в поглинаючому середовищі, м.

Коефіцієнт поглинання акустичної хвилі α залежить від теплопровідності, густини та в'язкості середовища, крізь яке хвиль проходить і знаходиться за формулою:

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2 \cdot \rho_0 \cdot c^3} \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \eta + \eta' + x \cdot \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right) \quad (7)$$

де ω - частота, Гц; ρ_0 - густина середовища, кг/м³; c - швидкість звуку в середовищі, м/с; η - коефіцієнт поперечної в'язкості, Па·с; η' - коефіцієнт об'ємної в'язкості, Па·с; x - коефіцієнт теплопровідності середовища, Вт/(м·К); c_v - питома теплоємність при постійному об'ємі, Дж/(кг·К); c_p - питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг·К).

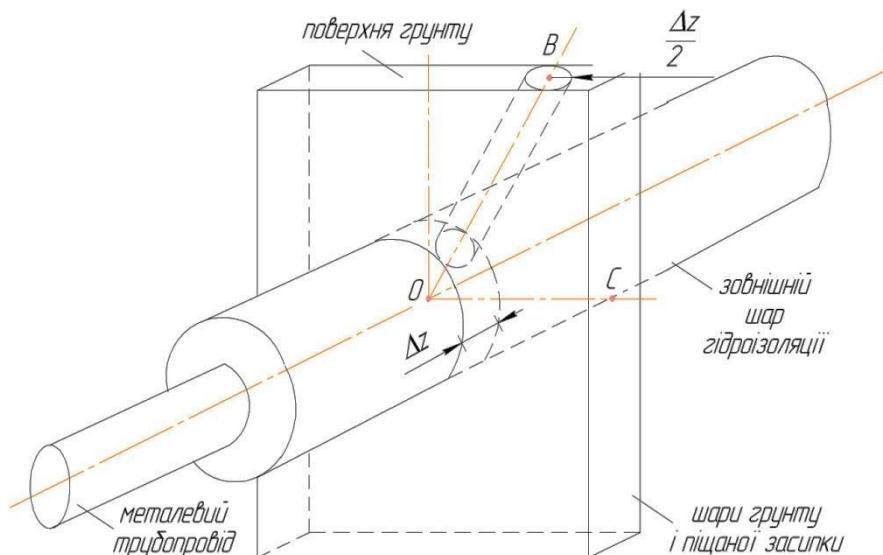


Рис. 1. Модель поширення акустичної хвилі по системі «трубопровід – ґрунт»

Оскільки для випромінювання акустичних коливань застосовується зовнішня поверхня тіла трубопроводу, по якому транспортується теплоносій, то коефіцієнт затухання коливань в металі труби на формування акустичного

поля на поверхні ґрунту матиме певний вплив [6]. Зміна коливальної швидкості акустичної хвилі вздовж ділянки трубопроводу визначається за формулою:

$$v_T = v_r \cdot e^{-\alpha_T \cdot l_T}, \quad (8)$$

де v_r – початкова амплітуда коливальної швидкості (амплітуда збудження), м/с; α_T – коефіцієнт поглинання акустичної хвилі в металі труби, 1/м; l_T – довжина ділянки трубопроводу, м.

В цілому система «трубопровід – ґрунт» (рис.1) складається з кількох елементів, які мають різні акустичні характеристики. Цими елементами є:

- 1) матеріал трубопроводу, по якому подається теплоносій (сталь);
- 2) теплова ізоляція трубопроводу (спінений пінополіуретан);
- 3) гідроізоляція трубопроводу (поліетилен);
- 4) піщана засипка трубопроводу (пісок);
- 5) ґрунтовая засипка трубопроводу;
- 6) нерозпушений в процесі прокладання ґрунт.

Розглянемо зміну амплітуди коливальної швидкості вздовж променя OB (рис.2), напрямок якого задається кутом φ . В тілі трубопроводу акустичні коливання поширюються строго по радіусу труби і не залежать від напрямку. Акустична хвиля (рис.2), поширюючись від зовнішньої поверхні металової труби, спочатку проходить шар теплової пінополіуретанової ізоляції (ТІ) з товщиною h_{TI} і коефіцієнтом поглинання α_{TI} . Амплітуда коливальної швидкості v_{TI} в цьому випадку буде рівна:

$$v_{TI} = v_T \cdot e^{-\alpha_{TI} \cdot h_{TI}}. \quad (9)$$

На границі ТІ та поліетиленової гідроізоляції (ГІ) у точці O' (рис. 2) відбудеться часткове проходження і часткове відбивання акустичної хвилі, оскільки ТІ та ГІ мають різні акустичні імпеданси. При нормальному падінні акустичної хвилі на границю розділу ТІ та ГІ коефіцієнт проходження по коливальній швидкості $T_{v_{TI/GI}}$ знаходиться з виразу [7]:

$$T_{v_{TI/GI}} = \frac{2 \cdot Z_{TI}}{Z_{TI} + Z_{GI}} = \frac{2 \cdot \rho_{TI} \cdot c_{TI}}{\rho_{TI} \cdot c_{TI} + \rho_{GI} \cdot c_{GI}}, \quad (10)$$

де Z_{TI} - акустичний опір ТІ, Па·с/м; Z_{GI} - акустичний опір ГІ, Па·с/м; ρ_{TI} - густина ТІ, кг/м³; ρ_{GI} - густина ГІ, кг/м³; c_{TI} – швидкість звуку в ТІ, м/с; c_{GI} – швидкість звуку в ГІ, м/с.

Амплітуда коливальної швидкості пройшовшої через границю розділу ТІ та ГІ акустичної хвилі $v_{\text{ТІ/ГІ}}$ розраховується з формули:

$$v_{\text{ТІ/ГІ}} = v_{\text{ТІ}} \cdot T_{v_{\text{ТІ/ГІ}}} = v_{\text{ТІ}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{\text{ТІ}} \cdot c_{\text{ТІ}}}{\rho_{\text{ТІ}} \cdot c_{\text{ТІ}} + \rho_{\text{ГІ}} \cdot c_{\text{ГІ}}}. \quad (11)$$

Далі акустична хвиля проходить шар ТІ з товщиною $h_{\text{ГІ}}$ і коефіцієнтом поглинання $\alpha_{\text{ГІ}}$. Амплітуда коливальної швидкості $v_{\text{ГІ}}$ буде рівна:

$$v_{\text{ГІ}} = v_{\text{ТІ/ГІ}} \cdot e^{-\alpha_{\text{ГІ}} \cdot h_{\text{ГІ}}}. \quad (12)$$

На границі ГІ та піщаної засипки (ПЗ) у точці A (рис. 2) відбудеться часткове проходження та відбивання акустичної хвилі аналогічно як і при перетині границі ТІ та ГІ. Шляхом переіндексації змінних отримаємо вираз для визначення амплітуди коливальної швидкості пройшовшої хвилі $v_{\text{ГІ/ПЗ}}$:

$$v_{\text{ГІ/ПЗ}} = v_{\text{ГІ}} \cdot T_{v_{\text{ГІ/ПЗ}}} = v_{\text{ГІ}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{\text{ГІ}} \cdot c_{\text{ГІ}}}{\rho_{\text{ГІ}} \cdot c_{\text{ГІ}} + \rho_{\text{ПЗ}} \cdot c_{\text{ПЗ}}}, \quad (13)$$

де $\rho_{\text{ПЗ}}$ - густина ПЗ, $\text{кг}/\text{м}^3$; $c_{\text{ПЗ}}$ – швидкість звуку в ПЗ, $\text{м}/\text{с}$.

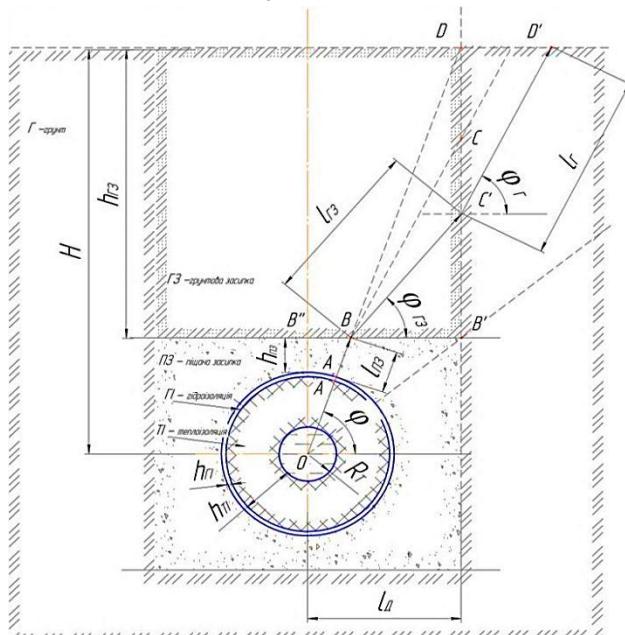


Рис. 2. Розрахункова модель ходу акустичного променя

В шарі ПЗ акустична хвиля так само буде поширюватись по радіусу труби, однак товщина шару піщаної засипки вже буде залежати від кута напрямку поширення променя φ . Таким чином акустична хвиля буде поширюватись в одному з трьох напрямків. У першому напрямку акустичний промінь буде перетинати горизонтальну границю піщаної і ґрунтової (ГЗ) засипок, в другому напрямку – границю ПЗ, ГЗ і нерозпушеноого ґрунту (Г), у третьому напрямку - границю ПЗ і Г.

Розглянемо випадок, коли акустичний промінь перетинатиме найбільшу кількість меж розділу середовищ (границі ПЗ та ГЗ, ГЗ та Г). Довжина ходу акустичної хвилі в ПЗ $l_{\text{ПЗ}}$ (відрізок AB на рис.2) знаходиться з властивостей прямокутного трикутника OBB'' і дорівнює:

$$l_{\text{ПЗ}} = \frac{(R_T + h_{\text{ПЗ}} + h_{\Gamma\Gamma}) \cdot (1 - \sin \varphi) + h_{\text{ПЗ}}}{\sin \varphi}, \quad (14)$$

де R_T – діаметр металевої труби, м; $h_{\text{ПЗ}}$ – товщина піщаної засипки, м.

Тоді амплітуда коливальної швидкості в ПЗ $v_{\text{ПЗ}}$, враховуючи коефіцієнт поглинання $\alpha_{\text{ПЗ}}$ буде рівною:

$$v_{\text{ПЗ}} = v_{\Gamma/\text{ПЗ}} \cdot e^{-\alpha_{\text{ПЗ}} \cdot l_{\text{ПЗ}}}. \quad (15)$$

Розглянемо поведінку акустичної хвилі на межі ПЗ та ГЗ (точка B на рис. 2). Оскільки ПЗ і ГЗ мають різні акустичні властивості, то на границі їх розділу відбувається заломлення хвилі зі зміною кута поширення пройшовшої хвилі в ГЗ.

Кут заломлення акустичної хвилі можна визначити з загального закону Снеліуса (рис.3):

$$\frac{c_{\text{ПЗ}}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} = \frac{c_{\Gamma\Gamma}}{\sin(\theta_{\Gamma\Gamma})}, \quad (16)$$

звідки

$$\cos \theta_{\Gamma\Gamma} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{\Gamma\Gamma}} = \sqrt{1 - \left(\frac{c_{\Gamma\Gamma}}{c_{\text{ПЗ}}} \cdot \cos \varphi \right)^2}, \quad (17)$$

де $c_{\Gamma\Gamma}$ – швидкість звуку в ГЗ, м/с.

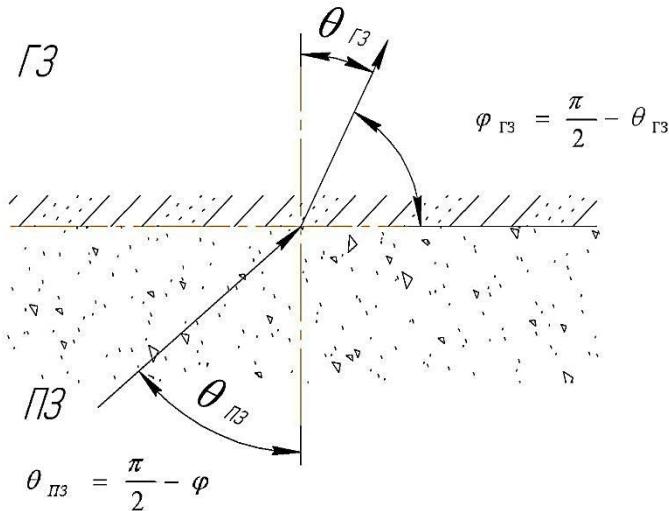


Рис. 3. Заломлення акустичного променя на межі піщаної та ґрунтової засипок

Слід зауважити, що при заломленні акустичної хвилі виникають граничні кути, при яких хвиля вже не перейде з ПЗ в ГЗ, а повернеться в ПЗ. Оскільки акустична хвиля збуджується в діапазоні $(0 \div 2\pi)$, тому граничні кути для кожного конкретного акустичного променя, що падає на границю розділу двох середовищ, матимуть різні значення [7]. На поверхні реєструватиметься тільки хвилі, які пройдуть через границю розділу двох середовищ.

При падінні акустичної хвилі на границю ПЗ та ГЗ під кутом $\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)$ коефіцієнт проходження по коливальній швидкості $T_{v_{ПЗ/ГЗ}}$ знаходиться з виразу [7]:

$$T_{v_{ПЗ/ГЗ}} = \frac{2 \cdot Z_{ГЗ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{Z_{ПЗ} \cdot \cos(\theta_{ГЗ}) + Z_{ГЗ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} = \\ = \frac{2 \cdot \rho_{ГЗ} \cdot c_{ГЗ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{\rho_{ПЗ} \cdot c_{ПЗ} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{ГЗ}}{c_{ПЗ}} \cdot \cos \varphi\right)^2} + \rho_{ГЗ} \cdot c_{ГЗ} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}, \quad (18)$$

де $Z_{\text{ПЗ}}$ – акустичний опір ПЗ, Па·с/м; $Z_{\Gamma 3}$ – акустичний опір ГЗ, Па·с/м; $\rho_{\Gamma 3}$ – густина ГЗ, кг/м³.

Амплітуда коливальної швидкості пройшовшої через границю розділу ПЗ. ГЗ акустичної хвилі $v_{\text{ПЗ}/\Gamma 3}$ розраховується з виразу:

$$v_{\text{ПЗ}/\Gamma 3} = v_{\text{ПЗ}} \cdot T_{v_{\text{ПЗ}/\Gamma 3}} = v_{\text{ПЗ}} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{\Gamma 3} \cdot c_{\Gamma 3} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{\rho_{\text{ПЗ}} \cdot c_{\text{ПЗ}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{\Gamma 3}}{c_{\text{ПЗ}}} \cdot \cos\varphi\right)^2} + \rho_{\Gamma 3} \cdot c_{\Gamma 3} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}. \quad (19)$$

Внаслідок явища заломлення подальший напрямок поширення акустичних хвиль вже буде відрізнятись від променя OB (кут напряму φ). Визначимо новий кут напряму поширення хвилі $\varphi_{\Gamma 3}$. З виразу (16) та рис.3 видно, що він дорівнює:

$$\varphi_{\Gamma 3} = \arcsin\left(\frac{c_{\Gamma 3}}{c_{\text{ПЗ}}} \cdot \cos\varphi\right). \quad (20)$$

Визначимо довжину ходу акустичного променя в ГЗ $l_{\Gamma 3}$ (відрізок BC' на рис.2):

$$l_{\Gamma 3} = \frac{l_{\Delta} - ctg\varphi \cdot (h_{\text{ПЗ}} + R_{\text{T}} + h_{\text{ТI}} + h_{\text{ГI}})}{\cos\varphi_{\Gamma 3}}, \quad (21)$$

де l_{Δ} – відстань від осі трубопроводу до межі ПЗ і Г, м.

Тоді амплітуда коливальної швидкості $v_{\Gamma 3}$, враховуючи коефіцієнт поглинання $\alpha_{\Gamma 3}$ буде рівною:

$$v_{\Gamma 3} = v_{\text{ПЗ}/\Gamma 3} \cdot e^{-\alpha_{\Gamma 3} \cdot l_{\Gamma 3}}. \quad (22)$$

На границі ГЗ та Г у точці C' (рис. 2) відбудеться часткове проходження та відбивання хвилі аналогічно як при перетині границі ПЗ та ГЗ. Провівши переіндексації змінних, отримаємо вирази для кута заломлення хвилі, коефіцієнта проходження по коливальній швидкості $T_{v_{\Gamma 3}/\Gamma}$, амплітуди коливальної швидкості пройшовшої хвилі $v_{\Gamma 3/\Gamma}$, нового кута напряму поширення хвилі φ_{Γ} :

$$\frac{c_{\Gamma 3}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma 3}\right)} = \frac{c_{\Gamma}}{\sin(\theta_{\Gamma})}, \quad (23)$$

звідки

$$\cos \theta_{\Gamma} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{\Gamma}} = \sqrt{1 - \left(\frac{c_{\Gamma}}{c_{\Gamma 3}} \cdot \cos \varphi_{\Gamma 3} \right)^2}, \quad (24)$$

де c_{Γ} – швидкість звуку в нерозпущеному ґрунті, м/с.

Значення коливальної швидкості $T_{v_{\Gamma 3/\Gamma}}$ можна знайти з формули:

$$T_{v_{\Gamma 3/\Gamma}} = \frac{2 \cdot Z_{\Gamma} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma 3}\right)}{Z_{\Gamma 3} \cdot \cos(\theta_{\Gamma}) + Z_{\Gamma} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma 3}\right)} = \\ = \frac{2 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma 3}\right)}{\rho_{\Gamma 3} \cdot c_{\Gamma 3} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{\Gamma}}{c_{\Gamma 3}} \cdot \cos \varphi_{\Gamma 3} \right)^2} + \rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma 3}\right)}, \quad (25)$$

де Z_{Γ} - акустичний опір нерозпущеного ґрунту, Па·с/м; ρ_{Γ} - густина нерозпущеного ґрунту, кг/м³.

$$v_{\Gamma 3/\Gamma} = v_{\Gamma 3} \cdot T_{v_{\Gamma 3/\Gamma}} = v_{\Gamma 3} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma 3}\right)}{\rho_{\Gamma 3} \cdot c_{\Gamma 3} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{\Gamma}}{c_{\Gamma 3}} \cdot \cos \varphi_{\Gamma 3} \right)^2} + \rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma 3}\right)}, \quad (26)$$

$$\varphi_{\Gamma} = \arcsin\left(\frac{c_{\Gamma}}{c_{\Gamma 3}} \cdot \cos \varphi_{\Gamma 3}\right). \quad (27)$$

Хід хвилі в нерозпущеному ґрунті l_{Γ} (відрізок $C'D'$ на рис.2) визначається з властивостей трикутників $BB'C'$ та $C'D'D'$ і знаходиться з виразу:

$$l_{\Gamma} = \frac{h_{\Gamma 3} - l_{\Gamma 3} \cdot \sin \varphi_{\Gamma 3}}{\sin \varphi_{\Gamma}}, \quad (28)$$

де $h_{\Gamma 3}$ – товщина ґрунтової засипки, м.

Амплітуда коливальної швидкості v_{Γ} , враховуючи коефіцієнт поглинання α_{Γ} розрахується за формулою:

$$v_{\Gamma} = v_{\Gamma 3/\Gamma} \cdot e^{-\alpha_{\Gamma} l_{\Gamma}}. \quad (29)$$

Акустична хвиля приходить до поверхні ґрунту під деяким кутом в кожній точці поверхні над трубопроводом. Тому в атмосферу перейде тільки певна її частина $v_{\Gamma/\Pi}$ (точка D' на рис. 2), яка знаходитьться з виразу:

$$v_{\Gamma/\Pi} = v_{\Gamma} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{\Pi} \cdot c_{\Pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma}\right)}{\rho_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_{\Pi}}{c_{\Gamma}} \cdot \cos \varphi_{\Gamma}\right)^2} + \rho_{\Pi} \cdot c_{\Pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\Gamma}\right)}, \quad (30)$$

де ρ_{Π} – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_{Π} – швидкість звуку в повітрі, $\text{м}/\text{с}$.

За отриманим значенням коливальної швидкості $v_{\Gamma/\Pi}$ можна розрахувати інтенсивність J_{Π} акустичної хвилі, яка перейде з поверхні ґрунту у повітря:

$$J_{\Pi} = \frac{v_{\Gamma/\Pi}^2 \cdot \rho_{\Pi} \cdot c_{\Pi}}{2}. \quad (31)$$

Надлишковий акустичний (звуковий) тиск в повітрі над поверхнею ґрунту в точці вимірювання розраховується з виразу:

$$p_{\Pi} = \sqrt{2 \cdot J_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi} \cdot c_{\Pi}} = v_{\Gamma/\Pi} \cdot \rho_{\Pi} \cdot c_{\Pi}. \quad (32)$$

Оскільки поверхня вимірювального мікрофона має певну площину, а моделювання проводилось для тонкого акустичного променя, то для визначення звукового тиску, який буде вимірюваний мікрофоном безпосередньо потрібно взяти інтеграл по площині мікрофона S_m :

$$\int_0^{S_M} p_{\Pi} \cdot ds . \quad (33)$$

На практиці необхідно розрахувати значення інтенсивності J , з якою необхідно збудити акустичну хвилю в металевому трубопроводі для того, щоб вона змогла пройти крізь всі шари і була зафіксована на поверхні ґрунту мікрофоном в зоні його максимальної чутливості. Значення J залежатиме від геометричних параметрів трубопроводу тепломережі (діаметр, товщини ізоляції, глини залягання, видів засипок, тощо), тому в кожному конкретному випадку буде іншим.

Інформація про стан підземного трубопроводу (у вигляді вимірюваного в деякій точці над трубопроводом акустичного тиску) може бути отримана шляхом порівняння значення акустичного (звукового) тиску в суміжних точках вимірювання вздовж та поперек осі пролягання трубопроводу.

Інформативними параметрами, які характеризують вид пошкодження теплової мережі, є: коефіцієнт затухання α ; градієнт температури в шарі, від величини якого залежить коефіцієнт тепlopровідності; густина середовища та надлишковий акустичний тиск на частотах, нижчих за 500 Гц. Взаємозв'язок між цими параметрами та видами дефектів трубопроводів тепломережі наведено в таблиці.

Таблиця
Характер зміни інформативних параметрів в залежності від виду дефекту
теплової мережі

Види дефектів	Інформативні параметри			
	Коефіцієнт затухання	Густина середовища	Градієнт температури	Надлишковий акустичний тиск
Свищ зі зволоженням теплоізоляції	Зменшується	Збільшується	Збільшується	-
Пошкодження теплової ізоляції (без зволоження)	Зменшується	Зменшується	Зменшується	-
Пошкодження гідроізоляції	Зменшується	Різко зменшується	Збільшується	-
Розрив металу з пошкодженням теплової та гідроізоляцій	Різко зменшується	Збільшується	Збільшується	Збільшується

Зміна коефіцієнта затухання α та тепlopровідності за рахунок дефектів трубопроводу буде набагато більшою, ніж їх зміна за рахунок неоднорідності ґрунтової та піщаної засипок.

З вищепереданого випливає, що визначення характеристик акустичного поля на поверхні ґрунту від працюючого підземного трубопроводу з пінополіуретановою ізоляцією є досить складним завданням. Це пояснюється як геометричними характеристиками об'єкта, так і фізичними властивостями окремих його частин.

Для підвищення достовірності результатів контролю технічного стану підземних теплових мереж удосконаленим акустичним методом додатково застосовано електромагнітний вид контролю. Це дозволило набагато точніше визначати вісь пролягання та глибину залягання трубопроводу, а також з вищою точністю визначати місце його дефекту. Результати проведених досліджень дали змогу створити інформаційно-вимірювальну систему для контролю підземних теплових мереж з трубопроводами в ППУ-ізоляції, принцип дії якої базується на удосконаленому акустичному методі з додатковим застосуванням електромагнітного та теплового методів контролю.

В даний час здійснюється перевірка адекватності розробленої моделі поширення акустичних коливань на установці для дослідження підземних теплових мереж, описаній в [9].

- Список літератури:**
- 1.** Хворостов И. В. К вопросу о надежности тепловых сетей с трубами в пенополиуретановой изоляции / И. В. Хворостов // Новости теплоснабжения. – 2000. - № 01.
 - 2.** Самойлов Е. В. Достоверность акустической диагностики трубопроводов тепловых сетей / Е.В. Самойлов // Новости теплоснабжения. – 2005. – № 2. – С. 47-52.
 - 3.** Поливанов В. И. Система контроля качества тепловых сетей / В. И. Поливанов, Г. Х. Умеркин // Энергонадзор и энергобезопасность. – 2008. - №2.
 - 4.** Самойлов Е. В. Эффективность применения корреляционных течеискателей для определения мест утечек из трубопроводов теплоснабжения / Е.В. Самойлов, Ю.И. Тужилкин // Новости теплоснабжения. – 2001. - № 7. – С. 24 – 27.
 - 5.** Лепендин Л.Ф. Акустика: Учеб. пособие для вузов / Л.Ф. Лепендин. - М.: Высш. шк., 1978. - 448 с.
 - 6.** Борисов Л.П. Звукоизоляция в машиностроении / Л.П. Борисов, Д.Р. Гужас. - М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
 - 7.** Соловьевна И.П. Теория волновых процессов. Акустические волны / И.П. Соловьевна, С.Н. Шабунин. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ, 2004. – 142 с.
 - 8.** Исакович М.А. Общая акустика: Учеб. пособие / М.А. Исакович . - М.: Наука, 1973. - 496 с.
 - 9.** Ващишак I.P. Розробка установки для дослідження підземних двотрубних теплових мереж з імітацією дефектів / I.P. Ващишак // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – Х.: Техніка, 2011. – Вип. 101. – С. 199-207. – (Серія «Технічні науки і архітектура»).

Надійшла до редакції 14.04.12

С.В. АВРАМЕНКО, ДВНЗ «ДОННТУ», Донецк;
В.П. ТАРАСЮК, канд. техн. наук, доц. ДВНЗ «ДОННТУ», Донецк

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В БАРАБАНЕ КОТЛА

В работе аргументирована актуальность мониторинга уровня жидкости в барабане котла и рассмотрены существующие средства измерения уровня. Уровень в барабане оценивается как многозвездный параметр. Определены факторы, влияющие на точность измерения уровня: динамика давления, температуры и разности плотностей воды и газа. Составлено уравнение баланса для уровня жидкости в барабане котла с учетом дестабилизирующих факторов. Предложен алгоритм определения уровня жидкости в барабане с учетом дестабилизирующих факторов, который позволяет синтезировать структурную схему системы мониторинга уровня жидкости в барабане котла.

У роботі аргументована актуальність моніторингу рівня рідини в барабані котла та розглянуто існуючі засоби вимірювання рівня. Рівень у барабані оцінюється як багатоланковий параметр. Визначено фактори, що впливають на точність вимірювання рівня: динаміка тиску, температури і різниці густин води і газу. Складено рівняння балансу для рівня рідини в барабані котла з урахуванням дестабілізуючих факторів. Запропоновано алгоритм визначення рівня рідини в барабані з урахуванням дестабілізуючих факторів, який дозволяє синтезувати структурну схему системи моніторингу рівня рідини в барабані котла.

The paper argued the importance of monitoring the fluid level in the boiler drum and reviewed the existing means of measuring the level. The level in the drum is evaluated as multi-tier option. Factors affecting the accuracy of the measurement of: Dynamics of pressure, temperature and density differences of water and gas. Compiled by the balance equation for the liquid level in the drum of the boiler, taking into account the destabilizing factors. An algorithm for determining the level of liquid in the drum, taking into account the destabilizing factors, which allows to synthesize a block diagram of a system for monitoring the liquid level in the drum of the boiler.

Общая постановка проблемы. Эффективная эксплуатация барабанных парогенераторов в условиях теплоэлектроцентралей и теплоэлектростанций может осуществляться при условии строго поддержания уровня воды в барабане в некоторых допускаемых пределах. Для уменьшения затрат на внеочередные пуски и ремонтные работы котлоагрегата при аварийных остановках необходим оперативный контроль уровня воды в барабане современных мощных парогенераторов, имеющих весьма ограниченный запас воды. Это является важной и актуальной задачей при их эксплуатации [1].

Цели и задачи. Одним из основных требований, предъявляемых к энергооборудованию, является высокая надежность и большой ресурс, что определяет экономические показатели энергоустановок. Разработка оборудования минимально возможных габаритов и массы приводит к его высокой теплонапряженности. К наиболее дорогим, сложным и функционально необходимым элементам оборудования относятся парогенераторы, основой которых является толстостенный барабан котла.

Существующие системы контроля уровня воды в барабане парогенераторов с малой паропроизводительностью и низким давлением пара в барабане основаны на непосредственном наблюдении за уровнем по водомерному устройству. В этом случае применяют показывающие дифманометры-уровнемеры [1]. Их недостатком является то, что сразу после продувки, уровень в водомерной колонке значительно выше исходного. По мере охлаждения воды, уровень приближается к начальному. Температура в барабане может изменяться от (450-550) °C на выходе до (200-300)°C на входе. Уменьшение температуры питательной воды на 100 °C при неизменной нагрузке котла и коэффициенте избытка воздуха приводит к росту температуры перегретого пара на (25-30) °C, следовательно он может находиться за пределами видимости водомерной колонки. Т.е. уровень в барабане может быть на (10-30) мм выше уровня в колонке, что может привести к аварийной ситуации. Разность этих уровней зависит от исходного уровня, изменения температуры и давления в барабане. Графики (см. рис. 1) показывают, что с увеличением исходного уровня и с изменением температуры или давления в барабане разность уровней в барабане и водомерной колонке возрастает при одинаковых исходных уровнях. Очевидно, что подходить к оценке уровня в барабане необходимо не как одно-, а многозначенному параметру. Соответственно контроль уровня должен осуществляться при помощи многопараметрического комплекса средств измерения.

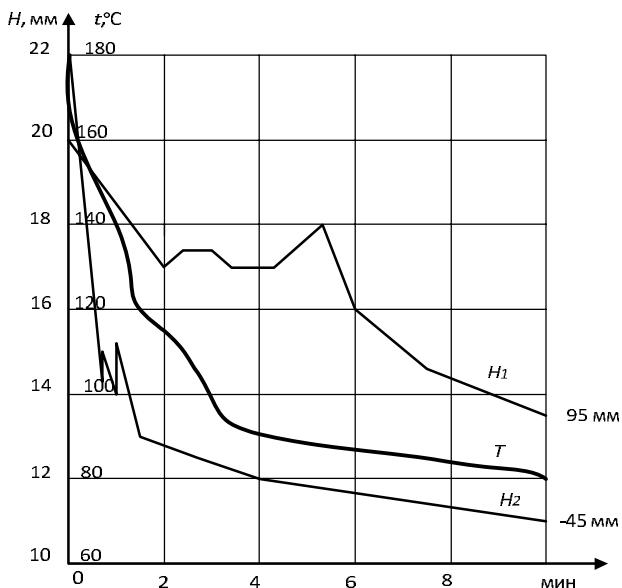


Рис. 1. Изменение уровня H и температуры T в водомерной колонке во времени после ее продувки при стабильном давлении и начальных значениях уровней:

$$H_1=95\text{мм}, H_2=45\text{мм}$$

Целью работы является обеспечение контроля уровня жидкости в барабане котла тепловой электростанции, путем многопараметрического измерения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

- определить факторы, влияющие на точность измерения уровня;
- провести анализ существующих методов и средств измерения уровня в барабане котла;
- проанализировать существующие математические модели процесса измерения уровня в барабане котла с учетом всех дестабилизирующих факторов;
- разработать структурную схему системы мониторинга уровня жидкости в барабане котла и алгоритм ее функционирования.

Основная часть. Регулирование питания котельных агрегатов и регулирование давления в барабане котла главным образом сводится к поддержанию баланса между отводом пара и подачей воды. Параметром, характеризующим баланс, является уровень воды в барабане котла (см. рис.2). Надежность работы котельного агрегата во многом определяется качеством регулирования уровня. При повышении давления, снижение уровня ниже допустимых пределов, может привести к нарушению циркуляции в экранных трубах, в результате чего произойдет повышение температуры стенок обогреваемых труб и их пережег. Повышение уровня также ведет к аварийным последствиям, так как возможен заброс воды в пароперегреватель, что вызывает выход его из строя.

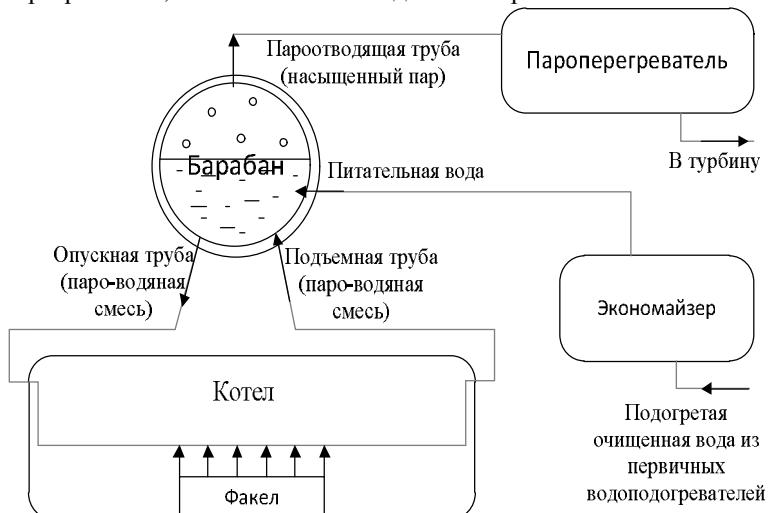


Рис. 2. Циркуляция воды в барабанном котле с естественной циркуляцией

В связи с этим, к точности поддержания заданного уровня предъявляются очень высокие требования. Низший уровень воды должен быть не менее чем на 25 мм выше нижней видимой кромки стекла водоуказателя, а высший уровень — не менее, чем на 25 мм ниже верхней видимой кромки водоуказателя (сверх этого уровня нельзя накачивать воду в котел во избежание выброса воды в паропровод). Расстояние между высшим и низшим уровнями выбирают от 50 до 100 мм (в зависимости от размеров котла).

Качество регулирования питания также определяется равенством подачи питательной воды. Необходимо обеспечить равномерное питание котла водой, так как частые и глубокие изменения расхода питательной воды могут вызвать значительные температурные напряжения в металле экономайзера.

Контроль соотношения газ-воздух необходим с точки зрения физико-экономических характеристик. Сигнализация о срабатывании защиты, действующей на останов котла, необходима для соблюдения техники безопасности и предотвращения аварийных ситуаций. При выпуске воды из барабана, уровень воды в нем понижается, вследствие этого может быть нарушена циркуляция и вызван пережег труб донных экранов. Если защита сработает без промедления, то возможно предотвратить выход из строя парогенератора. При уменьшении нагрузки парогенератора, интенсивность горения в топке снижается. Горение становится неустойчивым и может прекратиться. В связи с этим должна быть предусмотрена защита по погашению факела [2,3].

При измерении уровня воды H в барабанах паровых котлов в настоящее время применяются уровнемеры, работающие по принципу измерения разности давлений, создаваемых постоянным столбом жидкости в уравнительном сосуде и столбом жидкости в барабане котла. Двухкамерный, однокамерный или комбинированный уравнительный сосуд присоединяется к специальным штуцерам барабана котла или к штуцерам водомерного стекла. Камера переменного уровня прибора соединяется с паровым пространством барабана и плюсовой полостью уровнемера.

Для контроля уровня в барабане котла необходимо учесть все процессы, оказывающие дестабилизирующее влияние на баланс системы «котел-барабан» (см. рис.3). Поведение данной системы обусловлено общим массовым и энергетическим балансом. Параметры на входе в систему: Q — расход теплового потока на входе в систему, q_f — массовый расход питательной воды, q_s — массовый расход пара. Параметры на выходе системы: P — давление в барабане, l — уровень воды в барабане, ρ' и ρ'' — плотность воды и пара в состоянии насыщения при давлении P , $\text{кг}/\text{м}^3$.

Массовый баланс системы можно представить как:

$$\frac{d}{dt} [\xi_s V_{st} + \xi_w V_{wt}] = q_f - q_s, \quad (1)$$

где ξ_s, ξ_w - удельная плотность пара и воды соответственно, V_{st}, V_{wt} - объем пара и воды всей системы соответственно.

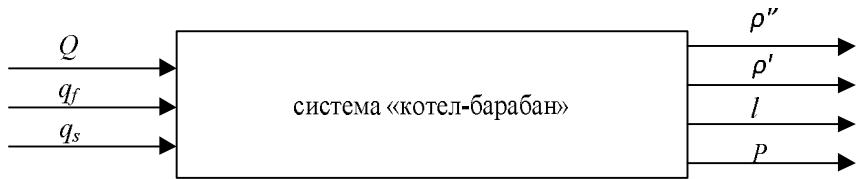


Рис. 3. Система «Котел-барабан»

Общий энергетический баланс системы:

$$\frac{d}{dt} [\xi_s u_s V_{st} + \xi_w u_w V_{wt} + m_t c_p t_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s, \quad (2)$$

где m_t - общая масса металлических труб, c_p - удельная теплоемкость металла, t_m - температура металла, u_s, u_w - удельная внутренняя энергия пара и воды соответственно, h_f, h_s - удельная энталпия питательной воды и насыщенного пара. Если учесть, что энергия:

$$u = h - \frac{p}{\xi}.$$

Таким образом, общий энергетический баланс может быть записан в виде:

$$\frac{d}{dt} [\xi_s h_s V_{st} + \xi_w h_w V_{wt} - p V_t + m_t c_p t_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s, \quad (3)$$

h_w - удельная энталпия воды, V_t - полный объем барабана:

$$V_t = V_{st} + V_{wt}.$$

Температура металла может быть выражена, как функция давления, предполагая, что изменения температуры металла строго связаны с изменениями в температуре насыщения пара t_s и таким образом с изменением давления P . Температура металла в стационарном состоянии близка к температуре насыщения и имеет незначительную динамику.

Правая часть формулы (3) представляет энергетический поток, возникающий в системе в результате сжигания топлива и циркуляции потоков питательной воды и пара.

Рассмотрим распределение пара в барабане. При открытии парового клапана, уровень воды в барабане возрастает, т.к. давление будет падать. Предположим, что все величины распределены по времени t в пространстве

z , и в любом поперечном сечении барабана величины принимают одинаковые значения. Таким образом, пространственное распределение может быть описано одной координатой z , а все переменные являются функциями от t и z . Тогда массовый и энергетический балансы для нагретого участка барабана с площадью поперечного сечения A будут соответственно равны:

$$\begin{aligned} A \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \xi \cdot h}{\partial t} + \frac{\partial q \cdot h}{A \cdot \partial z} &= \frac{Q}{V}. \end{aligned}$$

С учетом удельных энталпий насыщенного пара и воды определим внутреннюю энергию пароводяной смеси:

$$h = \alpha_m \cdot h_s + (1 - \alpha_m)h_w = h_w + \alpha_m \cdot h_c, \quad (4)$$

где $h_c = h_s - h_w$ - энталпия конденсации, α_m - массовая доля пара в потоке, указывающая на качественный состав смеси, которую можно определить из условия, что система находится в статическом состоянии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial q \cdot h}{\partial z} &= q \cdot h_c \cdot \frac{\partial q \cdot \alpha_m}{\partial z} = \frac{Q \cdot A}{V}. \end{aligned}$$

Следовательно, из (4):

$$\alpha_m = \frac{Q \cdot A}{V \cdot q \cdot h_c} \cdot z.$$

α_m можно представить как зависимость от количественного состава пара на выходе из барабана α , при условии, что известна нормированная длина самого барабана ξ :

$$\alpha_m(\xi) = \alpha_r \cdot \xi \quad 0 \leq \xi \leq 1. \quad (5)$$

Однако, чтобы учесть все процессы, протекающие в барабане, необходима более сложная – объемная модель. Объемная и массовая доля пара связаны посредством: $\alpha_v = f(\alpha_m)$, где:

$$f(\alpha_m) = \frac{\zeta_w \cdot \alpha_m}{\zeta_s + (\zeta_w - \zeta_s) \cdot \alpha_m}. \quad (6)$$

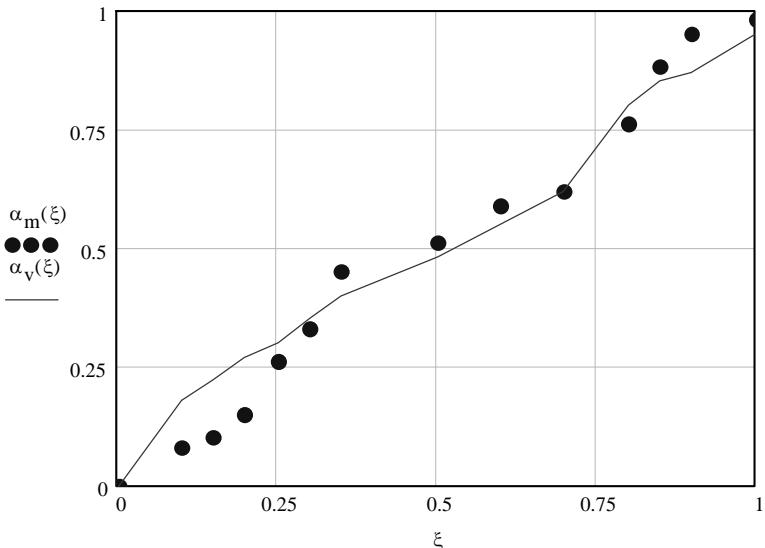


Рис. 4. Сравнение объемного и массового распределения пара (качественный состав пароводяной смеси) по всей длине барабана

Исходя из (4) и (5) можно построить модель распределения пара в стационарном режиме. Для получения модели уровня пара важно описать общее количество пара в барабане, которое определяется средней объемной долей пара в барабане. Предположим, что массовая доля линейна вдоль барабана как показано в (5), то находим среднее распределение объема пара:

$$\bar{\alpha}_v = \int_0^1 \alpha_v(\xi) d\xi = \frac{1}{\alpha_r} \cdot \int_0^1 f(\xi) d\xi = \frac{\zeta_w}{\zeta_w - \zeta_s} \cdot \left[1 - \frac{\zeta_w - \zeta_s}{(\zeta_w - \zeta_s) \cdot \alpha_r} \cdot \ln \left(1 + \frac{\zeta_w - \zeta_s}{\zeta_s} \cdot \alpha_r \right) \right]. \quad (7)$$

Будем считать, что массовое распределение пара является линейным, т.е. уравнение (5) имеет смысл в условиях динамики системы. Ключевым моментом при описании данной системы является перенос массы и энергии между водой и паром путем конденсации и испарения. При моделировании каждой фазы отдельно не учитывается этот перенос. Этого можно избежать, если подойти к описанию процессов, происходящих в барабане через механизмы распределения воды и пара и конденсации.

Очевидно, что нельзя обойтись без учета процессов, происходящих в самой системе. Учитывая распределения пара, мы можем представить уровень жидкости в барабане через объем воды в барабане V_w :

$$V_w = V_t - V_\rho + (1 - \bar{\alpha}_v) V_{in} \quad (8)$$

Где V_ρ - объем пароводяной смеси, возникающей в результате наличия разности плотностей воды и пара $\Delta(\rho' - \rho'')$, V_{in} - объем входящей в барабан питательной воды.

Таким образом, с учетом вышеописанной математической модели распределения паро-водяной смеси в барабане, можно выделить ряд факторов, определяющих уровень воды в барабане парогенератора. Необходимо учитывать изменение давления ΔP , температуры ΔT и разности плотностей воды и пара $\Delta(\rho' - \rho'')$. Нами предложено представить контроль уровня жидкости в барабане H_δ в виде терминального функционала:

$$H_\delta = f(h_1, h_2(\Delta P), h_3(\Delta T), h_4(\Delta(\rho' - \rho''))) \quad (9)$$

где h_2, h_3, h_4 – весовые коэффициенты, отражающие погрешность вносимую динамикой давления, температуры и плотностей жидкости и газа соответственно. Предложенный функционал можно записать в виде многочлена:

$$H_\delta = h_1 + h_2(\Delta P) + h_3(\Delta T) + h_4(\Delta(\rho' - \rho'')), \quad (10)$$

решение которого позволит обеспечить контроль уровня жидкости в барабане котла тепловой электростанции путем многопараметрического измерения дестабилизирующих факторов.

Для сосуда, размеры которого известны, учтем погрешность, возникающую в результате перепада давления, которую определим из равенства:

$$h_2(\Delta P) = l\gamma' + L\gamma_T - H_\delta(\gamma' - \gamma'') - r\gamma'' + \Delta p_l, \text{кг/м}^2, \quad (11)$$

где ΔP - расчетный перепад давлений для текущего значения уровня в барабане, кг/м^2 ; l – длина горячей части трубы, m ; L – длина холодной части трубы, m ; γ_T - удельный вес воды в холодной части трубы при температуре окружающего воздуха $T^\circ C$, кг/м^3 ; H_δ - текущее значение уровня в барабане, отсчитываемое от оси нижней врезки сосуда, m ; γ', γ'' - удельный вес воды и пара соответственно при температуре насыщения, кг/м^3 ; r –

расстояние между нижней врезкой в сосуд и трубкой слива, m ; Δp_l - перепад давлений между плюсовой и минусовой камерами датчика, залитого холодным конденсатом, $\text{кг}/\text{м}^2$.

Об уровне H_δ в барабане можно судить по изменению температуры столба воды. Это позволит учесть, что вследствие охлаждения уровень воды в колонке оказывается ниже действительного уровня в барабане и разность между ними возрастает с увеличением давления и повышением уровня в барабане.

Т.о., погрешность, возникающая в результате перепада давлений с учетом охлаждения горячей части трубы может быть определена по формуле:

$$h_2(\Delta P) = l\gamma^* + L\gamma_T - H_\delta(\gamma' - \gamma'') - r\gamma'' + \Delta p_l, \text{ кг}/\text{м}^2, \quad (12)$$

где γ^* средний удельный вес воды в горячей части плюсовой трубы, определенный при средней температуре воды T_{cp} , $^{\circ}\text{C}$, $\text{кг}/\text{м}^2$.

Средняя температура воды в горячей части определится из уравнения:

$$\begin{aligned} T_{cp} &= \frac{T' - \Delta T_a}{2}, \\ \Delta T_a &= (T' - T_c)(1 - \frac{1}{e^m}), \end{aligned} \quad (13)$$

где T' - температура насыщения при данном давлении, $^{\circ}\text{C}$; ΔT_a - разность между температурой насыщения и температурой нижней точки водомерной колонки, $^{\circ}\text{C}$; T_c - температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$,

$$m = \frac{r}{(T' - T_c)c_p} \cdot \frac{H_\delta}{r - H_\delta},$$

где r - скрытая теплота парообразования, $\text{ккал}/\text{кг}$; c_p - средняя теплоемкость воды в интервале температур от T' до температуры нижней точки водомерной колонки, $\text{ккал}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$. Весовой коэффициент, отражающий погрешность по температуре определим как:

$$h_3(\Delta T) = \frac{\Delta T_a}{T_{cp}}; \quad (14)$$

С увеличением уровня и давления в барабане разность между уровнем в барабане и водомерной колонке возрастает. При этом коррекция только по давлению или только по температуре не обеспечивает достаточной точности измерения уровня воды в барабане мощных парогенераторов при меняющихся давлениях пара в широких пределах, т.к. изменение разности

плотностей воды и пара $\Delta(\rho' - \rho'')$ не является линейной функцией давления (или температуры) пара в барабане.

Для определения плотности контролируемой среды в рабочих условиях предлагаем применение плотномеров, не изменяющих структуру потока. Точку отбора пробы газа расположим в верхней, а жидкостей - в нижней части горизонтального участка трубопровода. Корректировку уровня по показаниям плотномера предлагаем выполнить по формуле:

$$h_4(\Delta(\rho' - \rho'')) = \frac{\rho \cdot p}{p_p} = \frac{\rho \cdot p}{p - \Delta p_p} = \frac{\rho}{1 - \frac{\Delta p_p}{p}} = \rho \cdot c_p, \quad (15)$$

где $\frac{1}{1 - \frac{\Delta p_p}{p}} = c_p$ - поправочный коэффициент; ρ_o - показания плотномера; p_p - давление в чувствительном элементе плотномера; Δp_p - разность между давлениями на входе в колонку и в чувствительном элементе плотномера.

Предлагается структурная схема системы мониторинга уровня воды в барабане котла, которая приведена на рисунке 5:

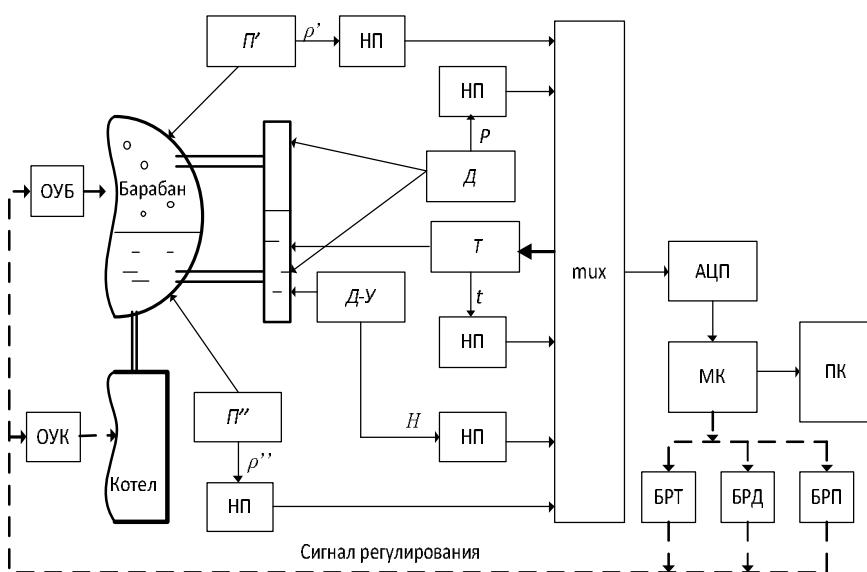


Рис. 5. Укрупненная структурная схема системы мониторинга уровня воды в барабане котла

Измерение уровня предлагается осуществлять дифманометром-уровнемером Δ -У. Измерение плотности воды и пара плотномерами Π' и Π''

соответственно, давление - датчиком давления D и температуру – датчиком температуры T . Это дает возможность корректировки измеренных значений уровня с учетом всех влияющих параметров. В процессе обработки скорректированных величин в микропроцессорном блоке происходит их сравнение с граничными, и, в случае необходимости, в блоках регулирования температуры, давления и плотности (БРТ, БРД, БРП соответственно) вырабатывается сигнал регулирования. Таким образом, с помощью органов управления барабаном (ОУБ) и котлом (ОУК) можно обеспечить постоянный контроль уровня в барабане, а следовательно - уменьшить количество аварийных остановов, снизить затраты на незапланированные запуски и восстановительные работы.

ВЫВОДЫ.

1. Проведен анализ использующихся в настоящее время средств измерения уровня воды в барабане котла, выявлены их недостатки.

2. Рассмотрена математическая модель, описывающая распределение пара и воды и определяющая уровень воды в барабане исходя из представление об объемном соотношении пара и воды. Предложено ввести в нее коррекцию по температуре, давлению и разности плотностей воды и газа, что повысит точность измерений.

3. Предложена структурная схема компьютерной системы мониторинга уровня воды в барабане котла, применение которой позволит уменьшить количество аварийных остановов, а также снизить затраты на незапланированные запуски и восстановительные работы.

Список литературы: 1. Цане С.В. Газотурбинные и парогенераторные установки тепловых электростанций.- М.: МЭИ, 2002.- 426 с. 2. Сидельковский Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1991. 390 с. 3. Резников М.И. Паровые котлы тепловых электростанций / М.И. Резников, Ю.М. Липов. М.: Энергоиздат, 1999. 240 с.

Надійшла до редакції 15.04.12

O.M. ГРИГОР'ЄВ, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Харків;

З.В. БЛИК, наук. спів роб., НТУ «ХПІ», Харків;

О.В. САКУН, канд. біол. наук, НТУ «ХПІ», Харків;

В.В. МАРУЩЕНКО, канд. біол. наук, доцент, НТУ «ХПІ», Харків

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ НА ТОЧКОВІ ДЖЕРЕЛА ФОТОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ПЛОЩИНІ, ВКЛЮЧАЮЧИ ІМПУЛЬСНІ

Проаналізовано недоліки автоматичного визначення напрямку на точкові джерела фотонного випромінювання. Враховуючи недоліки запропонованій способ для визначення напрямку на джерело фотонного випромінювання в площині в діапазоні кутів 2π радіан, який має можливість визначати не лише постійні точкові джерела, а ще і імпульсні. Способ реалізований на основі приладу, в який входять три блока детектування гамма-випровінювання на базі телурид-кадмієвих детекторів з поглиначами та чотирьох спектрометричних багатоканальних аналізаторів імпульсів. Поглиначі за формуєю являють собою: один коаксіальний циліндр, другий – асиметричний, третій – секторний.

Проанализированы недостатки автоматического определения направления на точечные источники фотонного излучения. Учитывая недостатки предложен способ для определения направления на источник фотонного излучения в плоскости в диапазоне углов 2π радиан, который имеет возможность определять не только постоянные точечные источники, а еще и импульсные. Способ реализован на основе прибора, в который входят три блока детектирования гамма-випровинювання на базе телерадио-кадмиеевых детекторов с поглотителями и четырех спектрометрических многоканальных анализаторов импульсов. Поглотители по форме представляют собой: один коаксиальный цилиндр, второй - асимметричный, третий - секторный.

Directionfinding on the point source of photonic radiation in plane, including pulse. The lacks of automatic directionfinding are analysed on the point source of photonic radiation. Taking into account failings the method is offered for a directionfinding on the source of photonic radiation in plane the range of angles 2π radian which is in a position to determine not only point sources but impulsive ones also. A method is realized on the basis of device in which three blocks of detection gamma rays on a base of tellurium cadmium detectors with absorbers and four spectrometric multichannel pulse analyzer are included. Absorbers in a due form are one coaxial cylinder, second – asymmetric, third – sectoral.

Вступ. Атомна енергетика в наш час є незамінним джерелом енергії. Людство навчилося досить ефективно використовувати її в своїх цілях – електростанції, прискорювачі заряджених часток, навіть, ядерні вибухи активно використовують в промисловості, наукових дослідженнях [1,2] та енергетиці [3]. Ale не дивлячись на високі технології та знання людства в області ядерної фізики, всі ми є свідками трагедії в Чорнобилі та на Фокусімі, є імовірність застосування ядерної зброї у військовому конфлікті. Тому на сьогоднішній день проблема визначення місцезнаходження точкових джерел, які також включають імпульсні, є досить актуальною. До

імпульсних джерел відносяться ядерні вибухи, гама-сплески в космосі, імпульсні прискорювачі.

В роботі [4] було проаналізовано недоліки автоматичного визначення напрямку на точкове джерело фотонного випромінювання та розроблений спосіб, що забезпечує визначення цього напрямку (в тому числі від імпульсного джерела) в площині в діапазоні кутів 2π радіан. Цей спосіб перевірений на лічильнику імпульсів, на якому неможливо було визначити напрямок на джерело імпульсного фотонного випромінювання.

Метою роботи є розробка приладу для визначення напрямку на джерело імпульсного фотонного випромінювання.

Викладення основного матеріалу. В основу розробки приладу покладено спосіб розроблений авторами в роботі [4]. Спосіб визначення напрямку на джерело фотонного випромінювання базується на вимірюванні щільності потоку фотонів, які проходять крізь поглиначі різної товщини та геометричної форми. Способом передбачено синхронне вимірювання трьох сигналів від одного точкового джерела гамма-випромінювання, які надходять з детекторів, поміщених у поглиначі. Товщина одного з поглиначів залежить від напрямку на джерело, іншого не залежить, а третій являє собою сектор для напрямку $357^\circ \div 3^\circ$. При діленні кількості імпульсів, що надходять з першого лічильника на кількість імпульсів з другого лічильника скорочуються невідомі нам постійні величини такі як енергія фотонів, відстань від точки вимірювання до джерела випромінювання та його інтенсивність, а отримане значення визначається тільки товщиною поглиначів у напрямку джерела. При цьому товщина h_1 коаксіального поглинача відома і є сталою величиною, а h_2 визначається згідно рівності $\frac{j_1}{j_2} = \frac{h_2}{h_1}$ і визначене нами значення відповідає напрямку на джерело γ -випромінювання; кількість імпульсів j_1, j_2 визначається кількістю γ -квантів зареєстрованих детекторами. Третій детектор з секторним поглиначем призначений для ліквідації невизначеності напрямку в діапазоні кутів $359^\circ \div 1^\circ$ та визначає цей напрямок згідно рівності $\frac{j_3}{j_1} = \frac{h_1}{h_3}$.

Для експериментальної перевірки способу був виготовлений макет, що являє собою три телурид-кадмієві детектори розташовані в геометричних центрах відповідно трьох поглиначів з круговою симетрією виготовлених з штабі метала висотою 40 мм та внутрішнім діаметром 70 мм. В геометричних центрах циліндрів поглиначів розміщувалися детектори розміром $4 \times 4 \times 2$ мм [5]. Вимірювання кількості фотонів та їх амплітуди

проводили за допомогою чотирьох багатоканальних аналізаторів імпульсів, що працують в спектрометричному режимі (рисунок 1).



Рис. 1. Чотирьох канальний аналізатор імпульсів з приладом для вимірювання кутів (радіометр ДКС 01 SELVIS застосовується для контролю потужності експозиційної дози γ -випромінювання).

Спрощена схема одного каналу аналізатора імпульсів зображена на рисунку 2.

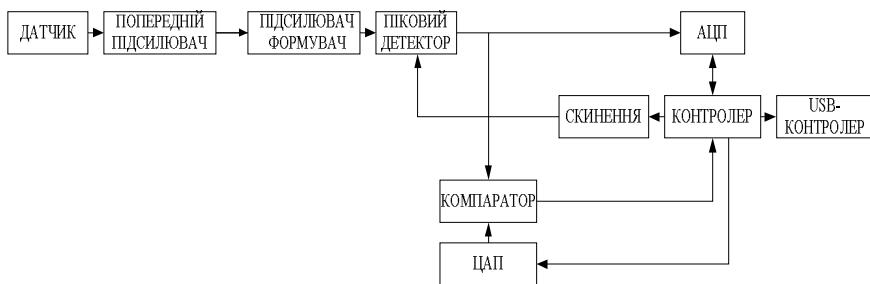


Рис 2. Спрощена схема одного каналу аналізатора імпульсів.

На рисунку 3 представлено перетин циліндра: сірим кольором зображене екран (поглинач) з постійним коефіцієнтом ослаблення в інтервалі 2π радіан в центрі якого був розташований перший детектор (D_1). Поглинач являє собою коаксіальний циліндр товщиною 25 мм, заповнений сталевими кульками діаметром 3мм.

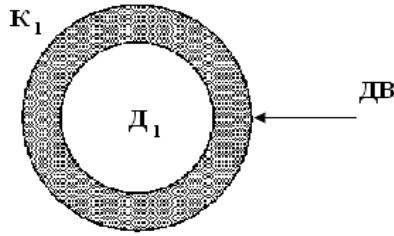


Рис. 3. Детектор (D_1), поміщений в екран з постійним коефіцієнтом ослаблення K_1 .

На рисунку 4а представлено перетин екрану (поглинача), що рівномірно вигнутий, зі змінним коефіцієнтом ослаблення (сірим кольором позначений поглинач) і внутрішнім циліндром діаметром 70 мм, в якому по центру розташований другий детектор (D_2). Коефіцієнт ослаблення змінюється від мінімального значення до максимального в діапазоні кутів від 0 до 2π радіан. Форма заповнювалась сталевими кульками діаметром 3мм в указаному інтервалі кутів і товщина поглинача рівномірно збільшувалась від 7 мм до 50 мм.

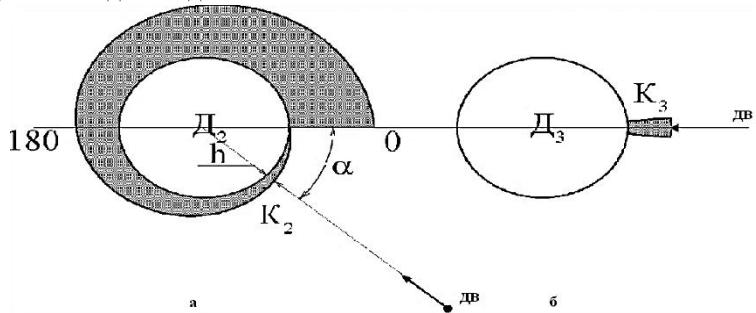


Рис.4. Перетин екранів-поглиначів:

- а - детектор (D_2), поміщений в екран зі змінним коефіцієнтом ослаблення;
- б - детектор (D_3), екраниований секторним поглиначем.

З відношення значень інтенсивності проникаючого випромінювання, які вимірюються першим і другим детекторами, визначається коефіцієнт пропорційності між коефіцієнтами ослаблення екранів з залежним і незалежним від кута коефіцієнтом ослаблення $K_n = \frac{j_2}{j_1} = \frac{K_1}{K_2}$.

Знаючи коефіцієнт пропорційності K_n і коефіцієнт ослаблення первого экрана K_1 , находится коефіцієнт ослаблення другого экрана K_2 , який залежить від напрямку на джерело проникаючого випромінювання,

тобто кут між обраним напрямком і напрямком на джерело проникаючого випромінювання α , де $\alpha = f(K_2)$.

Для ілюстрації на рис. 4. (а) коефіцієнт ослаблення K_2 заданий товщиною поглинача, що залежить від кута: $h = c + b \cdot \frac{\alpha}{360^\circ}$, де c – задана константа (в даному випадку $c=7$ мм); b – задана константа (в даному випадку $b=50$ мм); α – кут у діапазоні від 0 до 360° . Коефіцієнт ослаблення збільшується зі збільшенням товщини.

Вимірювання проводились в діапазоні кутів від 0 до 360° з кроком 15° , а також в точках $-1^\circ, 2^\circ, 3.75^\circ, 7.5^\circ, 11.25^\circ, 348.75^\circ, 352.5^\circ, 356.25^\circ, 358^\circ, 359^\circ$. Було зафіксовано, що в асиметричному поглиначі на переході $359^\circ \div 1^\circ$ коефіцієнт пропорційності змінювався від максимального до мінімального в межах кута величиною 2° , вірогідно за рахунок розсіювання гамма-випромінювання на межі між мінімальною та максимальною товщиною поглинача. Графік залежності коефіцієнта пропорційності від кута представлено на рисунку 5.

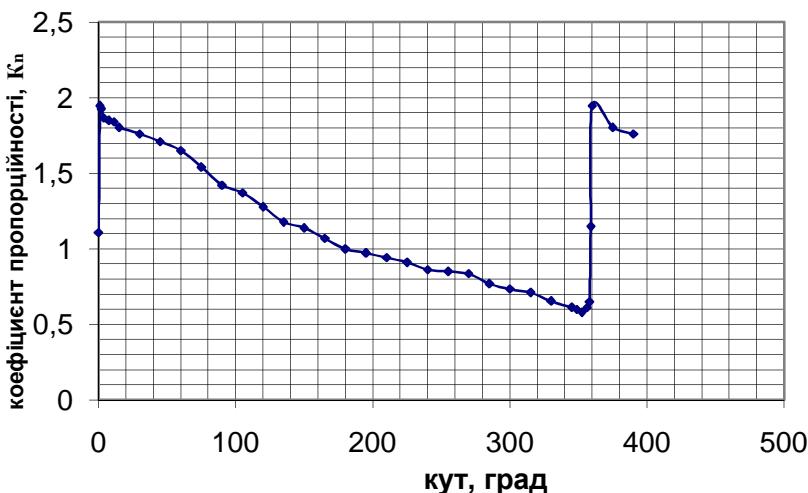


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта пропорційності (K_n) від кута.

Для виключення неоднозначності результатів вимірювань на переході $359^\circ - 1^\circ$, де значення K_n змінюється від мінімального до максимального, використовували третій детектор (D_3) розташований в геометричному центрі кола діаметром 70мм з поглиначем товщиною 25 мм, який являє з себе сектор – поглинач висотою 40мм, що перекриває вказаній діапазон кутів асиметричного поглинача в секторі 6° і являє собою форму наповнену сталевими кульками (рисунок 3 б). Розташування джерела гама-

випромінювання в діапазоні кутів близько 359° - 1° буде визначатися однозначно відношенням сигналів $\frac{j_1}{j_3} = \frac{K_3}{K_1} = 1$ з детекторів D_1 і D_3 , де K_1 , K_3 – задані величини.

Вимірювання проводилися зі статистичною точністю не більш ніж 1%, тобто за один вимір детекторами фіксувалося не менше 10000 фотонів.

Для визначення напрямку на імпульсне випромінювання буде використовуватися показання значень амплітуди на трьох спектрометрах аналізатора імпульсів (рис. 6), де амплітуди імпульсу будуть пропорційні кількості гама-квантів, зареєстрованих детекторами.

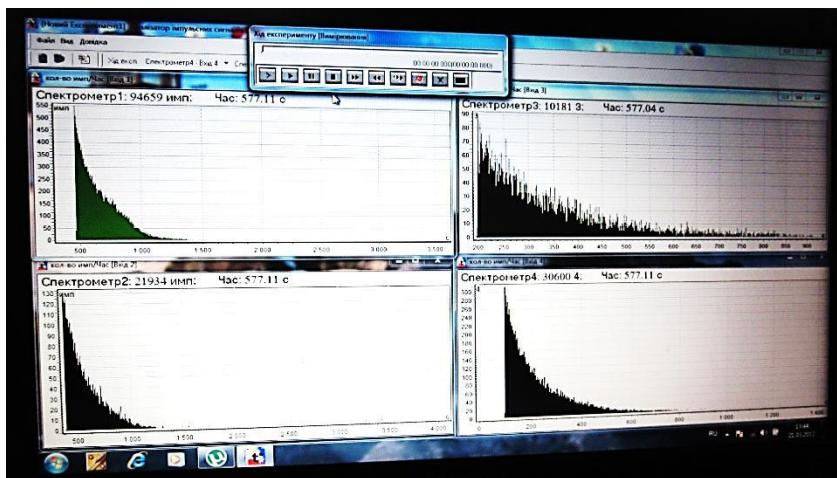


Рис. 6. Показання спектрометрів аналізатора імпульсів.

В роботі [6] проведене дослідження дії імпульсу γ -випромінювання на піроелектричний детектор в результаті якого отримане формування імпульсу напруги (виходного сигналу). Цей імпульс напруги пропорційний густині поглиненої енергії випромінювання та густині потока випромінювання. Заряд, що протікає в ланцюгу чутливого елементу, пропорційний густині поглиненої енергії випромінювання та флюансу випромінювання.

В роботі [7] був проведений експеримент з використанням імпульсу γ -випромінювання в результаті якого були отримані осцилограми сигналів, що виходять з піроелектричного детектора з поляризованим та неполяризованим чутливим елементом. З цих осцилограм можна зробити висновок, що імпульс γ -випромінювання викликає в обох детекторах один сплеск напруги протилежної полярності.

Порівняння характеристик наведених в роботі [6] з даними літератури [8] показує, що піроелектричні детектори мають набагато меншу чутливість

ніж напівпровідникові. Тому детектори із телуриду кадмію можна ефективно використати для роботи з імпульсними джерелами проникаючого випромінювання меншої інтенсивності. При дії імпульсного γ -випромінювання на детектори приладу аналізатора імпульсів на екранах спектрометрів буде по одному імпульсу з характерною для кожного детектора амплітудою, яка буде визначатись товщиною поглинача на шляху γ -випромінювання. Відношення цих амплітуд імпульсу дає коефіцієнт пропорційності, який буде залежати від кута так же, як зображене на рисунку 5.

Висновки. Розроблений спосіб та прилад забезпечує визначення напрямку на джерело фотонного випромінювання, зокрема імпульсного, в площині в діапазоні кутів 2π радіан. Діючий макет забезпечує вимірювання кутів з похибкою не більше 1%. При розташуванні джерела γ -випромінювання в діапазоні кутів $359^\circ \div 1^\circ$ похибка вимірювання також є не більшою ніж 1%. Робота приладу в спектрометричному режимі забезпечує можливість визначення напрямку на імпульсне джерело за відношенням амплітуд обратнопорційних товщині поглинача. Схема діючого макету може бути прийнята за основу під час конструктування відповідного приладу для ведення радіаційної розвідки місцевості, захисту екіпажів танків від металльної дії ядерного вибуху та проникаючого випромінювання, а також при розміщенні стаціонарних постів контролю імпульсного випромінювання на території держави. В цьому приладі відсутні механічні переміщення складових частин, що збільшує термін служби та дає можливість визначати імпульсні джерела фотонного випромінювання.

В ході роботи визначено напрямок подальшого дослідження для з'ясування можливості використати запропонований спосіб та прилад для визначення напрямку на джерело фотонного випромінювання в просторі в діапазоні кутів 4π стерадіан.

Список літератури: 1. Бонюшин Е.К., Завадин Н.И., Новиков С.А., Учаев А.Я. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. Саров: РФЯЦ, 1998. – 274 с. 2. Высокие плотности энергии: Сборник. Саров: РФЯЦ, 1997. – 572 с. 3. Иванов Г.А., Волошин Н.П., Ганеев А.С. и др. Взрывная дейтериевая энергетика. Снежинск: РФЯЦ, 1997. – 138с. 4. Григор'ев О.М., Сакун О.В., Білик З.В. Визначення напрямку на точкове джерело фотонного випромінювання в площині. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Випуск 2 (28), 2011. – 173 с. 5. Григорьев А.Н., Полянский И.Е., Кареев А.Г., Жадан Т.А. Полупроводниковые детекторы на базе CdTe и CdZnTe для спектрометрии электромагнитных излучений при комнатной температуре / Вестник ХГУ. – Харьков, 2002. – № 544. – С. 153 – 155. 6. В.А. Борисенок, Е.З. Новицкий, В.Г. Симаков. Пироэлектрический детектор импульсного гамма-излучения. Приборы и техника эксперимента, 2009, №4, 81-94 с. 7. Фесенко Е.Г., Данцигер А.Я., Разумовская О.Н. Новые пьезокерамические материалы. Ростов на Дону : Изд-во РГУ, 1983. – 160 с. 8. Альбиков З.А., Веритенников А.И., Козлов О.В. Детекторы импульсного ионизирующего излучения. М.: Атомиздат, 1978. – 173 с.

Надійшла до редакції 15.04.12

Е.Э. ПЕТРОВА, магистрант, ДонНТУ, Донецк;
В.П. ТАРАСЮК, канд. техн. наук, доц., ДонНТУ, Донецк

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ИНДЕКСА ИЛА В АЭРОТЕНКЕ

Аргументирована необходимость оперативного отслеживания состояния активного ила в аэротенках как основной среды, влияющей на качество очистки сточных вод. Показано, что использование оптического метода позволяет разработать электронную систему контроля седиментационных свойств ила, который дает возможность эффективного получения данных об изменении илового индекса. Проведено моделирование оптической части системы в средах MathCad и LabView, что позволило построить зависимость концентрации активного ила от времени осаждения и расстояния от дна сосуда и определить диапазон изменения тока приемника оптического излучения.

Аргументована необхідність оперативного відстеження стану активного мулу в аеротенках як основного середовища, що впливає на якість очистки стічних вод. Показано, що використання оптичного методу дозволяє розробити електронну систему контролю седиментаційних властивостей мулу, який дає можливість ефективного отримання даних про зміну мулового індексу. Проведено моделювання оптичної частини системи в середовищах MathCad і LabView, що дозволило побудувати залежність концентрації активного мулу від часу осадження і відстані від дна посудини і визначити діапазон зміни струму приймача оптичного випромінювання.

The necessity of operative tracking of activated sludge in the aeration tanks as the mainmedium, affecting the quality of wastewater treatment. It is shown that using an optical method allows the development of an electronic control system of the sedimentation properties of the sludge, which makes it possible to efficiently obtain data on the changeof sludge index. The simulation of the optical system in MathCad environment and LabView, which made it possible to plot the concentration of activated sludge from thesettling time and distance from the bottom of the vessel and determine the range ofvariation of the current receiver of optical radiation.

Общий анализ проблемы и постановка задачи исследований. Сложная экологическая ситуация, которая создается в результате сбросов загрязненных сточных вод в окружающую среду, обуславливает поиск технического решения проблемы. На сегодняшний день один из актуальных вариантов — очистка сточных вод. Оптимальным из существующих методов является аэробная биологическая очистка, в основе которой лежит работа аэротенка и биологически активной массы — активного ила. Активный ил — сообщество бактерий и простейших, обитающих колониями в виде взвешенных в воде хлопьев. В присутствии кислорода микроорганизмы поглощают и окисляют органические вещества. После переработки порции этих веществ активный ил надо отделить от очищенной воды и вернуть в загрязненные стоки, где процесс поглощения (очистки) продолжится. Аэротенк — емкость (обычно прямоугольной формы) с активным илом и устройством распыления воздуха, который перемешивает поступающую сточную воду и насыщает кислородом [1, 2].

На Украине более 70% станций очистки сточных вод на сегодняшний день работают неэффективно, вследствие морального и физического износа оборудования, недостаточного развития автоматизации процесса и квалификации персонала, недостатка данных для принятия решений. Причина этого заложена в том, что ряд значений параметров трудно определяемы из-за отсутствия соответствующих измерительных средств.

Несовершенство технологического режима, а также недостаточно квалифицированная эксплуатация сооружений биологической очистки приводят к систематическим нарушениям условий работы аэротенков. Поэтому для улучшения качества очистки сточных вод актуальным является использование автоматизированных систем контроля и прогнозирования условий работы аэротенка [3].

Обзор существующих исследований. Автоматизации управляемых процессов биохимической очистки сточных вод, развивается в двух направлениях: контроль качества поступающей воды (характер загрязнения, присутствие ПАВ, значение pH , присутствие токсинов) и контроль технологического процесса очистки (температура, наличие питательных веществ, содержание растворенного кислорода в иловой смеси, иловый индекс и др.).

В связи с необходимостью комплексного контроля всех процессов, влияющих на физиологическое состояние организма активного ила, а следовательно, — на результат очистки, в процессе эксплуатации очистных сооружений регистрируется множество параметров, характеризующих качество очищаемых сточных вод. Комплекс параметров, характеризующих состояние активного ила, полученных при диагностике, может быть использован в системах прогнозирования для выявления причин, неблагоприятно влияющие на биомассу активного ила. Так как популяции флокулообразующих бактерий составляют в иле (90-95)% , их функциональное состояние, активность и адаптивность к экологическим условиям аэротенков определяют устойчивость и эффективность биохимического окисления загрязняющих веществ, присутствующих в сточных водах. Таким образом проблема технологического контроля за процессом является актуальной, особенно в условиях повышения интенсивности использования биологического метода очистки сточных вод, а оперативное отслеживание состояния активного ила позволит прогнозировать состояние биологической среды аэротенков, и как следствие, степени и качества очистки загрязненных вод. Поэтому важным является разработка электронной системы контроля параметров активного ила в аэротенке.

Целью работы является моделирование оптической части электронной системы контроля индекса ила, реализующей метод фотопреобразования рассеянного от частиц света.

Решение задачи. По определению, индекс ила — величина, обратная концентрации ила в иловой фазе после получасового отстаивания (1):

$$I = \frac{V_{0.5}}{d}, \text{ см}^3/\text{г} \quad (1)$$

где $V_{0.5}$ — доза ила по объему после получасового отстаивания, $\text{см}^3/\text{дм}^3$; d — доза ила по массе, $\text{г}/\text{дм}^3$ [1]. Индекс ила характеризует способность ила к оседанию и уплотнению. Основная задача процесса биологической очистки — поддержание стабильности илового индекса.

Присутствие в аналитическом выражении (1) дозы ила по объему указывает на преимущество использования измерительного устройства в виде сосуда изначально известного объема, в котором необходимый расчет дозы ила V проводился бы бесконтактным способом во избежание взбалтывания исследуемой пробы [3]. Поставленному требованию удовлетворяет оптический метод анализа мутных сред, основанный на измерении интенсивности поглощенного ими света, — турбодиметрия, который лишь в незначительной степени уступает аналитическим методам. Преимущества метода заключаются в его чрезвычайной чувствительности и скорости.

Работа посвящена моделированию оптической подсистемы электронной системы контроля индекса ила, реализующей метод фотопреобразования рассеянного от частиц ила света.

Предлагаемая электронная система контроля индекса ила состоит из измерительной части системы преобразования и управления на основе микропроцессора. Измерительная часть представлена седиментационным сосудом, по всей длине которого расположены фотопреобразователи на основе фотодиодов, а в верхней части сосуда светоизлучатель. Датчик уровня жидкости срабатывает при заполнении необходимого объема пробы, сигнал от которого поступает в микропроцессорную систему, где формируется сигнал остановки электромеханизма забора пробы. После заполнения емкости исследуемая жидкость отстаивается в течение 30 минут, причем каждые 3 минуты включается освещение и производится измерение освещенности по всей длине сосуда с помощью фотоприемников, судя по которой можно сделать вывод о плотности осадка по всей длине измерительной емкости. Структурная схема системы контроля индекса ила представлена на рис. 1.

На рисунке 1 обозначены: УВХ — устройство выборки и хранения, МКПС — микропроцессорная система.

Блок освещения представляют собой цепь смещения светоизлучающего диода для освещения пробы. Блок фотоприемников состоит из линейки фотодиодов, расположенных вдоль сосуда с пробой. Каждый из фотодиодов включен в одинаковый преобразователь рассеянного света в выходное напряжение. Для коммутации выходов фотопреобразователей освещенности ко входу устройства выборки-хранения

(УВХ), а далее к АЦП, использовано мультиплексорное дерево из аналоговых мультиплексоров. Управление мультиплексорами осуществляется при помощи кода выборки, поступающего от микроконтроллера. Сигналы, коммутированные мультиплексорным деревом, поочередно преобразуются с помощью АЦП и записываются в память микроконтроллера [3].

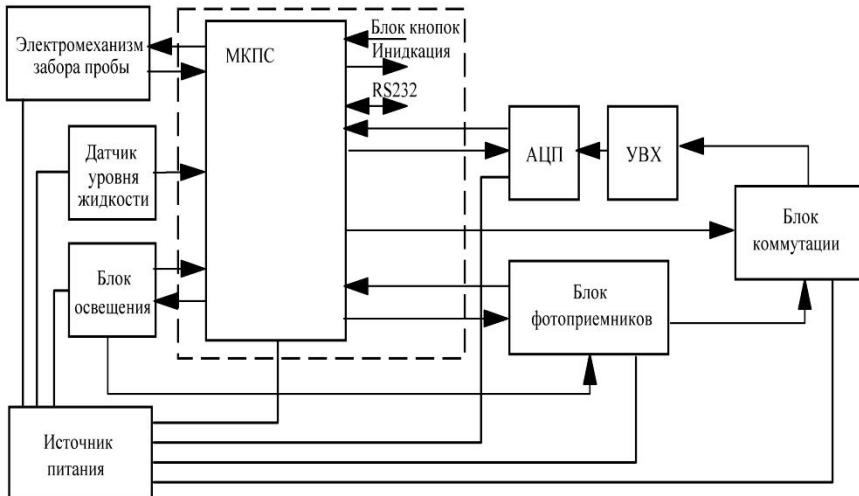


Рис. 1. Структурная схема электронной системы контроля индекса ила

Оптическая часть системы представлена на рис. 2. Приемник Е (фотодиод) находится за пробой на оптической оси прибора, измеряющего затухания свечения, вызванное рассеянием света.

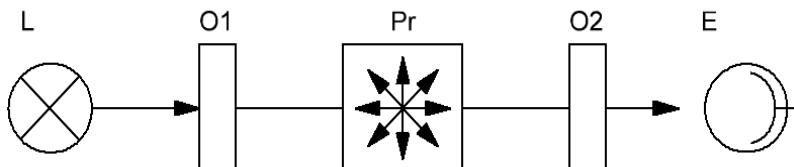


Рис. 2. Принцип измерительной части прибора с использованием рассеянного света.

L — источник света (светоизлучающий диод); O1, O2 — первый и второй объективы; Pr — проба; E — приемник (фотодиод) [4]

Поток излучения на входе в объектив устанавливается с учетом коэффициента ввода потока излучения (2)

$$\Phi_{\text{вх об}1} = \Phi_{\text{вых СИД}} \cdot k_{\text{вв об}1}, \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{вых об1}}$ — поток излучения на входе первого объектива; $\Phi_{\text{вых СИД}}$ — поток излучения на выходе из светоизлучающего диода; $k_{\text{вв об1}}$ — коэффициент ввода потока излучения в первый объектив.

Поток излучения на выходе из первого объектива (на входе в пробу) с учетом коэффициента пропускания объектива и коэффициента ввода сигнала в пробу (3)

$$\Phi_{\text{вых об1}} = \Phi_{\text{вых np}} \cdot T_O \cdot k_{\text{вв np}}, \quad (3)$$

где $\Phi_{\text{вых об1}} = \Phi_{\text{вых np}}$ — поток излучения на выходе из объектива (входе в пробу); T_O — коэффициент пропускания объектива; $k_{\text{вв np}}$ — коэффициент ввода потока излучения в пробу [5].

На концентрацию, размер частиц в пробе влияет возраст ила, характер загрязнения, степень аэрации, местоположение забора пробы относительно начала или конца коридора аэротенка.

Интенсивность пучка света, распространяющегося в поглощающей среде активного ила, описывается уравнением Бугера-Ламберта-Бера:

$$I_{\text{np}}(d) = I_{\text{вых np}} \cdot e^{-k_{\lambda} d}, \quad (4)$$

где $I_{\text{вых np}}$ — интенсивность входного излучения; k_{λ} — коэффициент поглощения, который связан с показателем поглощения k зависимостью $k_{\lambda} = \frac{4\pi k}{\lambda}$, где λ — длина волны; d — толщина слоя; C — концентрация ила.

Из уравнения Бугера-Ламберта-Бера (5) оптическая плотность ила:

$$D(k_{\lambda}, d, C) = \ln \frac{I_{\text{вых np}}}{I_{\text{np}}} = k_{\lambda} \cdot d \cdot C, \quad (5)$$

где k_{λ} представляет собой сумму коэффициентов поглощения отдельных спектральных линий составляющих ила.

Плотность ила связана с коэффициентом пропускания пробы уравнением (6):

$$T(k_{\lambda}, d, C) = e^{-D(k_{\lambda}, d, C)}. \quad (6)$$

Активный ил представляет собой дисперсную систему с множеством дисперсных фаз, в которой доли испытывают воздействие молекул среды, то есть более тяжелые фракции оседают быстрее [6]. При этом кривая оседания плавная без изломов, что свидетельствует о динамичности и непрерывности системы. Поскольку скорость оседания крупных хлопьев ила быстрее, они образуют осадок на дне сосуда. Кривая оседание активного ила как зависимость объема, который занимает осадок от времени осаждения является седиментационной характеристикой. Экспериментально полученная в [1] седиментационная характеристика активного ила показана на рис. 3.

В таком случае рассеянный свет в низших слоях значительно меньше, чем в верхних. Более того, если для нижних слоев интенсивность рассеянного света уменьшается в верхних наоборот увеличивается благодаря оседанию более легких фракций супензии и, как следствие, уменьшение мутности.

Освещенность по всей длине сосуда можно описать совокупностью уравнений освещенности на каждом измеряемом уровне от дна сосуда $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$. Объем осадка (7) определяется по уровню освещенности фотодиодов $E_1 \geq E_2 \geq \dots \geq E_m > E_{m+1} \geq E_{m+2} \geq \dots \geq E_n$, где E_1 — фотодиод у дна сосуда, E_n — фотодиод вверху сосуда, $E_m > E_{m+1}$ — граница осадка и осветленной воды;

$$V_{осадок} = m \cdot l \cdot \pi \cdot d_{сосуд}^2, \quad (7)$$

где l — расстояние между фотодиодами, m — число фотодиодов, зарегистрировавших наличие осадка, $d_{сосуд}$ — диаметр сосуда.

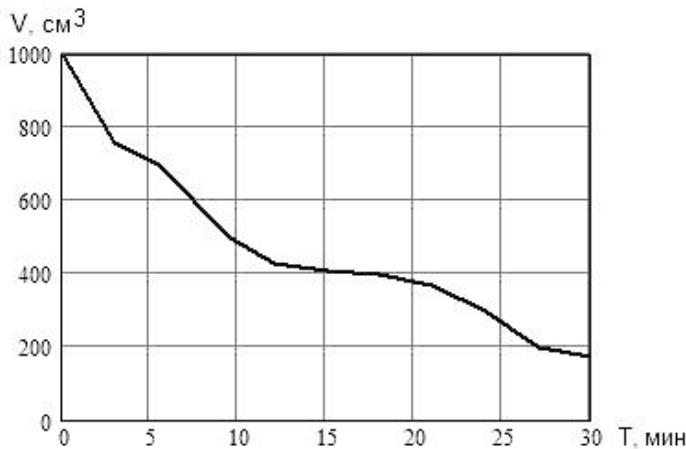


Рис. 3. Удовлетворительная седиментационная характеристика активного ила

Концентрация ила, влияющая на интенсивность рассеивания света, в конкретном выбранном объеме ΔV зависит от времени осаждения и высоты от дна сосуда. В идеальном случае принимаем характер осаждения от времени и высоты $C(h, t)$ экспоненциальным. На рис. 4 изображено семейство характеристик зависимости концентрации активного ила в седиментационном сосуде от времени и высоты от дна, полученное путем моделирования соответствующих характеристик в системе LabView. По концентрации на момент начала осаждения ($t=0$) принято $C=2$ мг/л (по всему объему пробы), $h_{16} > h_{15} > \dots > h_0$. Для $t>0$ концентрация определяется по объему осадка и осветленной воды, поэтому в нижних слоях пробы концентрацию возрастает и превышает 2 мг/л, а в верхних наоборот уменьшается.

Аналитически зависимость концентрации от времени имеет вид (8) для верхних слоев и (9) для нижних:

$$C(t, a) = \frac{C_M}{e^{t \cdot a}}, \quad (8)$$

$$C(t, a) = C_M - \frac{C_M}{e^{t \cdot a}}, \quad (9)$$

где C_M — концентрация ила по всему объему седиментационного сосуда; a — коэффициент, учитывающий коэффициент поглощения и высоту от дна сосуда, $a = f(k, h)$ — функция, вид которой зависит от параметров ила, а также высоты от дна сосуда в конкретный момент времени оседания иловой суспензии.

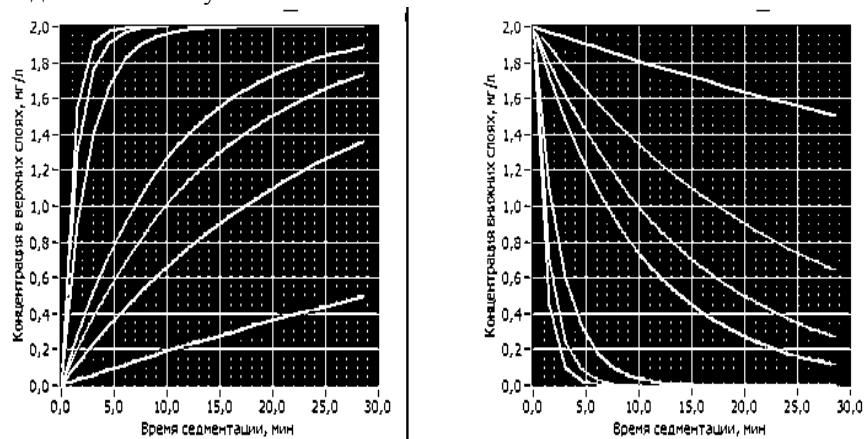


Рис. 4. Зависимости концентрации активного ила от времени и высоты от дна сосуда, полученные в LabView

Согласно оптическому методу анализа мутных сред поток излучения на входе во второй объектив определяется как поток, вышедший из пробы, с учетом коэффициента пропускания второго объектива, равного коэффициенту пропускания первого объектива, коэффициента пропускания пробы $T(k_\lambda, d, C)$ и коэффициента ввода излучения во второй объектив:

$$\Phi_{ex\ o62}(C) = \Phi_{ex\ np} \cdot T(k_\lambda, d, C) \cdot T_o \cdot k_{vv\ o2}, \quad (10)$$

где $\Phi_{ex\ o62}$ — поток излучения на входе во второй объектив; $\Phi_{ex\ np}$ — поток излучения на выходе из пробы; $k_{vv\ o2}$ — коэффициент ввода второго объектива.

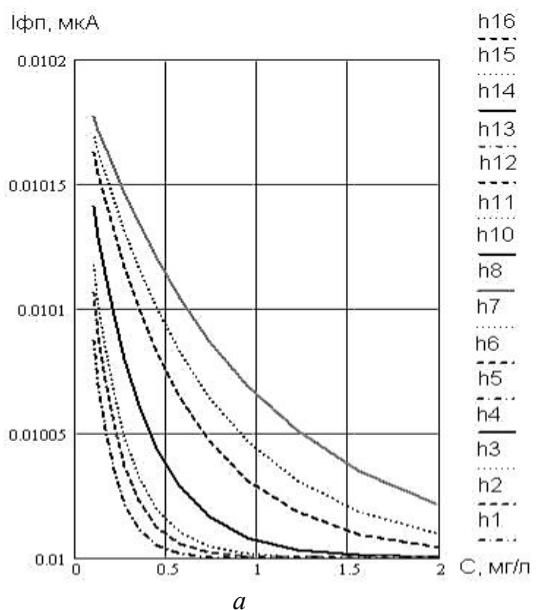
Поток излучения, поступающий на фотоприемник, устанавливается с учетом коэффициента ввода оптического сигнала $k_{vv\ phn}$ в системе линзы-фотодиод:

$$\Phi_{ex\ phn}(C) = \Phi_{ex\ o62}(C) \cdot k_{vv\ phn}. \quad (11)$$

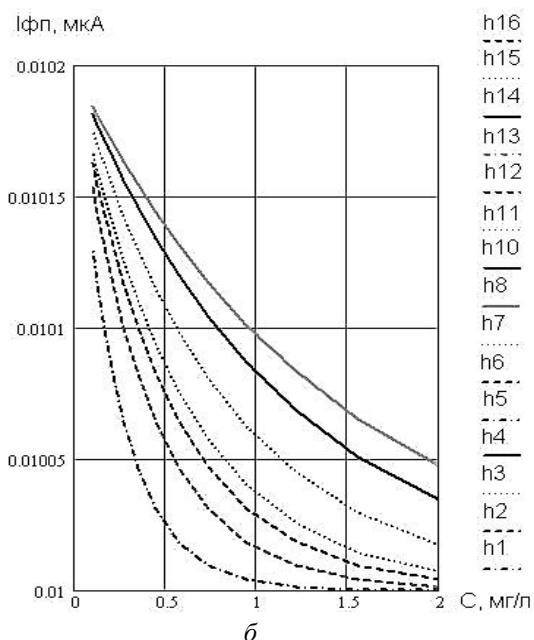
Зависимость фототока фотодиода, использованного в системе, от светового потока определяется как произведение токовой чувствительности фотодиода и светового потока на входе фотоприемника [5]:

$$I_{phn} = \Phi_{ex\ phn}(C) \cdot S_I. \quad (12)$$

Поскольку концентрация ила меняется по экспоненциальному закону от времени на текущей высоте сосуда, в MathCad построено семейство характеристик фототока фотодиода от концентрации ила для t от 0 до 15 мин. с шагом 2,5 мин. (см. рис. 5) в верхних и средних слоях седиментационного сосуда. При этом рисунку а) соответствуют характеристики осадка на максимальной высоте от дна сосуда (для верхнего фотодиода из блока фотодиодов), рисунку б) — характеристики, полученные для середины сосуды. На рис. 5 видно, что фототок изменяется незначительно, а скорость его изменения также уменьшается с увеличением времени отстаивания и объемом, который занимает осадок.



a



b

Рис. 5. Семейство характеристик фототока фотодиода от концентрации ила для $t=0, 2.5..15 \text{ c}$

а) на максимальной высоте от дна сосуда; б) на середине сосуда

Выводы.

1. Аргументирована необходимость оперативного отслеживания состояния активного ила в аэротенках как основной среды, влияющей на качество очистки сточных вод.
2. Показано, что использование оптического метода позволяет разработать электронную систему контроля седиментационных свойств ила, который дает возможность эффективного получения данных об изменении илового индекса.
3. Определена пороговая чувствительность и диапазон изменения концентрации ила, которые составляют соответственно 0.01 мг/л от 0 до 2 мг/л.
4. Проведено моделирование оптической части системы в средах MathCad и LabView, что позволило построить зависимость концентрации активного ила от времени осаждения и расстояния от dna сосуда.
5. Определено, что при изменении концентрации ила по длине сосуда, а значит и индекса ила, в диапазоне от 0 до 2 мг/л ток фотодиода изменяется в незначительных пределах (1.0-1.8 нА).

Список литературы: 1. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. — М.: АКВАРОС, 2003 г. — 512с. 2. Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, В.И. Калицун. — М.: Стройиздат 1996, с. 588 — 594. 3. Петрова Е.Э. Обоснование структурной схемы электронной системы контроля илового индекса в аэротенке / Петрова Е.Э., Тарасюк В.П. // Сборник Інтернет - конференції «Інформаційні і керуючі системи в промисловості, економіці та екології.», 2011, 20 листопада — 31 грудня 2011г. — Технологічний інститут Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), 2011. — Електронні данні. — Режим доступа: URL: <http://193.108.240.69/moodle/file.php/l/conf3/Stati/SISTEMY KONTROLYA ILOVOGO INDEKSA.doc> — Дата доступа: декабрь 2011. 4. Аксененко М.Д. Микроэлектронные фотоприемные устройства / М.Д.Аксененко, М.Л.Бараночников, О.В.Смолин. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 208 с., ил. 5. Хламов М.Г. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни “Електронні системи”. — Донецьк: ДонНТУ, 2006. 6. Ельцов С.В. Физическая и коллоидная химия / С.В.Ельцов, Н.А. Водолазская. — Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2005., — 216с. 7. Ишанин Г.Г. Источники и приемники излучения. Пособие по решению задач / Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К., Мусяков В.Л. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. — 85 с. 8. Измерения в промышленности. Справочник под редакцией П. Профоса — М.: “Металлургия”, 1990. — 384.

Надійшла до редакції 15.04.12

С.Г. ЛЬВОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков;
Л.В. ГЛЕБОВА, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

МАКЕТ ПРИБОРА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЕМКОСТНЫМ СПОСОБОМ

В работе разработан макет устройства для ультразвукового контроля емкостным способом. Описаны требования к аппаратуре, которая используется. А также предложены устройства, которые полностью удовлетворяют этим требованиям.

В роботі розроблено макет пристрою для ультразвукового контролю емнісним способом. Описані вимоги до апаратури, що використовується. А також були запропоновані пристрой, які повністю задовльняють цим вимогам.

In the work the device for ultrasonic testing of capacitive method is developed. The requirements for equipment was described. Also offered are products that fully meet these requirements.

Введение. Одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля является метод возбуждения и приема акустических волн с использованием пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП). Однако, на ряду с очевидными преимуществами, он обладает и рядом недостатков: контактность, сложность контроля загрязненных поверхностей. Альтернативным методом является бесконтактный емкостной метод неразрушающего контроля. Согласно работе [1] чувствительность возбуждающего емкостного преобразователя (ЕП) в 10^4 раз меньше чем у ПЭП. Однако, как показали теоретические [2] и экспериментальные [3] исследования этот метод обладает достаточной чувствительностью для проведения контроля. При реализации возбуждения и приема ультразвуковых колебаний емкостным способом, к возбуждающей и приемной аппаратуре необходимо предъявлять достаточно жесткие и одновременно противоречивые требования.

Основная часть. Противоречивость требований заключается в том, что с одной стороны для обеспечения возбуждения акустической волны в объекте контроля с помощью емкостного преобразователя необходимо создать высокочастотный генератор синусоидальных колебаний с амплитудой выходного сигнала более 500 В. С другой стороны, приемное устройство (конденсаторная пластина) и предварительный усилитель, обеспечивающий процесс преобразования акустического сигнала в электрические импульсы, необходимо синхронизировать с возбуждающим генератором в широком диапазоне периода следования электрических импульсов генератора, что непосредственно связано с толщиной и материалом исследуемого образца. При этом, сигнал генератора возбуждающего электрического поля, поступающий на приемное устройство

в 10^3 больше, чем непосредственно сигнал с приемного преобразователя, полученный вследствие приема акустических колебаний. Поэтому, необходимо обеспечивать запирание входа усилителя на время подачи возбуждающих импульсов. При приеме на ЕП необходимо подавать постоянное напряжение не менее 100 В. Данное условие требует создания специального высокостабильного по амплитуде генератора разнополярных поляризующих импульсов с варьируемой скважностью.

Таким образом, при проектировании реальных устройств ультразвукового неразрушающего контроля с использованием емкостного способа возбуждения и приема ультразвуковых колебаний необходимо выполнить следующие задачи: создать генератор возбуждающих колебаний с пакетом синусоидальных электрических колебаний несущей частоты; создать источник поляризующего напряжения; разработать входное устройство, которое будет запирать приемный тракт на время подачи зондирующего импульса и предварительный усилитель для согласования уровней выходного сигнала. Для управления работой установки, создания стробирующих импульсов необходимо разработать устройство синхронизации работы системы возбуждения и приема ультразвуковых колебаний.

На рис. 1 приведена структурная схема макета для ультразвукового контроля емкостным способом. На зондирующий емкостной преобразователь (ЗЕП) состоящий из обкладки конденсатора 1, диэлектрической прослойки 2 и объекта контроля (ОК), представляющего собой вторую обкладку конденсатора, подается поляризующее напряжение порядка 1000 В с генератора поляризующих импульсов ГПИ. Также на пластину конденсатора с генератора возбуждающих импульсов ГВИ подается пакет синусоидальных импульсов в мегагерцовом диапазоне частот и амплитудой около 1000 В. На рис.2 приведены временные диаграммы работы макета для ультразвукового контроля емкостным способом. На диаграмме изображены поляризующие импульсы (а) и пакетные импульсы (б). Здесь T – период зондирования ОК, τ – время, на протяжении которого принимаются акустические импульсы из ОК. Работой ГВИ и ГПИ управляет устройство синхронизации УС. При подаче зондирующего импульса на приемной пластине приемного емкостного преобразователя (ПЕП) за счет прямой передачи электрического сигнала наводится сигнал, который может привести к повреждению приемного канала установки. Для исключения этого во входном устройстве ВУ происходит запирание входной цепи на время прохождения зондирующего импульса под влиянием управления УС. В системе ЗЕП – ОК – ПЕП происходит преобразование электрического сигнала в акустическую волну, прохождение ее по ОК и вторичное преобразование акустической волны в электрический сигнал. Сигнал после такого преобразования приходит позже сигнала наведенного зондирующими импульсами, что позволяет разделить их по времени. Для этого УС формирует стробирующий импульс с длительностью $\tau_{\text{СТР}}$ (рис. 2 в), который

отпирает во входном устройстве приемный канал. Сигнал с ЕП поступает на предварительный усилитель У. Выходной сигнал после предварительного усиления поступает на осциллограф О. При использовании двухканального осциллографа на второй канал можно подавать сигнал с генератора возбуждающих импульсов. На рис. 2 г изображен принятый сигнал, прошедший через ОК, где τ_{Π} – время прохождения акустической волны через ОК, U_{Π} – амплитуда принятого сигнала.

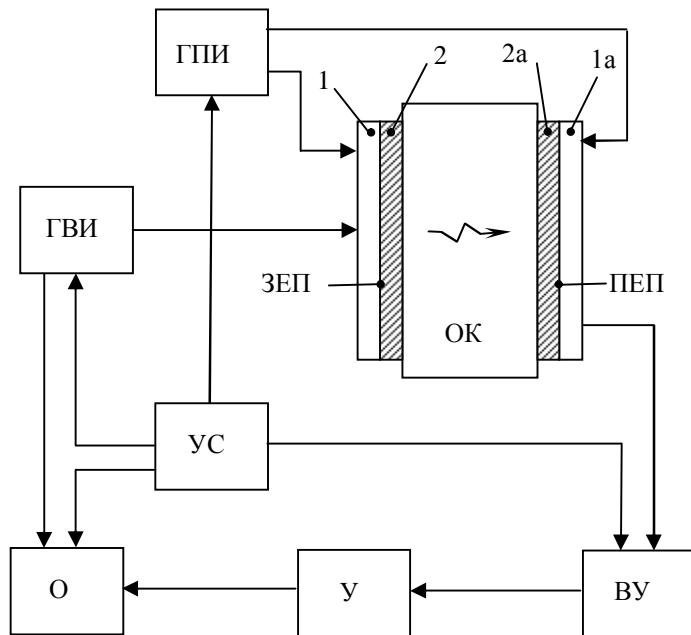


Рис. 1. Структурная схема макета для ультразвукового контроля емкостным способом теневым методом

При проведении экспериментальных исследований осциллограф можно заменить серийным дефектоскопом в качестве приемного устройства, выходного индикатора и устройства синхронизации. Для реализации емкостного способа контроля с применением дефектоскопа требуются внешние генератор поляризующих импульсов, генератор возбуждающих высокочастотных импульсов и предварительный усилитель для согласования по уровню выходного сигнала ЕП и входного канала дефектоскопа.

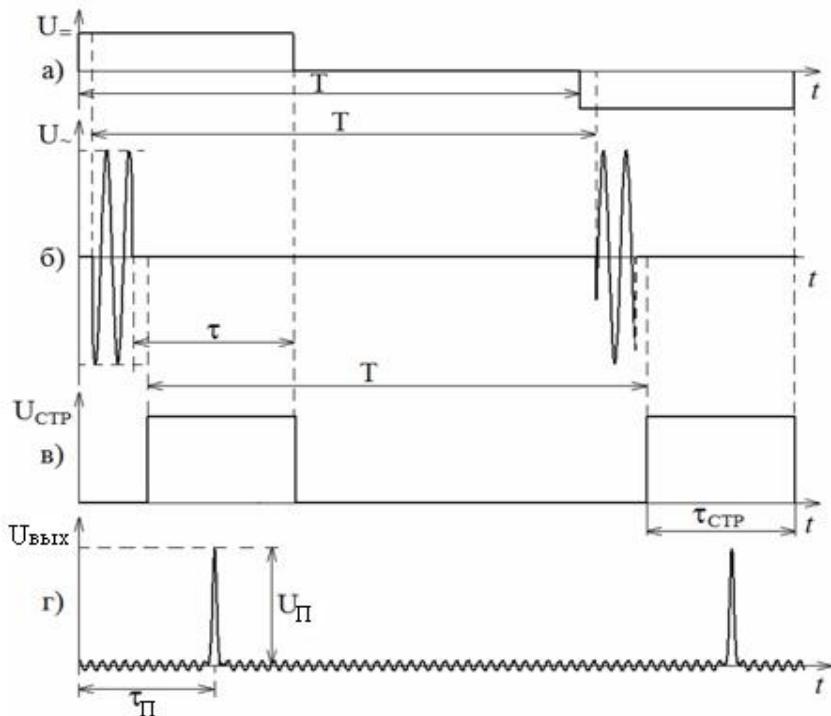


Рис. 2. Временные диаграммы работы макета для ультразвукового контроля емкостным способом

Выводы: разработанная установка удовлетворяет требованиям, предъявляемым к возбуждающей и приемной аппаратуре, и позволяет реализовать емкостной способ неразрушающего контроля теневым методом. Диапазоны амплитуд генераторов, частотные и временные характеристики определяются параметрами ОК и для конкретных схем контроля могут различаться, но можно построить и универсальную установку.

Список литературы: 1. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. 240 с. 2. Григорьев А.Л., Тюна И.В., Глебова Л.В. Теория работы емкостного датчика возбуждения акустических колебаний в упругих средах. – Вестник НТУ"ХПИ", 2010, №68, – с.38-51 3. Сучков Г.М., Глебова Л.В. Дослідження факторів, які впливають на збудження акустичних імпульсів емнісним способом. – Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008, №48, – с. 116-123.

Надійшла до редакції 15.04.12

ЗМІСТ

ЖУРИЛО А.Г. Історія дослідження властивостей металу на Україні.....	3
СТЕНЦЕЛЬ Й.І., КУЗНЕЦОВА О.В., ПОРКУЯН О.В. Математичні моделі плівкового випарного апарату за концентрацією упареного розчину.....	13
СТЕНЦЕЛЬ Й.І., ПРОКАЗА О.І., ПОРКУЯН О.В., ЛІТВІНОВ К.А. Математичні моделі апарату нейтралізації за витратою аміачної селітри..	24
СТЕНЦЕЛЬ Й.І., РЯБІЧЕНКО А.В., ТОМСОН А.В. Математичні моделі ультразвукового засобу контролю рівня рідинних середовищ з компенсуючим сприймаючим сигналом.....	34
СТЕНЦЕЛЬ Й.І., ЄВСЮКОВ В.В., ТОМСОН А.В., ЛІТВІНОВ К.А. Дослідження похибок вимірювального контролю методом інтегрального функціоналу.....	43
АРХИПОВ О.Г., БОЯРЧУК О.Г., КОВАЛЬОВ Д.О., ТАТАРЧЕНКО Г.О. Безконтактний імпульсний метод контролю корозійно-механічних пошкоджень.....	56
РИЖИКОВ В.Д., ОПОЛОНИН О.Д., ВОЛКОВ В.Г., ЛИСЕЦЬКА О.К., ГАЛКИН С.М., ВОРОНКІН Є.Ф. Вдосконалення приймально-детектуючого тракту для цифрових радіографічних систем з покращеним просторовим розділенням.....	60
СИРЕНКО Н.Н. Требования к конструкциям пермеаметров.....	67
БОРИСЕНКО А.Н., РЕВУЦКИЙ В.И. Синтез обобщенной структуры и математических моделей преобразователей режимных параметров дизель - энергетической установки с наддувом и дополнительным воздухоснабжением.....	74
СУЧКОВ Г.М., ПЕТРИЩЕВ О.Н., ХАЩИНА С.В. Высокопроизводительная эндо-ресурсосберегающая дефектоскопия металлоизделий с развитой площадью поверхности.....	81
ВАШИШАК І.Р. Визначення технічного стану підземних теплових мереж шляхом аналізу їх акустичних характеристик.....	86
АВРАМЕНКО С.В., ТАРАСЮК В.П. Математическая модель системы мониторинга уровня жидкости в барабане котла.....	100
ГРИГОР'ЄВ О.М., БЛИК З.В., САКУН О.В., МАРУЩЕНКО В.В. Визначення напрямку на точкові джерела фотонного випромінювання в площині, включаючи імпульсні.....	111
ПЕТРОВА Е.Э., ТАРАСЮК В.П. Моделирование оптической части электронной системы контроля индекса ила в аэротенке.....	118
ЛЬВОВ С.Г., ГЛЕБОВА Л.В. Макет прибора для ультразвукового контроля емкостным способом.....	128

НАУКОВЕ ВИДАННЯ
ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Серія
«Електроенергетика та перетворювальна техніка»
Випуск №41

Науковий редактор
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.

Технічний редактор
к.т.н. К. Л. Ноздрачова

Відповідальний за випуск
Прісухіна Т.М.

Адреса редколегії:
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21. НТУ «ХПІ».
каф. ПМНК, тел. (057) 7076380, e-mail: suchkov_gm@mail.ru.

Обл. вид. №

Підп. до друку 2012 р. Формат 60x84 1/16 Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 8,3.
Наклад 300 прим. 1-й з-д 1-100. Зам. № 225. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21