

ZESZYTY NAUKOWE  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

---

FOLIA SCIENTIARUM  
UNIVERSITATIS TECHNICAЕ RESOVIENSIS

---

NR 267

# **BUDOWNICTWO I INŻYNIERIA ŚRODOWISKA**

Z. 55

Wydano za zgodą Rektora

Redaktor naczelny  
Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej

Prof. dr hab. inż.

Komitet Redakcyjny

Ludomir LAUDAŃSKI

Andrzej KOLEK

Roman PETRUS

Grzegorz PROKOPSKI

Jan STANKIEWICZ

Andrzej TOMCZYK

Redaktor serii

Grzegorz PROKOPSKI

Redaktor naukowy

Leonard ZIEMIAŃSKI

Aleksander KOZŁOWSKI

Opiniodawcy

Magdaléna BÁLINTOVÁ, Zinoviy BLIKHARSKIJ, Bohdan DEMCHYNA, Pavol JUHÁS,  
Galyna KALDA, Aleksander KOZŁOWSKI, Stanisław KUŚ, Vincent KVOCÁK,  
Lech LICHOLAŁ, Witold NIEMIEC, Vyacheslav PISARIEV, Grzegorz PROKOPSKI,  
Janusz RAK, Adam REICHHART, Myrosław SANYTSKY, Ingrid ŠENITKOVÁ,  
Nadezda STEVULOVA, Janusz TOMASZEK, Zuzana VRANAYOVÁ,  
Zenon WASZCZYSZYN, Szczepan WOLIŃSKI, Orest WOZNIAK, Leonard ZIEMIAŃSKI

Redaktor

Zdzisław PISAREK

ISSN

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej  
ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

## SPIS TREŚCI

Микола П. БОСАК Гідротермічні параметри кінцевої акваторії водоймищ-охолодників циркуляційної води електростанцій.....	5
Jadwiga KALETA Badania dotyczące uzdatniania wody podziemnej zawierającej naturalną materię organiczną ...	11
Володимир Й. ЛАБАЙ Енергоощадні співвідношення між витратами повітря на випарнику і конденсаторі split- кондиціонерів .....	21
Ігор В. МЕЛЬНИК, Володимир М. СОРОХТЕЙ Конструювання і дослідження монолітних плоских залізобетонних перекриттів з ефективними вставками .....	27
Piotr NAZARKO, Michał JUREK, Leonard ZIEMIAŃSKI Fale sprężyste w badaniach konstrukcji: I. Przetwarzanie sygnałów.....	37
Piotr NAZARKO, Michał JUREK, Leonard ZIEMIAŃSKI Fale sprężyste w badaniach konstrukcji: II. Doświadczenia laboratoryjne.....	43
Adam RYBKA, Magdalena KYCKO Kształtowanie domów wielorodzinnych o konstrukcji stalowej.....	51
Григорій І. ШПАК Оцінювання ефективності використання природного газу в промислових печах.....	57
Орест Т. ВОЗНЯК, Юрій С. ЮРКЕВИЧ, Василь М. ЖЕЛИХ, Оксана В. ОМЕЛЬЧУК Акустичні характеристики припливного повітряного потоку при взаємодії струмин.....	61
Стефан С. ЖУКОВСЬКИЙ, Олександр М. ДОВБУШ, Антон ЧЕТЕРБОК Розподіл тисків на вході локального відсмоктувача з кільцевим повітрообмежником .....	67



Микола П. БОСАК<sup>1</sup>

## **ГІДРОТЕРМІЧНІ ПАРАМЕТРИ КІНЦЕВОЇ АКВАТОРІЇ ВОДОЙМИЩ-ОХОЛОДНИКІВ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ВОДИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

В статті на основі натурних досліджень проведено аналіз температурного режиму кінцевої акваторії водоймищ-охолодників систем технічного водопостачання електростанцій. Отримані відповідні методики розрахунків температури води для даної акваторії.

### **1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.**

В статті виконано аналітичні дослідження температурного режиму кінцевої акваторії водоймищ-охолодників систем технічного водопостачання електростанцій. У наукових працях, а також в нормативно-технічній літературі метою розрахунку водоймищ-охолодників (ВО) систем технічного водопостачання ТЕС і АЕС є визначення середньої температури охолодженої води та необхідної площі ВО. Проте відсутні вимоги щодо визначення оптимальних розмірів таких ВО. В аспекті оптимальності ВО доцільно визначати: розміри кінцевої ділянки ВО, де на значній її акваторії зниження температури несуттєве. Для розрахунків температури циркуляційної води ТЕС і АЕС у водоймищах-охолодниках в останніх виділяють ближню і дальню кінцеву акваторію. У кінцевій акваторії ВО можна виділити зону добового охолодження та зону повільного охолодження циркуляційної води до її природної температури. В дальній зоні ВО встановлюється температура  $t_2$  вища від природного її значення на 4–10 0С.

Інженерні методи розрахунків ВО виконуються на основі рівняння теплового балансу [1,2], є також спрощені [3] та вдосконалені [4] методи розрахунків. В розрахунках за першим методом використовують середні значення коефіцієнтів тепловіддачі з акваторії ВО в процесі випаровуванні  $\alpha_{\text{в}}$  та конвекції  $\alpha_{\text{к}}$ . Це впливає на точність визначення коефіцієнта використання ВО  $K_{\text{во}}$  і активної його площі  $\Omega_{\text{ак}}$ . Крім цього в даному методі температуру природної води проектного водоймища приймають таку як у водоймищі-аналозі, що теж є досить умовним фактором, оскільки достатньо близьких природних водоймищ-аналогів не існує, бо середня температура води конкретного ВО залежить від природних факторів, морфографічних особливостей та акумуляційної теплоємності водоймища.

<sup>1</sup>к.т.н., Національний Університет “Львівська політехніка”, Львів, УКРАЇНА

## 2. ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗМІРІВ КІНЦЕВОЇ ЗОНИ ВО.

Для гідротермічних розрахунків водоймищ-охолодників циркуляційної води ТЕС і АЕС, і особливо - видовжених та руслових, в кінцевій акваторії можна виділити зону добового охолодження та зону повільного охолодження циркуляційної води до її природної температури. В дальній зоні ВО встановлюється температура  $t_2$  вища від природного її значення на величину  $\delta$ , тобто  $t_2 = \delta + t_{np}$ . Ця зона займає значні розміри, тому постає питання про її необхідну та оптимальну площу для ВО ТЕС і АЕС.

В загальному виді гідротермічний режим водного потоку описується рівнянням Нав'є-Стокса. Температура води в акваторії повільного охолодження змінюється у функціональній залежності  $t_2 = f(S_k, S_B, R, V, \lambda)$ , тобто від величини радіаційний балансу ( $R$ ), тепловіддачі ( $S_B$ ) з поверхні води в повітря випаровуванням; тепловіддачі через поверхню води в повітря конвекцією ( $S_B$ );  $V$  - швидкості води ( $S_B$ ); коефіцієнта теплопередачі ( $\lambda$ ).

Швидкість течії води у кінці ВО перед водозабором невисокі і становлять переважно 1,0-5,0 см/с. Враховуючи характерний розподіл ізотерм для водосховищ-охолодників (рис. 1), велику віддаль між водоскидом теплої води у ВО та водозабором можна стверджувати, що динамічне перенесення тепла до кінцевої ділянки ВО не є визначальним на її температури, а визначальними для цієї акваторії є метеофактори – температура, вологість, швидкість вітру.

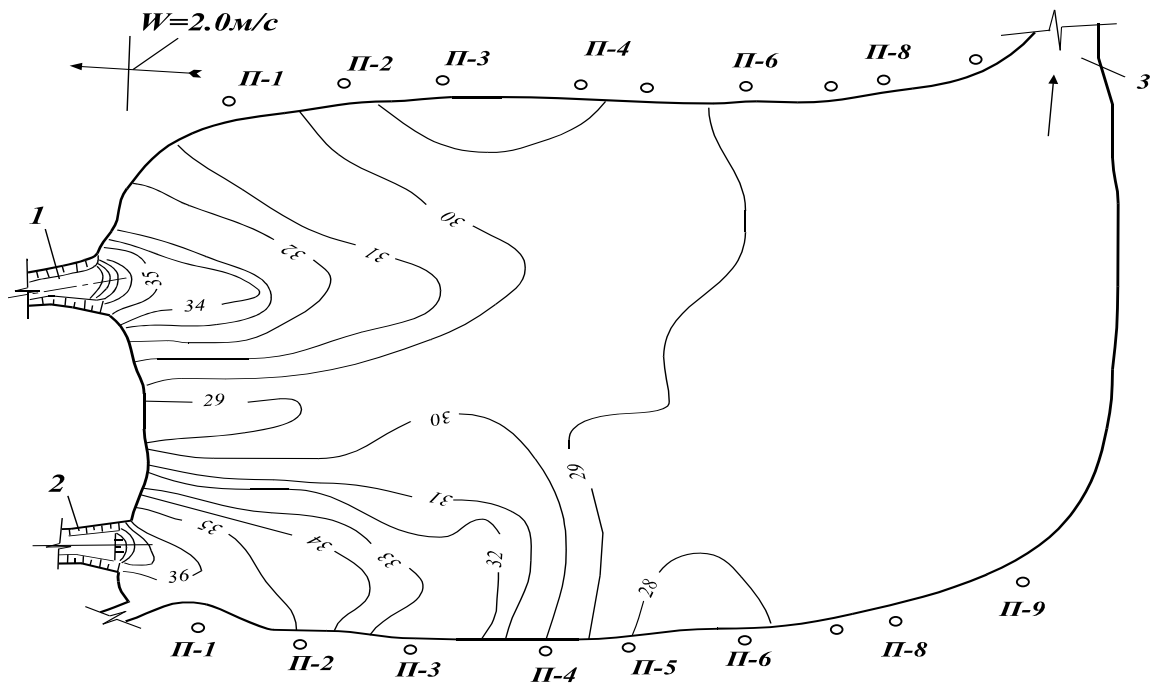


Рис. 1 Характерна карта охолодження води у не русловому ВО АЕС.

1,2 – водоскиди, 3 – водозабір.

Швидкість охолодження води  $\Delta t_{во}$  в зоні добового інтервалу протікання її по акваторії ВО, згідно результатів натурних досліджень [3] для навантаженого не руслового водоймища апроксимується узагальненою формулою

$$\Delta t_{во} = \Delta t_{ц} (1 - e^{-bT}), \text{ } ^\circ\text{C/год}, \quad (1)$$

де  $T$  – час протікання води у ВО;  $\Delta t_{\text{ц}}$  - нагрівання циркуляційної води від теплообмінного обладнання,  $b$  – коефіцієнти,  $b = 0,322 - 0,140$  в залежності від виду ВО та теплового навантаження [3].

В кінцевій частині навантаженого непротічного річкою ВО (з поверхневим водозабором) інтенсивність зниження температури води становить в літній період  $V_t = 0,03 - 0,08$   $^{\circ}\text{C}/\text{год}$  (рис.2), або  $0,01 - 0,06$   $^{\circ}\text{C}/100\text{м}$ .

Іншими дослідженнями [4] визначено, що коефіцієнт тепловіддачі випаровуванням  $\alpha_{\text{вип}}$  в кінці протічного ВО становить  $0,01$  Мкал/( $\text{м}^2 \cdot \text{добу} \cdot \text{мм}$ ). в центральній частині  $0,07-0,16$  Мкал/( $\text{м}^2 \cdot \text{добу} \cdot \text{мм}$ ), а в ближній зоні  $0,80 - 0,50$  Мкал/( $\text{м}^2 \cdot \text{добу} \cdot \text{мм}$ ). В літній теплий період майже все охолодження відбувається внаслідок випаровування. Тому за пропорційним співвідношенням інтенсивність зниження температури в кінці ВО зменшується в  $50-70$  разів, що співпадає з результатами визначеними за формулою (1). Отже, можна стверджувати, що така ж інтенсивність охолодження збережеться у водоймі поза межами зони добового протікання і охолодження води.

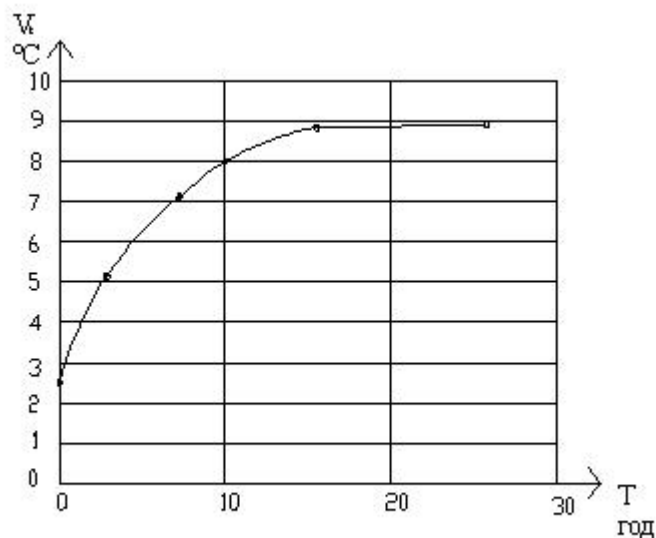


Рис.2 Графік добового охолодження циркуляційної води електростанції у ВО при питомому навантаженні охолоджувальної води  $q = 1,04$   $\text{м}^3/\text{м}^2$  добу

В літній період року зміна середньомісячної природної температури води для регіонів України становить  $1-3^{\circ}\text{C}$ , а середньодобових температур  $0,3-5^{\circ}\text{C}$ . Добові зміни природної температури води залежать від зміни температури повітря, сонячного тепла, метеорологічних факторів. Зокрема, для реальних умов ВО підвищення середньодобових температур повітря на  $0,4^{\circ}\text{C}$  призводить до підвищення  $t_{\text{пр}}$  води на  $0,1^{\circ}\text{C}$ , а зниження  $\Theta$  на  $0,6^{\circ}\text{C}$  призводить до зниження  $t_{\text{пр}}$  на  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Тобто зміна значень  $t_{\text{пр}}$  відбувається пропорційно зміні температури повітря (рис 3).

Ймовірно, що за межами акваторії добового охолодження циркуляційної води швидкість зміни її температури, при сталих температурах повітря, або при їх зниженні будуть пропорційними середньодобовим коливанням температур повітря.

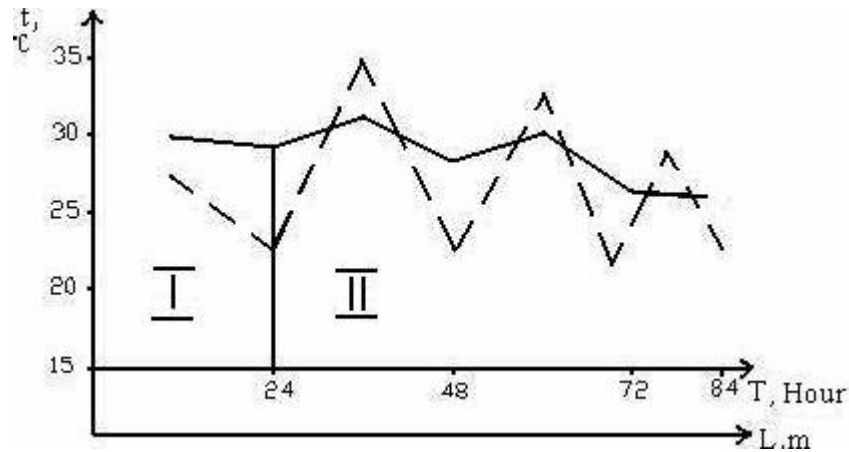


Рис 3. Графік добових змін температури води у руслових ВО в літній період відповідно до зміни температури повітря  
 \_\_\_\_\_ температури води, \_\_\_ \_\_ температури повітря.

Для гідротермічних розрахунків дальньої акваторії протічних ВО можна також використати так званий метод суперпозиції [6]. Виділимо об'єм кінцевої ділянки ВО (рис. 4), граничні умови охолодження води для якого записується в такому виді

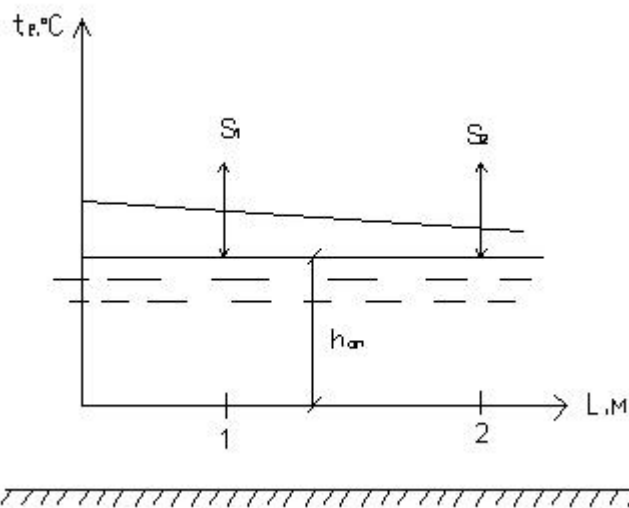


Рис 4. Граничні умови теплообміну для розрахунку температури води в дальній акваторії ВО.

$S_1, S_2$  – тепловміст на ділянці акваторії.

$$-\lambda \frac{dt}{dl} = \Delta S = \rho c W (t_1 - t_2), \quad (2)$$

де  $\Delta S$  – різниця між тепловмістом води, на розрахунковій ділянці акваторії водоймища.

Для розрахунків температури води на глибині чи по відстані водоймища граничними умовами є початкова температура води  $t_0$ , глибина  $h$ , значення коефіцієнтів тепло - і температуропровідності

Температура води у водоймищі або розрахункова відстань  $l$  для конкретної схеми та заданої температури води визначиться за формулою



$$t = t_0 - v \cdot \Delta S \cdot l / \lambda \quad (4)$$

де  $\lambda$  – параметр зміни температури повітря, який вводить у другу складову формули та визначається в залежності від граничних умов – величин критерію Фур'є та критерій Біо.

Для гідротермічних розрахунків протічних ВО СТВ електростанцій визначальним є теплий літній період з високими температурами повітря. В даний період охолодження води у ВО відбувається головним чином в наслідок її випаровування. Теплопередача в кінцеву ділянку протічного і мало протічного ВО відбувається внаслідок хвильового, дрейфового та динамічного перемішування води і турбулентної та конвективної теплопровідності які характеризуються відповідними коефіцієнтами  $\lambda_t, \lambda_k$ . Для розрахунків теплоперенесення по довжині руслових крупних водоймищ з великою довжиною зони II за даною методикою значення  $\lambda_t$  збільшуються пропорційно до дуже великих чисел, що не дає прийняттого кінцевого результату.

Відтак для прогнозних гідротермічних розрахунків дальньої акваторії водоймищ-охолодників, (поза межами добового охолодження), доцільно застосування методики на базі експериментальних натурних даних про інтенсивність зміни температури в кінцевій зоні ВО, що наведено вище. Приймавши таку інтенсивність охолодження води у зоні II ВО (рис. 2) постійною для розрахункового періоду можна визначити температуру води  $t_3$  на певній віддалі поза межами акваторії добового охолодження

$$t_3 = t_2 - \Delta t_3 = t_2 - V_t \cdot l \quad (4)$$

де  $\Delta t \leq t_2 - t_{пр}$  - діапазон зниження температури води;  $t_{пр}$  – природна температура води у водоймищі.

За вищенаведеними методиками охолодження води поза межами добової акваторії повільне і при сталих метеофакторах не перевищує  $0,5$  °C на 1 км відстані. Тому протяжність ВО слід обмежувати умовою протікання його за період однієї доби для ВО середньої глибини та періодом протікання не більше півтори доби – для мілких ВО. В подальшому планується дослідити вплив зменшення об'єму кінцевої зони ВО на температуру охолоджувальної води СТВ.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Фарфоровский Б.С., Фарворовский В.Б. Охладители циркуляционной воды тепловых электростанций. – Л.: Энергия, 1972. – 111с.
- [2] Методические указания к расчету водохранилищ-охладителей ТЭС. П-33-75./ ВНИИГ Л. Энергия, 1976.–34 с.
- [3] Босак М.П., Мисак Й.С. Интенсивность охолодження циркуляційної води ТЕС і АЕС у водосховищах-охолодниках. //”Енергетика и электрификация”- № 8. – Київ. – 2005. – С.42 - 44.
- [4] Никифорович Е. И., Костин А. Г., В.Н Доманов Новый усовершенствованный метод расчета охлаждающей способности водоемов-охладителей ТЭС и АЭС. / Энергетика і електрифікація, №9 2005.
- [5] Труды совещания по гидроаэротермическим исследованиям. водохранилищ-охладителей. Под ред. А.Г. Прокопенко.- Л.: Гидрометеиздат, 1969., – 163с.
- [6] Рекомендации по термическому расчету водохранилищ. П 78-79, –Л.: ВНИИГ, 1980. – 30 с.

## **HYDROTHERMAL PARAMETERS OF EVENTUAL AQUATORIUM OF RESERVOIRS-COOLERS OF CIRCULATION WATER OF POWER-STATIONS**

### **Summary**

In this article use investigation temperature processing ending area of water receiver system technical water supply power station. To get according methods calculation temperature of water for this water receiver. Analytical research of temperature condition of eventual aquatorium of reservoirs-coolers of the technical water of power-stations systems is presented in the article. In scientific labours, and also in normatively technical literature the purpose of calculation of reservoirs-coolers (WCR) of the technical water systems TPS and NPS is determination of middle temperature of cooling water and necessary area of WCR. However much requirements absent in relation to determination of optimum sizes of such WCR. In the aspect of optimum of WCR expediently to determine: sizes of eventual area of WCR, where on its considerable aquatorium of decline of temperature is unimportant.

Jadwiga KALETA<sup>1</sup>

## **BADANIA DOTYCZĄCE UZDATNIANIA WODY PODZIEMNEJ ZAWIERAJĄCEJ NATURALNĄ MATERIEŃ ORGANICZNĄ**

### **1. WSTĘP**

Na kształtowanie jakości wód podziemnych ma wpływ wiele współdziałających ze sobą czynników i procesów. Największe znaczenie mają przebiegające w glebie procesy geochemiczne i mikrobiologiczne, które w obecności substancji organicznych sprzyjają tworzeniu się związków kompleksowych, ługowanych przez infiltrujące wody opadowe [1].

Zanieczyszczeniami występującymi najczęściej w wodach podziemnych są różne formy żelaza i manganu oraz związki azotu. W niektórych wodach podziemnych obok w/w zanieczyszczeń występuje również naturalna materia organiczna reprezentowana głównie przez związki humusowe. Wzbogacanie wód substancjami humusowymi następuje w wyniku ługowania humusu z gleb bogatych w próchnicę oraz z brunatno-węglowych formacji. Ich zawartość w wodach naturalnych zależy od rodzaju gleby, czasu kontaktu przesączającej się wody z warstwą gruntową oraz składu chemicznego, a przede wszystkim odczynu wody. Wody podziemne zawierające naturalną materię organiczną charakteryzują się często wysoką barwą i utleniałością [2, 3].

Do niedawna uważano, że substancje humusowe nie są szkodliwe dla ludzi. Z wody przeznaczonej do picia były usuwane przede wszystkim ze względów estetycznych. Badania przeprowadzone w ostatnich latach wykazały, że mogą być one źródłem niepożądanego zapachu i barwy wody oraz mogą kumulować niektóre substancje toksyczne poprzez tworzenie kompleksów z metalami ciężkimi, związkami fosforu, amoniaku oraz adsorpcję związków organicznych (pestycydów, ftalanów, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych). W wyniku reakcji substancji humusowych z chlorem tworzą się niepożądane halogenowe mikrozanieczyszczenia wtórne [4, 5, 6].

Jednym z najpopularniejszych procesów technologicznych stosowanych w usuwaniu substancji humusowych z wód jest koagulacja. W przypadku koagulacji tych zanieczyszczeń konieczne są często większe dawki koagulantów niż przy koagulacji cząstek powodujących mętność wody oraz ściśle zachowanie optymalnych warunków procesu, głównie odczynu pH.

Przy zbyt małych dawkach koagulantów żelazowych lub niewłaściwym odczynie pH mogą powstać barwne połączenia (chelaty) kwasów humusowych z żelazem. W niektórych przypadkach proces koagulacji musi być wspomagany utlenianiem chemicznym i/lub polielektrolitami [7, 8, 9, 10, 11].

<sup>1</sup> Dr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, POLSKA,

Obecność naturalnej materii organicznej w ujmowanych na potrzeby komunalne wodach jest problemem, z którym boryka się wiele stacji uzdatniania, między innymi SUW w Jeziórku k. Tarnobrzega.

## 2. CHARAKTERYSTYKA WODY UJMOWANEJ (SUROWEJ)

Zasilanie Stacji Uzdatniania Wody w Jeziórku odbywa się z 22 studni głębinowych, które pracują naprzemiennie. Czwartorzędowy poziom wodonośny, w obrębie którego znajduje się ujęcie wody stanowi część Głównego Zbiornika Wód Podziemnych Nr 425 „Dębica – Stalowa Wola – Rzeszów”. Zmiany jakości wody surowej przeanalizowano na podstawie udostępnionych analiz fizyczno-chemicznych wody, wykonywanych w laboratorium wodociągowym w latach 2000-2004 (tab. 1).

Tabela 1. Jakość wody ujmowanej w SUW w Jeziórku w latach 2000-2004

Wskaźnik	Jednostka	Wartość dopuszczalna dla wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi	Zakres zmian
Barwa	gPt/m <sup>3</sup>	15	30-150
Odczyn	pH	6,5-9,5	6,7-7,0
Temperatura	°C	-	10,8-12,1
Twardość ogólna	val/m <sup>3</sup> gCaCO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup>	1,2-10,0 60-500	4,9-6,3 225-315
Zasadowość	val/m <sup>3</sup>	-	2,3-4,0
Żelazo	gFe/m <sup>3</sup>	0,2	10,0-44,0
Mangan	gMn/m <sup>3</sup>	0,05	0,4-1,7
Amoniak	gNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /m <sup>3</sup>	0,5	0,95-2,5
Utlenialność	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	5,0	10,0-16,0
Związki humusowe	g/m <sup>3</sup>	-	8,8-17,0

Ujmowana woda nie spełnia wymogów sanitarnych w zakresie barwy, utlenialności, amoniaku, żelaza i manganu. Wysoka barwa wody korelująca z ponadnormatywną utlenialnością i zawartością substancji humusowych wskazuje na obecność w wodzie naturalnej materii organicznej, która może występować w połączeniach kompleksowych ze związkami żelaza i manganu. W przedmiotowej wodzie występują duże, rzadko spotykane na ujęciach komunalnych ilości żelaza. Z uwagi na twardość ogólną ujmowaną wodę zalicza się do wód średnio twardych, przy czym 48% – 65% tej twardości stanowi twardość węglanowa.

Skład fizyczno-chemiczny ujmowanej wody wskazuje na mogące wystąpić trudności w procesie jej uzdatniania.

## 3. UKŁAD TECHNOLOGICZNY UZDATNIANIA WODY W SUW W JEZIÓRKU

Ujmowana woda kierowana jest do „napowietrzalni”, w skład której wchodzi komora napowietrzania otwartego oraz komory reakcji. Do rurociągu doprowadzającego wodę do „napowietrzalni” dodawany jest utleniacz nadmanganian potasu KMnO<sub>4</sub>, mleko wapienne Ca(OH)<sub>2</sub> oraz koagulant siarczan glinu Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> · 18 H<sub>2</sub>O. Następnie woda kierowana jest do osadników, a później na filtry pośpieszne otwarte.

Taki układ technologiczny nie gwarantował uzyskania wody odpowiadającej normom. W uzdatnionej wodzie występowała ponadnormatywna utlenialność i barwa, co wskazywało na pozostałość pewnej ilości substancji humusowych. Obecność w wodzie wodociągowej materii organicznej, mały rozbiór wody (zwłaszcza na końcówkach sieci) oraz

niesystematyczne płukanie sieci stało się przyczyną powstawania osadów, które były źródłem wtórnego skażenia bakteriologicznego wody wodociągowej. W 2003 roku przeprowadzono czyszczenie sieci wodociągowej oraz intensywne jej płukanie. Podjęto również decyzję o konieczności modernizacji procesu uzdatniania wody.

#### 4. BADANIA LABORATORYJNE DOTYCZĄCE MODERNIZACJI CIĄGU TECHNOLOGICZNEGO UZDATNIANIA WODY

Celem przeprowadzonych badań laboratoryjnych było opracowanie technologii spełniającej następujące warunki:

- obniżającej barwę i utlenialność do wartości normatywnych,
- gwarantującej zachowanie osiągalnych dotychczas, wysokich efektów usuwania z wody żelaza, manganu oraz azotu amonowego,
- wykorzystującej istniejące i eksploatowane urządzenia i obiekty SUW, przez co minimalizującej koszty modernizacji.

Badania laboratoryjne prowadzono każdorazowo na wodzie intensywnie napowietrzanej do 80 – 90% nasycenia tlenem, co przy temperaturze 10 – 12°C dawało wartość tlenu rozpuszczonego w granicach 8 – 9 gO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>. Po procesie napowietrzania odczyn wody wzrastał do wartości 7,1 – 7,4 pH. Skoncentrowano się głównie na badaniach dotyczących procesu koagulacji.

Koagulację wody prowadzono w sposób klasyczny, w oparciu o test naczyńniowy tzw. „jar test” z wykorzystaniem sześciostanowiskowego koagulatora laboratoryjnego posiadającego mechaniczne mieszadła o regulowanej liczbie obrotów [12]. W sposób doświadczalny oceniono efektywność, określono wielkość dawek oraz kolejność wprowadzania do wody następujących reagentów:

- utleniacza chemicznego nadmanganianu potasu (KMnO<sub>4</sub>) w celu utlenienia materii organicznej oraz związków żelaza i manganu,
- hydrolizującej soli glinu (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) jako koagulanta podstawowego,
- substancji wspomagających proces koagulacji, w tym polielektrolitów kationowych produkcji Allied Collids typu Zetag 92 i Magnafloc 352, oraz flokulantów anionowych Praestol Produkcji Stockhausen typu TR-2515 i A-130.

Czas trwania szybkiego mieszania wynosił 3 min, natomiast proces flokulacji (wolnego mieszania) prowadzono przez 30 min. Po przeprowadzeniu procesu koagulacji próby pozostawiano na 30 minutową sedymentację osadu. W zdekantowanych i przesączonych próbach wykonywano, zgodnie z Polskimi Normami oznaczenia kontrolne takie jak: odczyn, zasadowość, barwę, mętność, utlenialność żelazo, mangan. Wskaźniki te były miarodajne do oceny efektów uzdatniania wody. Przeprowadzony eksperyment był wiarygodną symulacją procesu uzdatniania wody w SUW w Jeziórku.

W ramach badań dotyczących optymalizacji pierwszego obszaru przeprowadzono szereg testów technologicznych.

##### 4.1. Utlenianie za pomocą KMnO<sub>4</sub> i autokoagulacja

Wprowadzano wzrastające dawki utleniacza w zakresie od 1 do 12 g/m<sup>3</sup>. Utlenione związki żelaza i materia organiczna oraz powstający dwutlenek manganu tworzyły łatwo sedymentujące kłaczkę. Wraz ze wzrostem dawki KMnO<sub>4</sub> uzyskiwano stopniowe zmniejszanie barwy i utlenialności odpowiednio o 25 – 58% i o 14 – 35%. Parametry te, które są w korelacji z zanieczyszczeniami humusowymi przekraczały jednak wartości dopuszczalne w wodzie przeznaczony do picia. W prowadzonym procesie obniżała się zawartość żelaza z 15,7 gFe/m<sup>3</sup> do 7,3 gFe/m<sup>3</sup> (przy największej dawce), natomiast zwiększeniu ulegała

zawartość manganu. Przy największej dawce nadmanganianu potasu ( $12 \text{ g/m}^3$ ) próba zabarwiła się na specyficzny różowy kolor, co świadczyło o nadmiarze tego utleniacza.

W dalszych badaniach optymalną dawkę  $\text{KMnO}_4$  ustalano wizualnie. Była to największa dawka, przy której próby wody surowej nie zabarwiały się na kolor różowy. Wyliczone teoretyczne dawki nadmanganianu potasu, przy założeniu, że  $1 \text{ g KMnO}_4$  utlenia około  $1,4 \text{ g Fe}^{+2}$  kształtowały się na porównywalnym poziomie z dawkami ustalonymi doświadczalnie.

#### 4.2. Utlenianie za pomocą $\text{KMnO}_4$ i koagulacja wapnem

W tej części badań przeprowadzono próbę usuwania barwnych substancji z wody za pomocą utleniania nadmanganianem potasu, a następnie dawkowania mleka wapiennego  $\text{Ca(OH)}_2$  do uzyskania odczynu w zakresie  $9 - 10 \text{ pH}$ . W warunkach tych istnieje możliwość sorpcji i współstrącania zanieczyszczeń organicznych z powstającymi węglanami wapnia i wodorotlenkami magnezu [12].

Uzyskane efekty w zakresie usuwania zanieczyszczeń humusowych były niezadowolające. Utrzymywała się ponadnormatywna barwa (około  $20 \text{ gPt/m}^3$ ) oraz podwyższona utlenialność (w granicach  $6 - 7 \text{ gO}_2/\text{m}^3$ ). Skutecznie (zgodnie z oczekiwaniami) zmniejszona została zawartość związków żelaza i manganu. Twardość wody, w wyniku postępującego, jednoczesnego jej zmiękczenia, ulegała zmniejszeniu do wartości oscylującej wokół dolnej granicy wynoszącej  $60 \text{ g CaCO}_3/\text{m}^3$ .

#### 4.3. Koagulacja zanieczyszczeń wody siarczanem glinu

W pierwszej kolejności jako koagulant zastosowano siarczan glinu, z uwagi na to, że był on dotychczas stosowany na stacji i w praktyce najczęściej wykorzystywany jest do tego typu wód [1, 12].

Koagulant ten wprowadzany do wody w wyniku dysocjacji i hydrolizy (w określonym zakresie odczynu) tworzy koloidy o ładunku przeciwnym w stosunku do koloidów zawartych w oczyszczanej wodzie, jak również kwas siarkowy, który w wyniku reakcji z zasadowością wody powoduje obniżenie jej odczynu do określonego poziomu. To obniżenie pH prowadzi do zwiększonej podatności na koagulację zanieczyszczeń zawartych w wodzie, w szczególności substancji humusowych.

Na podstawie rozeznania literaturowego [4, 8] zdecydowano, że proces koagulacji wody za pomocą siarczanu glinu prowadzony dotychczas w wysokim odczynie (dawkowanie mleka wapiennego) powinien odbywać się w przy odczynach niższych (od  $6,0$  do  $6,5 \text{ pH}$ ). Substancje humusowe w zakresie kwaśnych odczynów występują w postaci podatnych na koagulację koloidów o ładunku ujemnym. Odczyny te są również zalecane w przypadku stosowania siarczanu glinu, który dawkowany do wody tworzy dodatnio naładowane koloidy, łączące się w kłaczkę z koloidami SH. W zakresie odczynów alkalicznych substancje humusowe przechodzą w łatwo rozpuszczalne humusany wapnia i sodu, znacznie trudniejsze do usunięcia w procesie koagulacji. Ponadto w zakresie odczynów powyżej  $8,0 \text{ pH}$  zachodzi rozpuszczanie i dysocjacja powstającego z siarczanu glinu – wodorotlenku, z wydzieleniem ujemnie naładowanych  $\text{Al(OH)}_2\text{O}^-$ , które nie koagulują pozostałych ujemnie naładowanych anionów kwasów humusowych.

Dawki siarczanu glinu ustalone w zależności od zawartości związków żelaza ogólnego (w okresie przeprowadzanych badań zawartość żelaza oscylowała wokół wartości  $15,0 \text{ g/m}^3$ ) w wodzie uzdatnianej wynosiły:

- $0,05 \text{ Fe}_{\text{og}} = 0,785 \text{ gAl/m}^3 = 6,80 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O/m}^3$ ,
- $0,10 \text{ Fe}_{\text{og}} = 1,570 \text{ gAl/m}^3 = 13,70 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O/m}^3$ ,

- $0,15 \text{ Fe}_{\text{og}} = 2,355 \text{ gAl/m}^3 = 20,58 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O/m}^3$ ,
- $0,25 \text{ Fe}_{\text{og}} = 3,930 \text{ gAl/m}^3 = 34,30 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O/m}^3$ ,
- $0,50 \text{ Fe}_{\text{og}} = 7,850 \text{ gAl/m}^3 = 68,60 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O/m}^3$ ,
- $1,00 \text{ Fe}_{\text{og}} = 15,70 \text{ gAl/m}^3 = 137,20 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O/m}^3$ ,
- $1,10 \text{ Fe}_{\text{og}} = 17,10 \text{ gAl/m}^3 = 149,43 \text{ g Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O/m}^3$ .

Uzyskane wyniki w zakresie barwy i utlenialności zobrazowano na rysunku 1 i 2.

Efektywność koagulacji za pomocą siarczanu glinu okazała się mało efektywna. Stosując największą dawkę koagulantu nie uzyskano normatywnej barwy i utlenialności. Nastąpiło zmniejszenie związków żelaza oscylujące wokół 50% oraz nieznaczne, około 3% obniżenie zawartości manganu. W miarę wzrostu dawki koagulantu obniżał się odczyn z wartości 7,24 do 6,3 pH oraz sukcesywnie malała zasadowość. Przy dwóch największych dawkach siarczanu glinu uzdatniona woda wykazywała właściwości agresywne.

#### 4.4. Utlenianie nadmanganianem potasu i koagulacja wody siarczanem glinu

Badania prowadzono w dwóch seriach.

*Stała dawka utleniacza  $\text{KMnO}_4$  i koagulacja zmiennymi dawkami  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$*

Zastosowano optymalną dawkę nadmanganianu potasu ( $12 \text{ g/m}^3$ ), którą wprowadzano z niewielkim wyprzedzeniem w stosunku do koagulantu podstawowego. Siarczan glinu wprowadzano w zmiennych dawkach ustalonych w poprzednim teście.

Poprzedzenie procesu koagulacji utlenianiem chemicznym skutkowało większą obniżką utlenialności, ale barwa wody po koagulacji kształtowała się na nieco wyższym poziomie niż przy zastosowaniu samego koagulantu (rys.1 i 2).

Przy największej dawce koagulantu stężenie związków żelaza obniżyło się do ilości śladowych, natomiast wzrosła zawartość manganu. Sytuacja taka spowodowana była zbyt dużą dawką nadmanganianu potasu. Przy dwóch największych dawkach koagulantu nastąpiła znaczna obniżka odczynu wody oraz zasadowości, co wskazywało na agresywne właściwości wody.

*Określenie wpływu kolejności dawkowania nadmanganianu potasu i siarczanu glinu*

Stosowano następujące dawki reagentów i kolejność ich wprowadzania do procesu koagulacji:

- A –  $12 \text{ g/m}^3 \text{ KMnO}_4$  – dawkowanie z wyprzedzeniem w stosunku do koagulantu  $137 \text{ g/m}^3 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{ H}_2\text{O}$ ,
  - B –  $12 \text{ g/m}^3 \text{ KMnO}_4$   
 $137 \text{ g/m}^3 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{ H}_2\text{O}$  - dawkowanie równoczesne,
  - C -  $137 \text{ g/m}^3 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{ H}_2\text{O}$  – dawkowanie na początku szybkiego mieszania  
 $12 \text{ g/m}^3 \text{ KMnO}_4$  - dawkowanie na początku wolnego mieszania,
  - D -  $\text{KMnO}_4 = 1,0 \text{ Fe}^{+2} = 8 \text{ g/m}^3 \text{ KMnO}_4$  - dawkowanie z wyprzedzeniem w stosunku do koagulantu  $137 \text{ g/m}^3 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{ H}_2\text{O}$ ,
  - E -  $\text{KMnO}_4 = 1,0 \text{ Fe}^{+2} = 8 \text{ g/m}^3 \text{ KMnO}_4$   
 $137 \text{ g/m}^3 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{ H}_2\text{O}$  - dawkowanie równoczesne,
  - F -  $137 \text{ g/m}^3 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{ H}_2\text{O}$  – dawkowanie na początku szybkiego mieszania  
 $\text{KMnO}_4 = 1,0 \text{ Fe}^{+2} = 8 \text{ g/m}^3 \text{ KMnO}_4$  - dawkowanie na początku wolnego mieszania.
- Uzyskane wyniki zawiera tabela 2.

Utlenienie chemiczne realizowano za pomocą  $\text{KMnO}_4$  w dwóch różnych dawkach. Dawka  $12 \text{ g/m}^3$  została ustalona wizualnie, natomiast druga dawka była równa zawartości żelaza dwuwartościowego w wodzie badanej i wynosiła  $8 \text{ g/m}^3$ . Dawka siarczanu glinu gwarantowała obniżenie odczynu pH wody wyjściowej do wartości 6,3 – 6,4, mieszczącego się w granicach optymalnych dla tego koagulantu. Utlenialność wody po procesie koagulacji spełniała wymogi sanitarne, natomiast barwa wody utrzymywała się na podwyższonym

poziomie. Niższe wartości utlenialności uzyskano przy zastosowaniu większej dawki nadmanganianu potasu. Związki żelaza usunięte zostały całkowicie, natomiast pomimo znacznego, wahającego się w granicach od 32% do 71% obniżenia zawartość manganu przekraczała we wszystkich przypadkach dopuszczalną wartość wynoszącą  $0,05 \text{ gMn/m}^3$ .

Tabela 2. Badanie wpływu kolejności dawkowania utleniacza i koagulantu do badanej wody

Wskaźnik	Jednostka	Woda badana	Dawki reagentów					
			A	B	C	D	E	F
Żelazo $\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$	$\text{g/m}^3$	3,8/8,0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Żelazo	$\text{g/m}^3$	13,0	0	0	0	0	0	0
Mangan	$\text{g/m}^3$	1,13	0,22	0,29	0,23	0,69	0,72	0,77
Barwa	$\text{gPt/m}^3$	110	20	20	20	20	20	20
Utlenialność	$\text{gO}_2/\text{m}^3$	11,8	3,5	3,7	4,3	4,4	4,9	5,1
Odczyn	pH	7,08	6,3	6,3	6,3	6,4	6,4	6,4
Zasadowość	$\text{val/m}^3$	3,3	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,9

Po przeanalizowaniu wpływu kolejności i miejsca dawkowania reagentów można stwierdzić, że nie zauważono znaczących różnic w osiągniętych efektach oczyszczania wody. Nieco lepsze wyniki uzyskano przy dawkowaniu utleniacza z kilkuminutowym wyprzedzeniem w stosunku do koagulantu podstawowego.

#### 4.5. Utlenianie nadmanganianem potasu, koagulacja zanieczyszczeń wody siarczanem glinu wspomagana polielektrolitami

Badania prowadzono w trzech seriach.

##### *Seria I. Dawkowanie polielektrolitów kationowych Magnafloc 352 i Zetag 92*

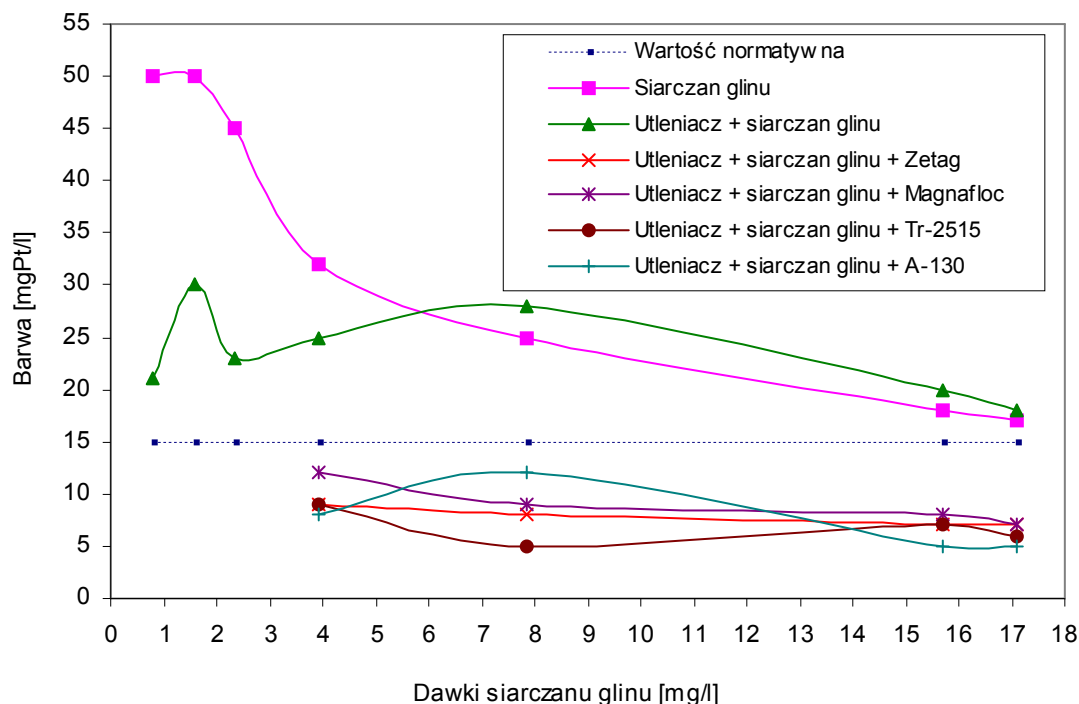
Do prób dawkowano z kilkuminutowym wyprzedzeniem  $\text{KMnO}_4$  w ustalonej wizualnie dawce, która wynosiła  $10 \text{ g/m}^3$ , a następnie dawki siarczanu glinu, które powodowały obniżenie odczynu pH do wartości 6,3 – 6,5. Pod koniec szybkiego mieszania wprowadzano odpowiedni polielektrolit w ilości stanowiącej około 2% największej dawki koagulantu, czyli wynoszącej  $0,33 \text{ g/m}^3$ . Uzdatniona tą metodą woda spełniała wymogi sanitarne w zakresie barwy, utlenialności (rys.1 i 2) oraz związków żelaza. Przekroczenia dopuszczalnych wartości wykazywały tylko związki manganu. Nieco lepsze wyniki uzyskano dawkując Zetag 92.

##### *Seria II. Dawkowanie polielektrolitów anionowych TR-2515 i A-130*

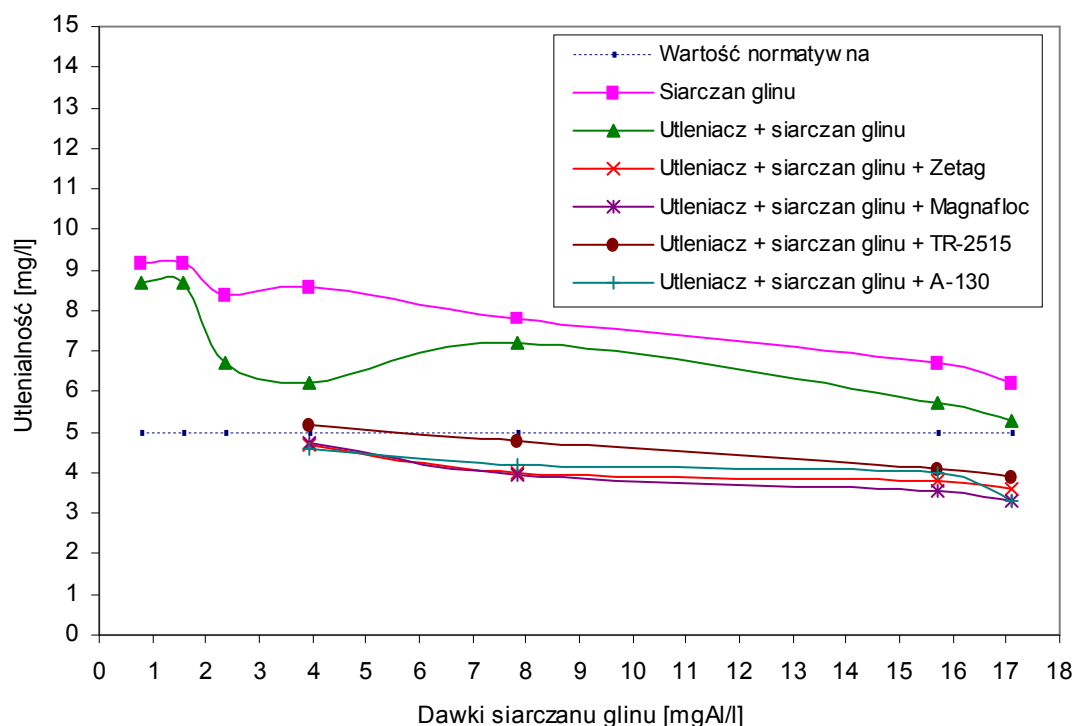
Do prób dawkowano z kilkuminutowym wyprzedzeniem  $\text{KMnO}_4$  w ustalonej wizualnie dawce, która wynosiła  $10 \text{ g/m}^3$  oraz dawki siarczanu glinu, które powodowały obniżenie odczynu do wartości 6,3 – 6,5 pH. Pod koniec szybkiego mieszania wprowadzano odpowiedni polielektrolit anionowy w ilości  $0,33 \text{ g/m}^3$ .

Polielektrolity anionowe równie skutecznie wspomagały proces koagulacji jak polielektrolity kationowe. Przy ich zastosowaniu uzyskano wodę o parametrach normatywnych z wyjątkiem manganu (rys.1 i 2).





Rys.1. Efekty zmniejszenia barwy w przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych



Rys. 2. Efekty zmniejszenia utlenialności w przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych

Porównywalne wyniki uzyskane z zastosowaniem testowanych polielektrolitów zdecydowały, że do dalszych badań i wdrożenia wybrano polielektrolit anionowy A-130 posiadający atest PZH.

Zaistniała jednak konieczność dokładnego ustalenia jego dawki z uwagi na ograniczenie ilości tego preparatu dodawanego do uzdatnianej wody na poziomie  $0,25 \text{ g/m}^3$ .

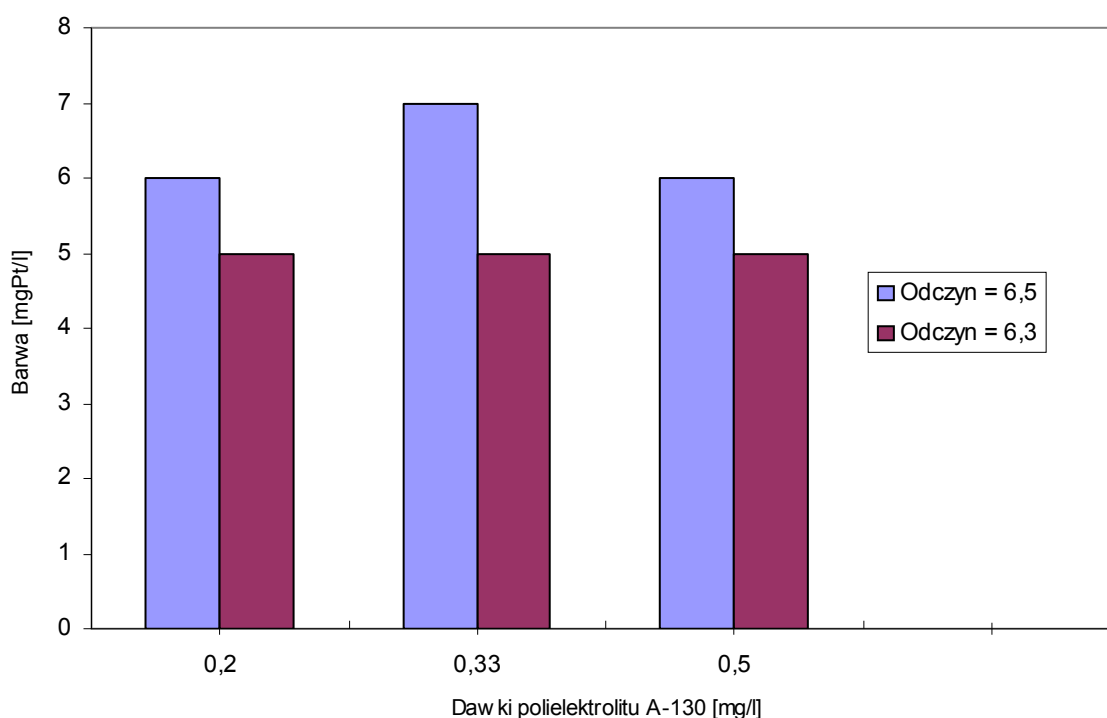
W tym celu przeprowadzono dodatkową serię badań.

*Seria III. Optymalizacja dawki polielektrolitu A – 130.*

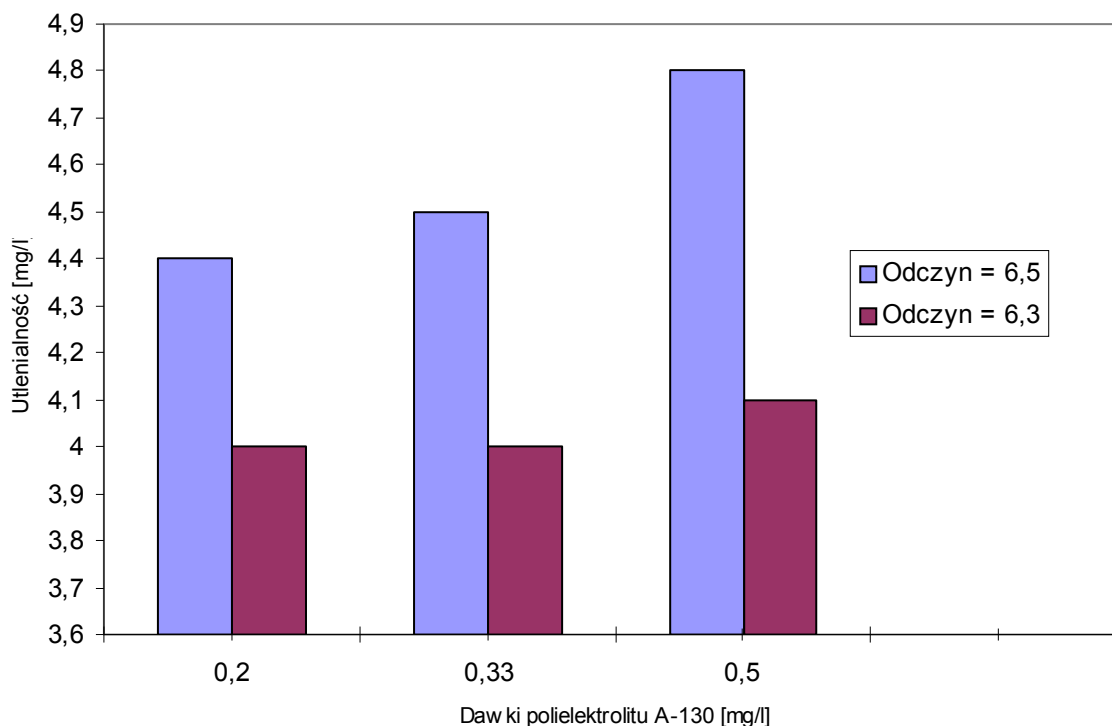
Zastosowano nadmanganian potasu w optymalnej ilości, dwie dawki siarczanu glinu, które powodowały obniżenie odczynu wody do wartości odpowiednio 6,3 i 6,5 oraz zmienne dawki polielektrolitu A-130. Uzyskane efekty zmniejszenia barwy i utlenialności zobrazowano odpowiednio na rysunku 3 i 4.

Nie zauważono znaczących różnic w obniżeniu barwy i utlenialności dla stosowanych dawek polielektrolitu, dlatego zaleca się go stosować w ilościach od 0,2 do 0,25 g/m<sup>3</sup>. Potwierdziła się natomiast zależność efektywności procesu koagulacji siarczanem glinu od odczynu wody, który jest w korelacji odwrotnej do dawki koagulantu.

Z uwagi na fakt dużej zmienności wody ujmowanej (zależnej od numerów pracujących w danym dniu studni) dawka koagulantu powinna być każdorazowo dobierana w laboratorium tak, aby odczyn koagulowanej wody obniżał się do wartości 6,0 – 6,5 pH.



Rys.3. Wpływ odczynu pH i dawek polielektrolitu A-130 na efektywność zmniejszenia barwy



Rys.4. Wpływ odczynu pH i dawek polielektrolitu A-130 na efektywność zmniejszenia utlenialności

## 5. PODSUMOWANIE

W celu uzdatnienia wody z ujęcia w Jeziórku do obowiązujących wymogów należy zastosować następującą technologię jej uzdatniania:

- intensywnie napowietrzanie wody do uzyskania 80 – 90 % nasycenia tlenem,
- utlenianie zanieczyszczeń za pomocą nadmanganianu potasu w dawce (zależnej od jakości wody i włączonych do eksploatacji studni) wahającej się w granicach 6 – 10 g/m<sup>3</sup>,
- koagulacja za pomocą siarczanu glinu w ilości potrzebnej do uzyskania odczynu wody w zakresie 6,3 – 6,5 pH, wspomagana polielektrolitem Praestol A-130 w dawce 0,20 – 0,25 g/m<sup>3</sup>,
- sedymentacja powstałej zawiesiny w osadnikach „napowietrzalni”,
- alkalizacja wody (przed osadnikami poziomymi) za pomocą mleka wapiennego do uzyskania odczynu 8,3 – 8,4 pH,
- filtracja wody na filtrach piaskowych lub antracytowo – piaskowych,
- dezynfekcja z zastosowaniem podchlorynu sodu.

Opracowana na podstawie badań laboratoryjnych technologia tylko nieznacznie różni się od technologii zaproponowanej w pierwotnej dokumentacji i okresowo stosowanej na omawianej stacji. Nowością jest zastosowanie polielektrolitu w celu intensyfikacji koagulacji, co wynika z postępu prac badawczych i możliwości pozyskania tego typu reagentu w ofercie handlowej. Dalsze zasadnicze zmiany to poprzedzenie procesu alkalizacji procesem koagulacji za pomocą siarczanu glinu.

## LITERATURA

- [1] Perchuć M.: Żelazo i kwasy humusowe w barwnych wodach podziemnych, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 11, s. 394-397, 2003.
- [2] Kaleta J., Związki humusowe w środowisku wodnym, *Rzeszów, Z.N. PRz.*, z. 38, str. 39-53, 2004.
- [3] Świdarska-Bróż M., Przydatność koagulacji w usuwaniu mikrozanieczyszczeń i ich prekursorów, *Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”* Poznań, t.I. s. 319-333, 1996,
- [4] Duan J., Wilson F., Graham N., Tay J.: Adsorption of humic acid by powdered activated carbon in saline water condition, *Desalination* 151, pp. 53-66, 2002.
- [5] Odegaard H., Eikebrokk B., Storhaug R.: Processes for the removal of humic substances from water – an overview based on Norwegian experiences, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 40, No. 9, pp. 37-46, 1999.
- [6] Smeck N.E., Novak J.M.: Weathering of soil clays with dilute sulfuric acid as influenced by sorbed humic substances, *Geoderma* 63, pp. 63-76, 1994.
- [7] Duan J., Wang J., Graham N., Wilson F.: Coagulation of humic acid by aluminium sulphate in saline water conditions, *Desalination* 150, pp. 1-14, 2002.
- [8] Dumat C., Staunton S.: Reduced adsorption of caesium on clay minerals caused by various humic substances, *Journal of Environmental Radioactivity* 46, pp. 187-200, 1999.
- [9] Elfarissi F., Pefferkorn E.: Kaolinite/humic acid interaction in the presence of aluminium ion, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 168, pp. 1-12, 2000.
- [10] Kam S.K., Gregory J.: The interaction of humic substances with cationic polyelectrolytes, *Wat. Res.* Vol. 35, No. 15, pp. 3557-3566, 2001.
- [11] Melia C., Becker W., Au K.: Removal of humic substances by coagulation, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 40, No. 9, pp. 47-54, 1999.
- [12] Granops M., Kaleta J., *Woda, uzdatnianie i odnowa*, Wyd. SGGW Warszawa 2005.

## STUDY ON TREATMENT OF UNDERGROUND WATER CONTAINING NATURAL ORGANIC MATTER

### Summary

The paper presents a study related to modernization of water treatment station for the Tarnobrzeg town. The underground water used by the water intake there contains some organic matter, mainly humus compounds in complex combinations with compounds of iron and manganese. Potassium permanganate, lime, aluminum sulfate, iron sulfate and polyelectrolytes in various options were used as reagents in coagulation process tests conducted under the study. They served as the basis for proposing an optimum water treatment process setup: aeration + oxidation with potassium permanganate + coagulation with the use of aluminum sulfate and poly-electrolyte added as supporting agent + alkalization + sedimentation + filtration.

Володимир Й. ЛАБАЙ<sup>1</sup>

## ЕНЕРГООЩАДНІ СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ ВИТРАТАМИ ПОВІТРЯ НА ВИПАРНИКУ І КОНДЕНСАТОРІ SPLIT- КОНДИЦІОНЕРІВ

### 1. ВСТУП

Холодильні машини, які застосовують в місцевих автономних кондиціонерах, потребують для зменшення енергозатрат вдосконалення, яке можливе з використанням сучасного методу термодинаміки – *ексергетичного* [1, 2, 3].

Ексергетичний аналіз дозволяє встановити максимальні термодинамічні можливості системи, визначити втрати ексергії в ній та обґрунтувати рекомендації з вдосконалення окремих її елементів.

Разом з тим автором помічено, що на значення ексергетичного ККД значний вплив має співвідношення між витратами повітря на випарнику і конденсаторі split-кондиціонерів.

Найдетальніше ексергетичний метод аналізу одноступеневих холодильних машин наведений в [1], який непристосований для холодильних машин місцевих автономних кондиціонерів, у яких випарник і конденсатор омиваються відповідним повітрям, а в контурі холодильної машини циркулює інший холодоагент. Також коротко цей метод аналізу висвітлений у [2, 3].

Тому автором розроблений ексергетичний метод аналізу роботи одноступеневих хладонових холодильних машин (*без ефективного охолодження компресора*) для місцевих автономних кондиціонерів, докладно описаний у роботах [4, 5, 6].

У цій методиці використана схема холодильної машини, яка наведена на рис. 1, *а*, і відповідно побудова процесів її роботи на *p, i*-діаграмі – на рис. 1, *б* та холодильний агент хладон-22 (R22) [7]. Розрахунки проводились за допомогою розробленої автором комп'ютерної програми Excel.

### 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Мета роботи – визначення ексергетичного ККД за різного співвідношення між витратами повітря на випарнику і конденсаторі split-кондиціонерів фірми «Sanyo». Для цього потрібно встановити:

---

<sup>1</sup>Доцент, к.т.н., Національний Університет “Львівська політехніка”, Львів, УКРАЇНА

- внутрішній температурний режим роботи холодильної машини split-кондиціонера, за якого стандартна і робоча холодопродуктивності кондиціонера будуть однакові за стандартного зовнішнього температурного режиму;
- оптимальні енергоощадні співвідношення між витратами повітря на випарнику і конденсаторі split-кондиціонерів, для яких будуть відносно високі ексергетичні ККД.

Для цього спочатку ексергетичний аналіз роботи холодильних машин для split-кондиціонерів фірми „Sanyo” провели за стандартного зовнішнього температурного режиму, для якого стандартна холодопродуктивність  $Q_X^{CT}$ , Вт; стандартна споживана потужність  $N_{СП}^{CT}$ , Вт; стандартне випадання конденсату на випарнику  $W_{КОНД}^{CT}$ , л/ГОД; стандартна (встановлена) витрата повітря у випарнику  $L_{ВИП}^{CT}$ , м<sup>3</sup>/ГОД; стандартна (встановлена) витрата повітря у конденсаторі  $L_K^{CT}$ , м<sup>3</sup>/ГОД [6, 9].

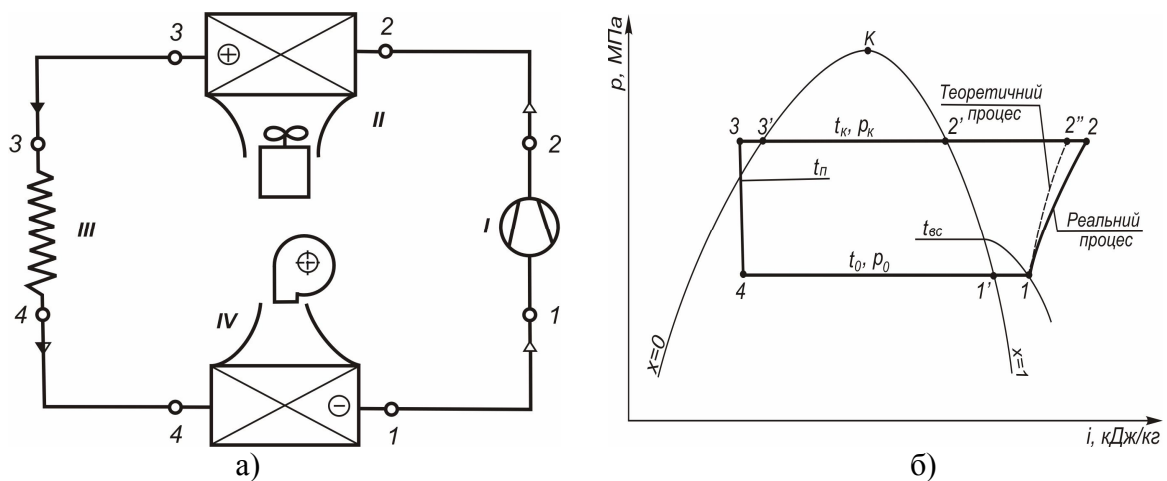


Рис. 1. Принципова схема холодильної машини (а)  
та побудова процесів її роботи на  $p, i$ -діаграмі (б):

I – компресор; II – конденсатор; III – капілярна трубка (дрозель); IV – випарник;  
1, 2, 3, 4 – характерні точки термодинамічного циклу

Після цього на кожному тому самому split-кондиціонері послідовно змінювали витрату повітря на випарнику  $L_{ВИП}$ , м<sup>3</sup>/ГОД, і відповідно на конденсаторі  $L_K$ , м<sup>3</sup>/ГОД, так, щоб стандартна і робоча холодопродуктивності кондиціонера співпадали і для цих випадків встановлювали внутрішній температурний режим роботи холодильної машини split-кондиціонера та відповідний ексергетичний ККД.

Дослідження проводили за таких умов:

- стандартної температури навколишнього середовища (зовнішнього повітря)  $t_{H1} = 35^\circ\text{C}$ ;
- стандартної температури внутрішнього (рециркуляційного) повітря відповідно до температури навколишнього середовища  $t_{C1} = 27^\circ\text{C}$ ;
- кінцевої різниці температур у випарнику (внутрішнього повітря на виході з випарника і киплячого холодильного агента)  $\Delta t_{ВИП} = 2,8^\circ\text{C}$ ;
- кінцевої різниці температур у конденсаторі (холодильного агента, який конденсується, і зовнішнього повітря на виході з конденсатора)  $\Delta t_K = 4,2^\circ\text{C}$ ;

- різниці температур перегрівання у випарнику  $\Delta t_{\text{перегр}} = 10^\circ\text{C}$ ;
- різниці температур переохолодження у конденсаторі  $\Delta t_{\text{переох}} = 5^\circ\text{C}$ ;
- внутрішнього відносного (індикаторного) ККД компресора  $\eta_i = 0,8$ ;
- електромеханічного ККД компресора  $\eta_{\text{ем}} = 0,9$ .

Стандартний зовнішній температурний режим для split-кондиціонерів визначається стандартною температурою навколишнього середовища (зовнішнього повітря) ( $t_{H1} = 35^\circ\text{C}$ ) і стандартною температурою внутрішнього (рециркуляційного) повітря відповідно до температури навколишнього середовища ( $t_{C1} = 27^\circ\text{C}$ ) і для всіх розрахунків був однаковий.

Внутрішній температурний режим роботи холодильної машини split-кондиціонерів визначався так:

- температура випаровування рідкого холодоагенту у випарнику

$$t_{1'} = t_4 = t_0 = t_{\text{вип}} = t_{C1} - \Delta t_{\text{вип}} - \frac{(0,01 \cdot Q_x - 7,1 \cdot W_{\text{конд}}) \cdot (273 + t_{C1})}{L_{\text{вип}}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (1)$$

- температура всмоктування пари холодоагенту в компресор

$$t_1 = t_{\text{вс}} = t_{\text{вип}} + \Delta t_{\text{перегр}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2)$$

- температура конденсації пари холодоагенту у конденсаторі

$$t_{2'} = t_{3'} = t_{\text{к}} = t_{H1} + \Delta t_{\text{к}} + \frac{(0,01 \cdot Q_x + 0,009 \cdot N_{\text{сп}}) \cdot (273 + t_{H1})}{L_{\text{к}}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3)$$

- температура переохолодження рідкого холодоагенту в конденсаторі

$$t_3 = t_{\text{п}} = t_{\text{к}} - \Delta t_{\text{переох}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Робочі холодопродуктивність, споживану потужність та випадання конденсату у випарнику визначали за формулами [8]:

$$Q_x^{\text{роб}} = Q_x^{\text{ст}} \cdot \left[ 1 + (t_{\text{вип}}^{\text{роб}} - t_{\text{вип}}^{\text{ст}}) \cdot 0,035 + (t_{\text{к}}^{\text{ст}} - t_{\text{к}}^{\text{роб}}) \cdot 0,02 \right], \text{ Вт}; \quad (5)$$

$$N_{\text{сп}}^{\text{роб}} = N_{\text{сп}}^{\text{ст}} \cdot \left[ 1 + (t_{\text{вип}}^{\text{роб}} - t_{\text{вип}}^{\text{ст}}) \cdot 0,035 + (t_{\text{к}}^{\text{ст}} - t_{\text{к}}^{\text{роб}}) \cdot 0,02 \right], \text{ Вт}; \quad (6)$$

$$W_{\text{конд}}^{\text{роб}} = W_{\text{конд}}^{\text{ст}} \cdot \left[ 1 + (t_{\text{вип}}^{\text{ст}} - t_{\text{вип}}^{\text{роб}}) \cdot 0,035 \right], \text{ л/год}, \quad (7)$$

де  $t_{\text{вип}}^{\text{ст}}$  і  $t_{\text{к}}^{\text{ст}}$  – відповідно, температура випаровування та температура конденсації за  $L_{\text{вип}}^{\text{ст}}$ , м<sup>3</sup>/год, і  $L_{\text{к}}^{\text{ст}}$ , м<sup>3</sup>/год.

Результати розрахунків наведені у табл. 1 (звичайно відзначені технічні характеристики кондиціонерів за стандартних умов і витрат повітря на випарнику і

конденсаторі, **жирно** – за стандартних умов і для запропонованих витрат повітря на випарнику і конденсаторі), де  $\eta_e$  – ексергетичний ККД кондиціонера;  $\Delta_{зр}$  – відсоток зростання ексергетичного ККД завдяки енергоощадному співвідношенню між витратами повітря на випарнику і конденсаторі, %.

Встановлена загальна залежність ексергетичного ККД split-кондиціонерів фірми «Sanyo»  $\eta_e$  від витрати повітря на випарнику  $L_{вип}$  і конденсаторі  $L_k$ , яка апроксимована формулою:

$$\eta_e = A + B \cdot L_{вип}^{-1} - C \cdot L_k^{-1} \quad (8)$$

і залежність витрати повітря на конденсаторі кондиціонерів  $L_k$  від витрати повітря на випарнику  $L_{вип}$ , яка апроксимована формулою:

$$L_k = \frac{1}{K - M \cdot L_{вип}^{-1}}, \text{ м}^3/\text{ГОД}. \quad (9)$$

Коефіцієнти  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $K$  і  $M$ , які входять відповідно у формули (8) і (9), залежно від стандартної холодопродуктивності split-кондиціонерів фірми «Sanyo» наведені у табл. 2.

Таблиця.1. Результати розрахунку ексергетичного ККД та знаходження співвідношення між витратами повітря на випарнику і конденсаторі для split-кондиціонерів фірми «Sanyo» зі стандартною холодопродуктивністю за стандартних зовнішніх температурних умов

$Q_x$ , Вт	$N_{сп}$ , Вт	$W_{конд}$ , л/ГОД	$L_{вип}$ , м <sup>3</sup> /ГОД	$L_k$ , м <sup>3</sup> /ГОД	$t_{вип}$ , °C	$t_k$ , °C	$\eta_e$	$\Delta_{зр}$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2020	610	0,90	450	1360	15,0	45,0	0,2493	-
<b>2021</b>	<b>610</b>	<b>0,96</b>	<b>375</b>	<b>3100</b>	<b>13,2</b>	<b>41,8</b>	<b>0,2830</b>	<b>13,5</b>
2600	950	1,10	450	1420	12,1	46,7	0,2354	-
<b>2600</b>	<b>950</b>	<b>1,19</b>	<b>375</b>	<b>3310</b>	<b>9,6</b>	<b>42,4</b>	<b>0,2738</b>	<b>16,3</b>
3450	1250	1,50	470	1500	9,0	48,6	0,2223	-
<b>3450</b>	<b>1250</b>	<b>1,64</b>	<b>400</b>	<b>3000</b>	<b>6,3</b>	<b>43,9</b>	<b>0,2586</b>	<b>16,3</b>
5150	2060	2,70	800	2040	12,1	49,8	0,2119	-
<b>5150</b>	<b>2060</b>	<b>2,97</b>	<b>650</b>	<b>3810</b>	<b>9,3</b>	<b>44,9</b>	<b>0,2512</b>	<b>18,5</b>
8790	3280	5,0	1380	3000	12,8	51,3	0,2010	-
<b>8791</b>	<b>3280</b>	<b>5,51</b>	<b>1100</b>	<b>5142</b>	<b>9,9</b>	<b>46,2</b>	<b>0,2398</b>	<b>19,3</b>

Таблиця 2. Коефіцієнти  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $K$  і  $M$ , які входять відповідно у формули (8) і (9)

$Q_x^{ст}$ , Вт	$A$	$B$	$C$	$K$	$M$
1	2	3	4	5	6
2020	0,3071	1,25	82,53	0,002753	0,910
2600	0,2977	2,02	94,90	0,002700	0,900

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6
3450	0,2858	3,22	105,6	0,002554	0,888
5150	0,2877	7,36	173,4	0,001474	0,787
8790	0,2774	15,65	263,1	0,000885	0,760



### 3. ВИСНОВКИ

Аналізуючи отримані результати, можна дійти таких висновків. Встановлена залежність ексергетичного ККД split-кондиціонерів фірми «Sanyo» різної холодопродуктивності від 2020 до 8790 Вт від витрати повітря на випарнику і конденсаторі. Зростання витрати повітря на випарнику кондиціонера веде до зменшення ексергетичного ККД, а зростання витрати повітря на конденсаторі кондиціонера – до його зростання. Розроблено методику визначення співвідношення між витратами повітря на випарнику і конденсаторі для split-кондиціонерів. Отримані співвідношення між витратами повітря на випарнику і конденсаторі для split-кондиціонерів фірми «Sanyo» холодопродуктивністю від 2020 до 8790 Вт. Запропоновані енергоощадні співвідношення між витратами повітря на випарнику  $L_{\text{вип}}$  і конденсаторі  $L_{\text{к}}$  для split-кондиціонерів фірми «Sanyo» холодопродуктивністю 2020 до 8790 Вт за інших стандартних умов, для яких ексергетичний ККД зростає на відповідно від 13,5 до 19,3%.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: – Учеб. пособие для вузов. 2-е изд. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.
- [2] Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. Перевод с польского под ред. В.М. Бродянского. – М.: Энергия, 1968. – 280 с.
- [3] Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие / Под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. АН УССР. Ин-т технической теплофизики. – Киев: Наук. думка, 1991. – 360 с.
- [4] Лабай В.Й. Залежність ексергетичного ККД split-кондиціонерів від їх продуктивності за повітрям на випарнику і конденсаторі. // Науково-технічний збірник КНУБА „Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання”, вип. 10. – Київ, КНУБА, 2006, С. 80–88.
- [5] Лабай В.Й., Омельчук О.В. Залежність температурного режиму split-кондиціонерів від їх продуктивності за повітрям на випарнику і конденсаторі. // Вісник НУ „Львівська політехніка” № 561 „Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація”, 2006. – С. 20–25.
- [6] Лабай В.Й., Омельчук О.В. Ексергетична оцінка роботи місцевих автономних кондиціонерів”. // Науковий вісник: Збірник науково-технічних праць. – Львів: НЛТУ України. – 2005, вип. 15.3. – С. 262–266.
- [7] Богданов С.Н., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник, изд. 3-е. – М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с.
- [8] Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1985. – 367 с.
- [9] Sanyo, Technical data, W-Eoo Multi. G0900.

## **ENERGY SAVING CORRELATIONS FOR EXPENSES OF AIR FLOWS ON EVAPORATOR AND CONDENSER OF AIR SPLIT-CONDITIONERS**

### **Summary**

In this paper it was used the method of the exergetic analysis of one-step freon cooling engines of the local autonomous air conditioners. It was defined the correlation between air flows on the evaporator and the condenser for air split-conditioners.

Author has developed an exergetic method of analysis of work one-step freonic refrigeration machines (without effective cooling of compressor) of local autonomous conditioners. The chart of the indicated refrigeration machine and proper construction of processes of its work on p,i-diagram and refrigeration agent R22 is used in this method. Calculations were performed with the computer program Excell developed the author.

Ігор В. МЕЛЬНИК<sup>1</sup>  
Володимир М. СОРОХТЕЙ<sup>2</sup>

## **КОНСТРУЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ МОНОЛІТНИХ ПЛОСКИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЕРЕКРИТТІВ З ЕФЕКТИВНИМИ ВСТАВКАМИ**

**Ключові слова:** монолітні перекриття, ефективні вставки, зменшення власної ваги

### **1. ВСТУП**

В останні роки все ширше використовують монолітні плоскі залізобетонні перекриття, особливо в будівлях цивільного призначення (житло, офіси тощо). Спостерігається також тенденція до збільшення прольотів таких перекриттів і використання їх у торговельних і виставкових комплексах.

При прольотах 6...9 м товщина монолітних перекриттів становить ~ 20...30 см і лімітується, як показують перевірені статичні розрахунки на ЕОМ, загальними умовами жорсткості і тріщиностійкості. Власна вага таких перекриттів є значною і в 2...3 рази перевищує корисне експлуатаційне навантаження.

З метою зменшення власної ваги плоских монолітних залізобетонних перекриттів доцільно використовувати в них ефективні вставки як окремі вироби з відносно легких і дешевих матеріалів, які розташовують в середній частині перерізу і залишають у перекритті після його бетонування [1, 2].

В пошуку матеріалів для таких вставок були проведені дослідження на фрагментах перекриттів з трубчастими порожнистими і суцільними пінополістирольними вставками [3, 4].

Результати цих досліджень були враховані при конструюванні і виготовленні декількох плоских монолітних перекриттів з ефективними вставками різних розмірів, форм і схем, які описані нижче.

**Фрагменти монолітної залізобетонної плити з трубчастими вставками**

Вихідною теоретичною конструкцією для досліджень була прийнята залізобетонна монолітна плита з розмірами в плані 5×5 м (рис. 1а). Армування як для квадратної плити – однакове в обидвох напрямках з розташуванням арматури лише у нижній зоні. Розміри і конструкцію плити було прийнято з врахуванням наявних вставок – картонних труб зовнішнім діаметром 110 мм з товщиною стінки 10 мм, достатньою для сприйняття тиску бетонної суміші при бетонуванні дослідних зразків. Вставки – труби розташовані з кроком 139 мм, що при загальній висоті плити 17,8 см

<sup>1</sup>Доцент, к.т.н., Національний університет "Львівська політехніка", Львів, УКРАЇНА

<sup>2</sup>Аспірант, Національний університет "Львівська політехніка", Львів, УКРАЇНА

дало порожнистість 38,4%. З цієї плити умовно були «вирізані» дві взаємно перпендикулярні смуги (фрагменти) шириною 1 м, які були прийняті для подальшого виготовлення і досліджень. В результаті такого «вирізання» отримано два фрагменти плити однакових загальних розмірів (шириною 1 м, довжиною 5 м, висотою 178 мм), але різної конструкції (рис. 1).

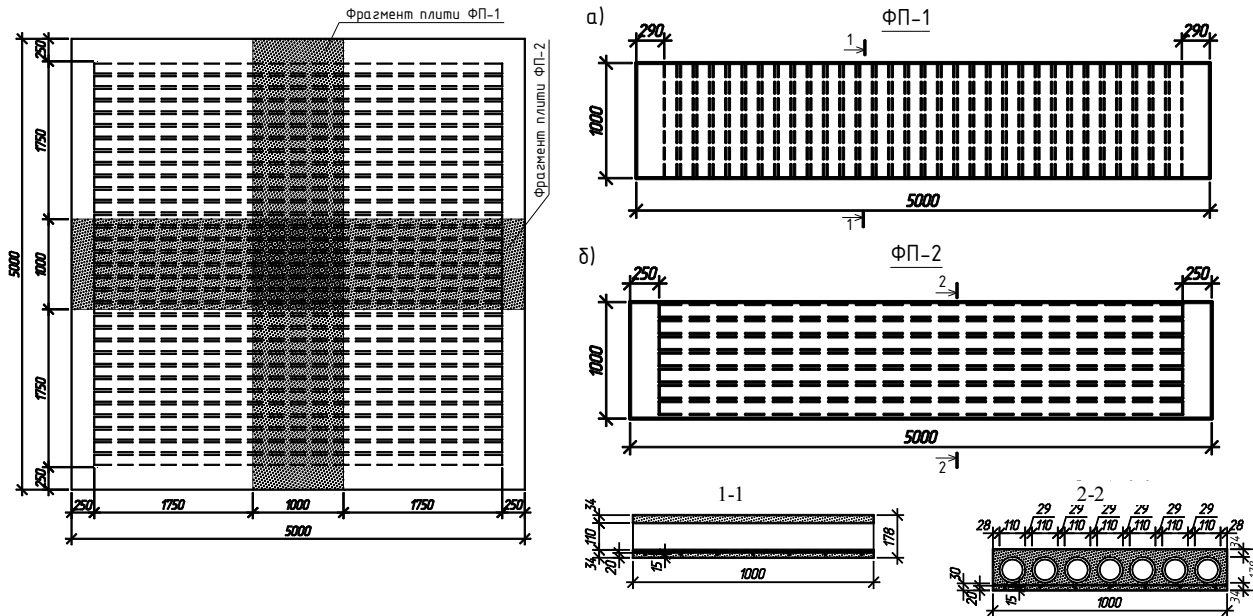


Рис. 1. План умовної плити (а) і конструкція (б) фрагментів плит ФП-1 і ФП-2

Фрагмент плити ФП-1 (надалі плита ФП-1) має поперечне розташування труб, торці яких виходять на бокові грані дослідного зразка (рис. 1а). У фрагменті плити ФП-2 (надалі плита ФП-2) порожнини розташовані у поздовжньому напрямі, аналогічно конструкції збірних порожнистих плит (рис. 1б).

Кожен фрагмент випробовували окремо як вільно обперту на всю ширину коротких сторін конструкцію з відстанню між осями опор 4,85 м. Навантажували дослідні зразки поетапно штучними вантажами, які рівномірно розкладали по всій площі плити.

Основні результати випробувань такі. Загальне руйнівне навантаження для плити ФП-1 склало 10,55 кН/м<sup>2</sup>, з врахуванням власної ваги плити – 13,28 кН/м<sup>2</sup>. Характер руйнування свідчив про те, що вичерпання міцності плити ФП-1 настало внаслідок зрізу бетону у верхній частині перерізу плити, ослабленого наскрізним отвором на всю ширину перерізу.

Плита ФП-2 при навантаженні 11,51 кН/м<sup>2</sup> не зруйнувалася, але мала значні прогини і з вимог техніки безпеки навантаження не збільшували. В такому завантаженому стані плита була залишена на добу, після чого в ній дещо збільшилися прогини, але руйнування не настало.

Таким чином, міцність залізобетонної плити при розташуванні трубчастих порожнин перпендикулярно її осі є значно меншою, ніж при розташуванні цих порожнин вздовж осі.

При розташуванні порожнин паралельно опорі небезпечним є можливість зрізу в перерізі ослабленому порожнинами. Детальне дослідження фрагментів плит подано в [4].

## 2. ПЛОСКЕ МОНОЛІТНЕ ЗАЛІЗОБЕТОННЕ ПЕРЕКРИТТЯ РОЗМІРАМИ В ПЛАНІ 7,6×12,1 М

При реконструкції колишньої промислової будівлі під торгово-готельний комплекс в с.м.т. В. Любінь Львівської області виникла потреба в заміні старого дерев'яного перекриття горищного поверху з колонами в середній частині на більш надійне без проміжних опор з надбудовою повноцінного поверху. З огляду на нерівномірне осідання в процесі довготривалої експлуатації і пошкодження мурованих стін, розташованих по периметру, було запропоноване монолітне залізобетонне перекриття, диск якого зв'язує між собою всі стіни. Конструктивне вирішення четвертини цього перекриття, симетричного в обох напрямках, подано на рис. 2.

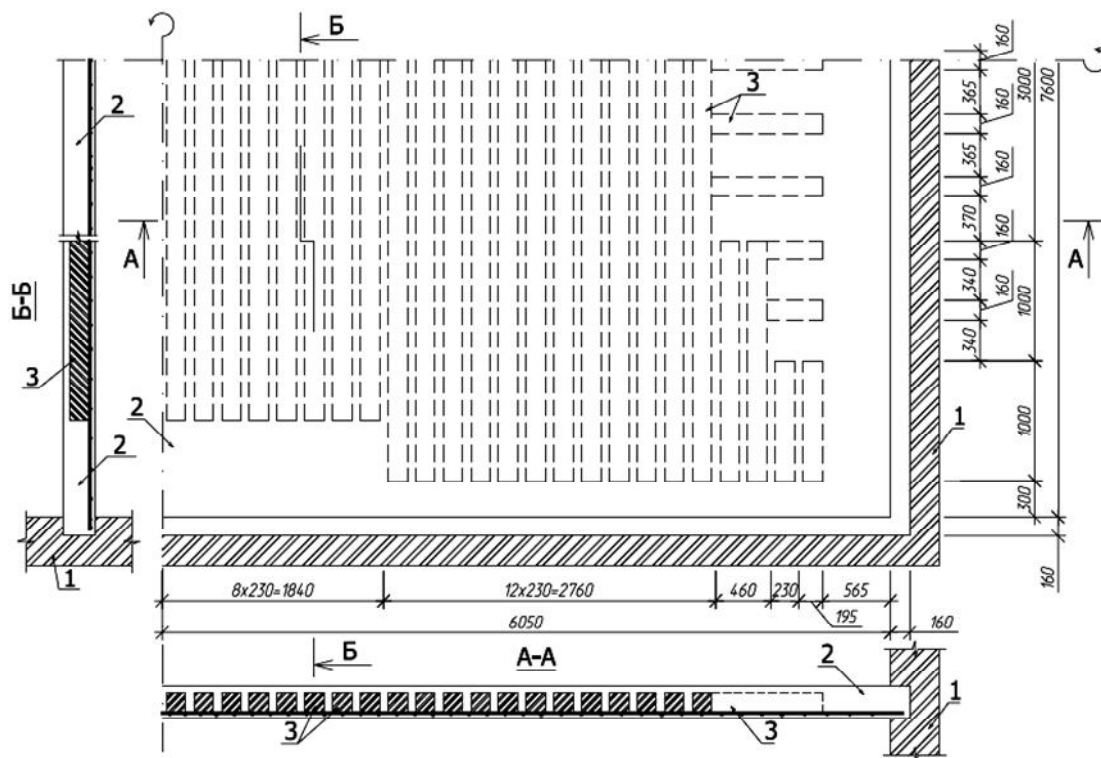


Рис. 2. Загальне конструктивне рішення перекриття:

1 – муровані стіни; 2 – монолітний залізобетон; 3 – вставки з пінопласту.

Конструювання перекриття прийнято на підставі статичних розрахунків, виконаних на ЕОМ. Загальна висота перерізу  $h = 260$  мм прийнята насамперед з умов жорсткості. В середній частині перекриття вставки з пінополістиролу розмірами перерізу  $160 \times 160$  мм розташовані в поперечному напрямі з відстанню між ними в плані 70 мм. В результаті у цьому напрямі маємо часторебристу конструкцію, в якій почергово розташовані вертикальні ребра і вставки (рис. 2, переріз А-А).

В поздовжньому напрямі конструкція перекриття, на відміну від поперечного, є неоднорідною: в межах ширини вставок маємо переріз з верхньою і нижньою полицями товщиною 50 мм, між вставками - суцільний залізобетонний переріз (рис.2, переріз Б-Б). Детальніше конструкцію описано в [5].

Для надійного анкерування арматури, розташованої в нижній частині плити, а також з метою забезпечення міцності похилих перерізів плити на приопорних ділянках, вставки не доводили до країв плити. Згідно з результатами статичного розрахунку,

найбільші значення поперечних сил маємо на середніх приопорних ділянках, тому на цих ділянках порожниноутворюючі вставки не доведені до стін в більшій мірі (рис.2). З огляду на меншу міцність перерізів плити на зріз в межах ширини вставок, на торцевих ділянках плити вставки були розташовані в напрямі, перпендикулярному до основного розташування вставок із значної ширини ділянками суцільного бетону між ними, в яких змонтували додаткову поздовжню верхню і поперечну арматуру. Верхня арматура також передбачена на кутових ділянках перекриття, на яких, згідно з результатами розрахунку, виникають розтягуючі напруження.

За рахунок вставок власна вага перекриття розмірами в плані  $7,6 \times 12,1$  м загальною висотою 260 мм зменшилась на 32,4 %.

Завантаження перекриття проводили з використанням попередньо зважених цеглин і піску. Детально методику його випробування подано в [5].

При нормативному навантаженні максимальне значення прогину, заміряне в середній частині, становило 4,7мм або  $1/1617$  і  $1/2574$  відповідно до прольоту плити в коротшому і довшому напрямі. Це свідчить про значну жорсткість плити з вставками та про можливість ще більшої її оптимізації. Разом з тим при випробуванні перекриття була виявлена така особливість його напружено-деформованого стану. Окремі прилади, які були розташовані зверху плити над порожнинами, особливо при високих рівнях навантаження, фіксували деформації не стискання (що, як відомо, є закономірним для верхніх волокон плитних елементів), а деформації розтягування. Очевидно, це пов'язано із складним напружено-деформованим станом перекриття у перерізах з вставками. Верхня полиця в цих перерізах зазнає двовісного стиску від загальної дії моментів у поперечному і поздовжньому напрямі і місцевої дії згинального моменту від

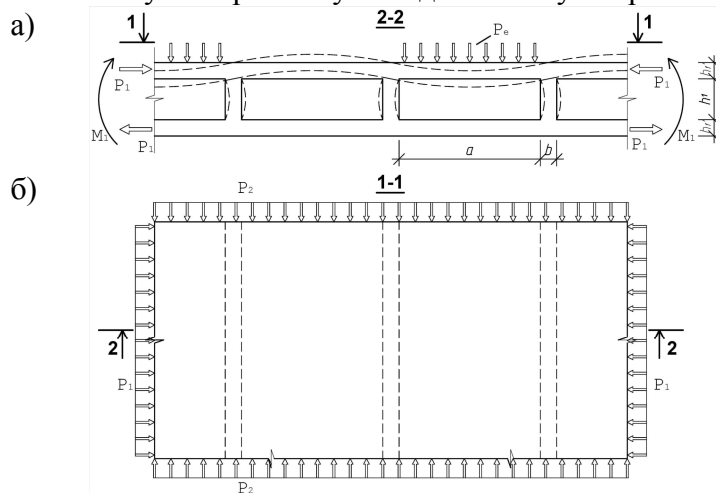


Рис. 3. Схема напружено-деформованого стану верхньої полиці перекриття у перерізах з вставками: а - місцевий переріз; б - план

прикладеного до перекриття рівномірно розподіленого навантаження. При відсутності на окремих ділянках місцевого навантаження полицю може вигнути з площини вгору, а при його наявності втрата стійкості може відбутися від прогинання верхньої полиці всередину (рис. 3). Можлива втрата стійкості верхньої полиці залежить від її прольоту  $a$ , товщини  $h'_f$ , товщини проміжних ребер  $b$ , величини навантаження  $p_e$ , стискаючих зусиль  $P_1$  і  $P_2$  тощо.

### 3. КРУГЛЕ МОНОЛІТНЕ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННЕ ПЕРЕКРИТТЯ РАДІУСОМ 9,1 М

При реконструкції будівлі ресторану "Супутник" у м. Львові необхідно було улаштувати нове горизонтальне перекриття під літній критий майданчик поверх існуючого конусного чашоподібного перекриття. В консольній частині меншого півкруга будівлі це суттєво збільшувало навантаження на колони і тому, з метою зменшення власної ваги перекриття загальною висотою 185 мм, були використані пакети пінопластових вставок загальною висотою 115 мм. Використання пінопластових

вставок значних розмірів в плані дозволило досягти порожнистості і відповідного зменшення витрати і ваги бетону 47,3%. Фрагмент перекриття і характерний переріз подано на рис. 4, детально конструкцію перекриття див. [5].

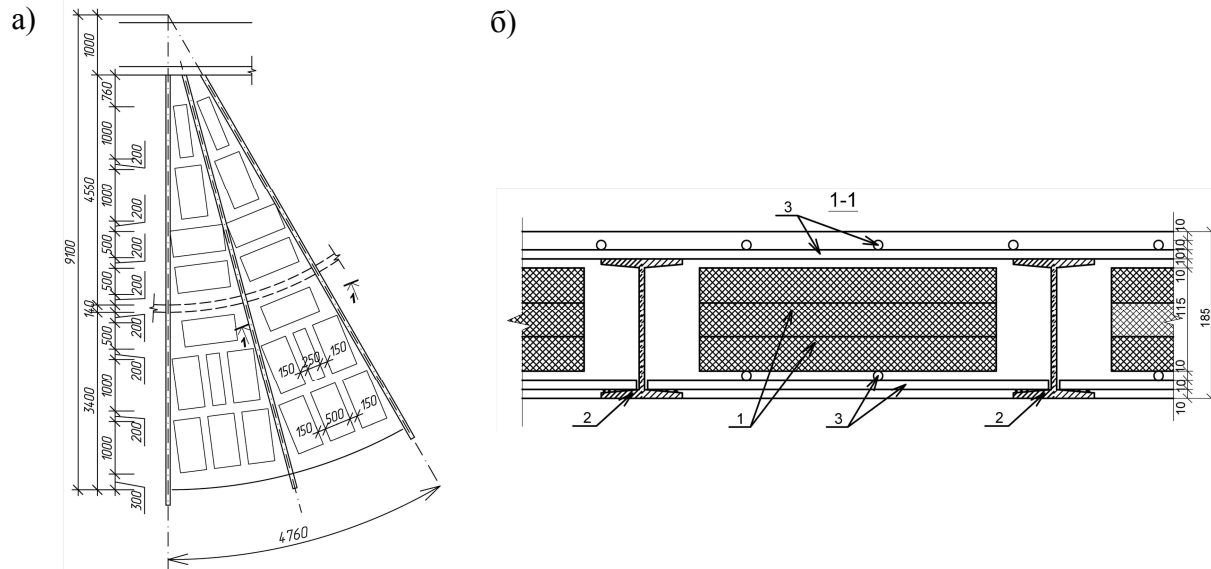


Рис. 4. Фрагмент (а) і місцевий переріз (б) круглого перекриття з пінопластовими вставками: 1 – пінопластові вставки; 2 – металеві балки; 3 - арматура

Напружено-деформований стан круглого перекриття у перерізі з вставками є складним: окрім загальної дії моментів у радіальному і коловому напрямках, маємо додаткову дію розтягуючи або стискаючих зусиль в цих напрямках і місцевий згин верхньої площі над порожнинами від прикладеного експлуатаційного навантаження. Точне описання такого НДС є складним. Тому при розрахунку і конструюванні плити в перерізах з вставками були використані приблизні методи.

#### 4. МОНОЛІТНЕ ПЛОСКЕ НЕРОЗРІЗНЕ ЗАЛІЗОБЕТОННЕ ПЕРЕКРИТТЯ

Інший досвід використання пінопластових вставок пов'язаний з реконструкцією будівлі оздоровчого комплексу санаторію у Свалявському районі Закарпатської області. Замість перекриття з дощатим настилом у середній частині мансардного поверху необхідно було улаштувати капітальне перекриття під повноцінний поверх.

Основні конструктивні елементи перекриття – металеві балки прольотом 12 м, що розташовані з кроком 6 м у поперечному напрямі приміщення розмірами в плані 11,7×24,4м (рис. 5). Балки прийняті з двох спарених двотаврів висотою 45 см, тобто навіть з конструктивних вимог висота балок є явно недостатньою при прольоті 12 м ( $h/l = 1/27$ ). Тому при реконструкції перевагу віддали монолітній залізобетонній плиті на середніх звільнених ділянках перекриття, яка за допомогою жорстких і гнучких анкерів конструктивно об'єднується з металевими балками, збільшуючи їх загальну робочу висоту до 80 см.

Висота монолітного перекриття прийнята такою ж, як і в збірних круглопустотних плитах – 22 см. Товщина верхньої і нижньої полиці 45 мм, проміжних вертикальних ребер – 70 мм (див. рис. 5).

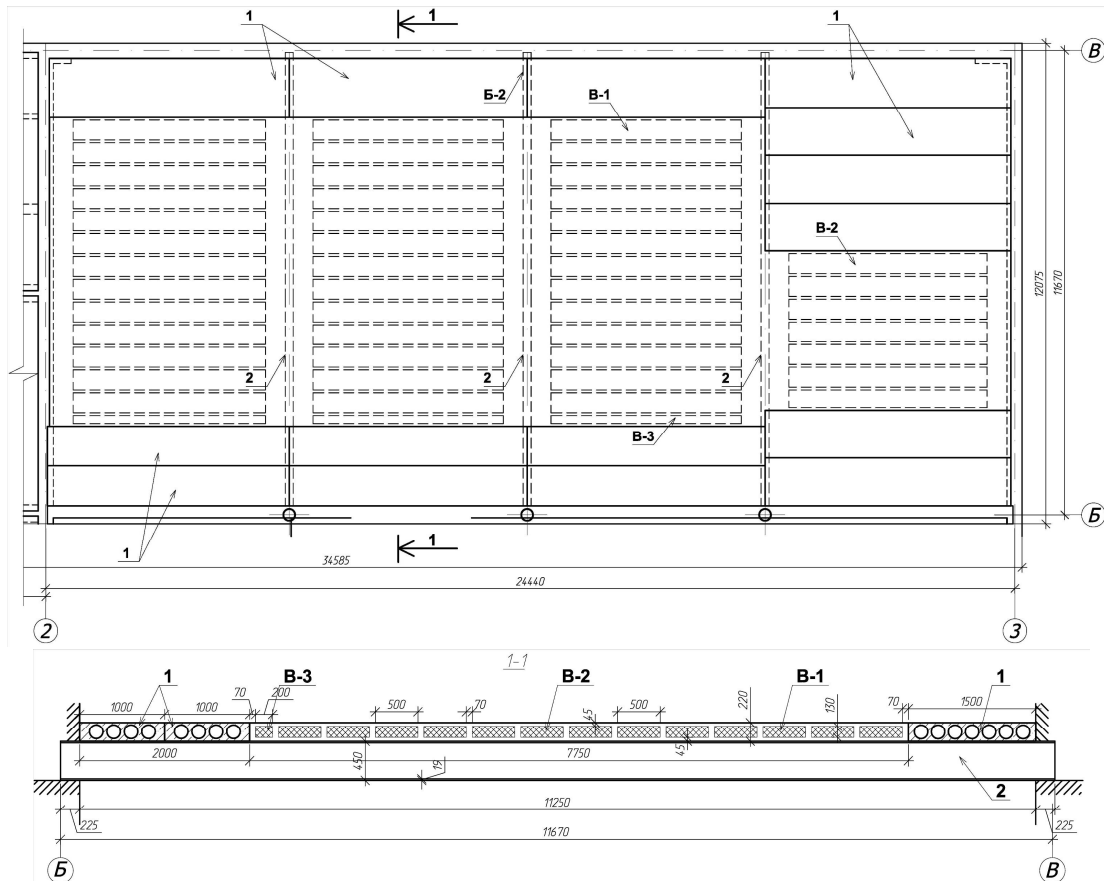


Рис. 5. Розташування вставок в плані (а) і в перерізі (б) перекриття: 1 – існуючі пустотні плити перекриття; 2 – металеві балки; 3 – пінопластові вставки, В-1 ... В-3 – марки вставок за типорозміром

На відміну від попередніх перекриттів, напружено-деформований стан цього перекриття є дещо простіший. Загалом, навіть з врахуванням нерозрізності, робота монолітного перекриття є аналогічною до роботи збірних залізобетонних порожнистих плит перекриття, тобто порожнини розташовані в одному напрямі – між балками. Проте, на відміну від круглопустотних збірних плит перекриття з стійким овальним обрисом над порожнинами, прямолінійний обрис нижньої грані полиці над вставкою в монолітному перекритті має значний проліт (у даному конструктивному вирішенні 500 мм), що від прикладеного зверху експлуатаційного навантаження може призвести до втрати стійкості як в поперечному напрямі, так і в поздовжньому від спільної дії місцевого і загального згинальних моментів.

Тому конструювати і армувати верхні полиці плити необхідно з врахуванням спільної дії цих силових факторів і особливостей напружено-деформованого стану, що виникає при цьому.

## 5. ОСНОВНІ ВИДИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ПОРОЖНИНАМИ

Як бачимо з розглянутих вище експериментальних бетонних і залізобетонних конструкцій та натурних випробувань окремих з них, в перерізах з порожнинами виникає складний напружено-деформований стан, який залежить від типу конструктивного елемента, загальної розрахункової статичної схеми, розмірів перерізу, прикладеного місцевого навантаження тощо.



Загалом основні види НДС елементів в перерізах з порожнинами можна привести до таких розрахункових схем.

Якщо плита перекриття працює в 2-х напрямках від загальної дії моментів, у полиці над порожниною виникає двоосьовий НДС від стискаючих напружень  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$  (рис. 6а). Це найпростіший плоский двоосьовий напружений стан. У перекриттях складної конфігурації в плані (наприклад, круглих) можлива спільна дія стискаючих і розтягуючих напружень (рис. 6б).

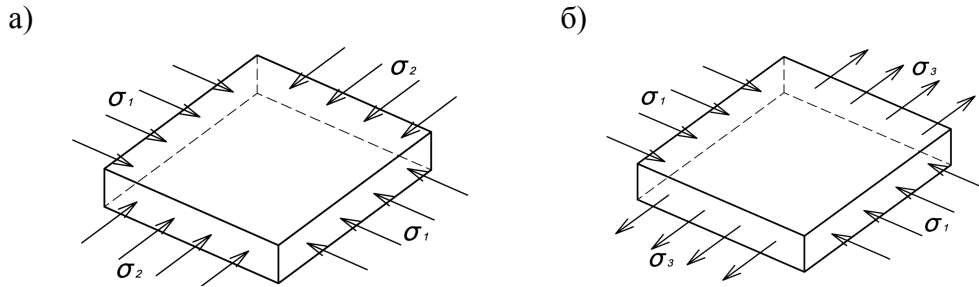


Рис. 6 Напружено-деформований стан елементів при дії стискаючих сил: а – при двоосьовому стиску; б – при двоосьовому розтягу і стиску

При місцевій дії навантаження в полицях перекриттів з порожнинами додатково виникає місцевий згин, напруження від якого накладаються з загальними напруженнями перекриття. В залежності від загальних і місцевих умов роботи перекриття окремі можливі схеми НДС подані на рис.7. В принципі в реальних конструкціях з порожнинами (вставками) можливе також і інше поєднання загальних та місцевих силових факторів.

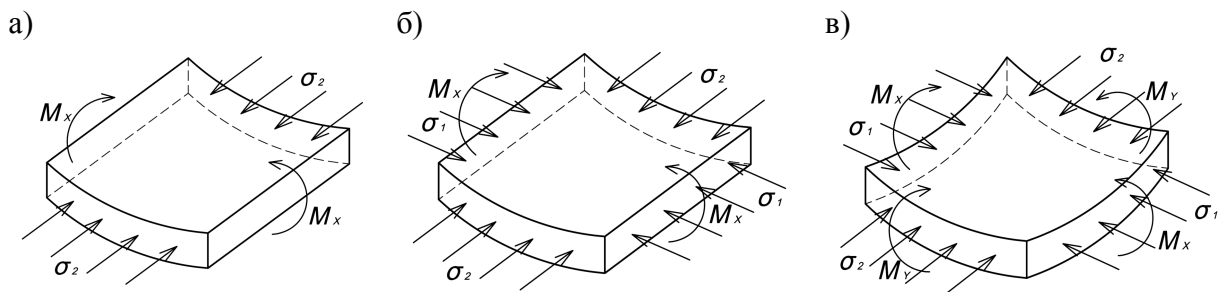


Рис. 7 Напружено-деформований стан елементів при спільній дії осьових сил і моментів: а – при дії моментів і осьових сил у різних площинах; б – при дії осьових сил і моментів в одній площині; в – при дії осьових сил і моментів у двох площинах

Додатковим силовим і відповідно ускладнюючим для НДС фактором у перерізах з порожнинами є поперечна зрізаюча сила, що характерно насамперед для приопорних ділянок монолітних залізобетонних плит перекриття. Можливість і небезпеку раптового руйнування від такого силового впливу засвідчили випробування фрагментів перекриття з трубчастими вставками (див. вище) [5]. Схема руйнування, що відповідає такому НДС, подана на рис. 8а. При прямокутному обрисі порожнини напружено-деформований стан порожнинного перерізу ускладнюється дією місцевого моменту  $M_1$  (рис. 8б).

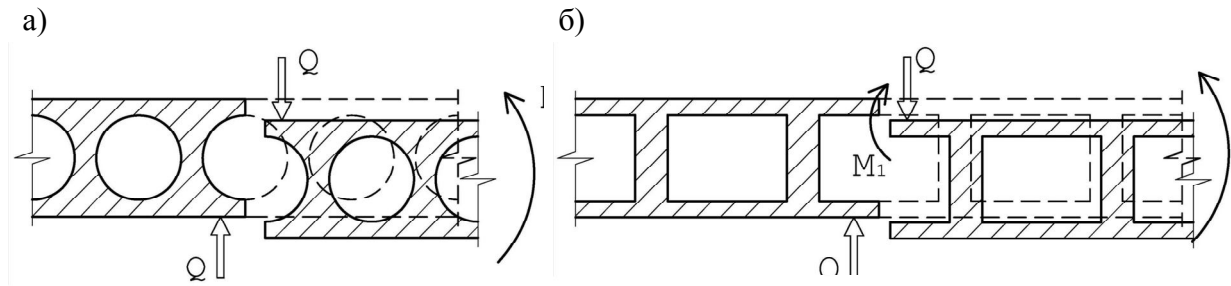


Рис. 8. Схема руйнування порожнистих перерізів від дії зрізаючих сил:  
а) круглої конфігурації; б) прямокутної конфігурації

Розташуванням самих вставок і їх розмірами можна регулювати несучу спроможність конструкції і добиватися приблизно однакових значень міцності нормальних (від переважаючої дії  $M$ ) і похилих (від переважаючої дії  $Q$ ) перерізів. Показовими у цьому відношенні є експериментальні дослідження, проведені Передерієнком І.Д. з тришаровими плитними елементами [6]. В одному з варіантів для більшого облегшення плит використовували гіпсові П-подібні коробки. Квадратні в плані вільно оперті плити розмірами  $5,3 \times 5,3$  м з коробами, розміщеними в одному напрямку, руйнувалися по похилих перерізах задовго (66,5%) до вичерпання міцності нормальних перерізів. При більш раціональному розташуванні коробів (по діагоналях) несуча спроможність нормальних перерізів була використана повністю – плита зруйнувалась від дії моменту, а не поперечної сили. Отже, формоутворенням зсередини можна конструювати залізобетонні елементи з майже однаковою несучою спроможністю нормальних і похилих перерізів при незмінних загальних габаритних розмірах.

Очевидно, що для забезпечення кращої стійкості верхньої полиці залізобетонних плит перекриття порожнинам доцільно надати вгорі склепінчастого обрису, особливо при значному поперечному розмірі порожнин. У цьому випадку, на відміну від прямокутної порожнини, можна не передбачати армування полиці при практично однаковій площі порожнин (рис. 9).

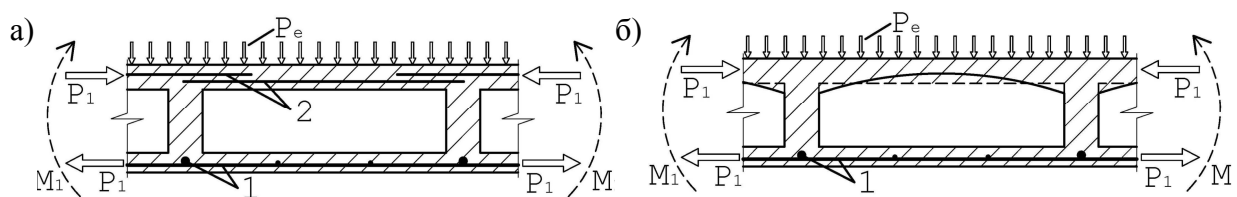


Рис.9. Дія загально і місцевого силових факторів на рівновеликі за площею порожнин перерізи з прямокутними (а) і склепінчастими (б) обриси:  
1 – нижня арматура; 2 – верхня арматура

Проте напружено-деформований стан перерізу із змінними по висоті порожнинами є складнішим порівняно з перерізом з прямокутними незмінними по висоті порожнинами, особливо при спільній дії загальних і місцевих силових факторів в обидвох напрямках.

Як бачимо, проблема ефективного у конструктивному відношенні порожниноутворення пов'язана з моделюванням складного НДС, який залежить від багатьох чинників: силових факторів, геометричних, міцнісних і деформаційних

характеристик матеріалів тощо. Додатковим ускладнюючим фактором є те, що бетон є не пружним, а пружно-пластичним матеріалом, особливо при високих рівнях напружень.

Експериментально-теоретичні дослідження, що проводяться в НУ «Львівська політехніка», дозволять більш точно описати різні типи складних напружено-деформованих станів в перерізах з вставками і досягти ще більшого зменшення власної ваги монолітних перекриттів при одночасному забезпеченні їх надійності.

Паралельно проводиться пошук і дослідження ефективних вставок з різних матеріалів та їх взаємодії з бетоном.

Монолітні залізобетонні перекриття з полегшуючими ефективними вставками є дуже доцільними в будівлях на сейсмічно активних територіях. Вони мають суттєво (до 35...50%) зменшену власну вагу і водночас зберігають загалом суцільний диск перекриття.

Отже, проблему порожниоутворення необхідно розглядати в комплексі з розвитком методів проектування і вдосконаленням теорії розрахунку таких ефективних елементів. При цьому як теоретичні так і експериментальні дослідження повинні проводитись, виходячи з реальних потреб практики.

## 6. ВИСНОВКИ

1. Плоскі монолітні залізобетонні перекриття з ефективними вставками у перерізах мають складний напружено-деформований стан, який залежить від багатьох чинників.
2. Конфігурацію, розміри і розташування вставок слід приймати з врахуванням загального статичного розрахунку монолітних плоских залізобетонних перекриттів, у яких формоутворенням зсередини можна забезпечити практично однакові значення міцності нормальних і похилих перерізів.
3. Проблему оптимізації бетонних і залізобетонних конструкцій порожниоутворюванням необхідно розглядати в комплексі з розвитком методів проектування і вдосконаленням теорії їх розрахунку.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Мельник І.В. Спосіб виготовлення пустотілих бетонних і залізобетонних виробів / Деклараційний патент на винахід. - Державний департамент інтелектуальної власності. Бюл. №7-ІІ від 15.12.2000р.
- [2] Мельник І.В. Оптимізація залізобетонних конструкцій з допомогою ефективних вставок // Проблеми теорії і практики будівництва: Збірник наукових статей, том ІV, Львів, 1997- С.89-90.
- [3] Підбір складу і дослідження в лабораторних умовах легкого конструктивного матеріалу на основі відпадків промисловості // Технічна інформація з науково-дослідні роботи по темі № 5656 - Львів, ДУ "Львівська політехніка" 1994.
- [4] Мельник І.В., Сорохтей В.М. Конструктивні рішення плоских монолітних залізобетонних перекриттів з ефективними вставками і експериментальне дослідження їх фрагментів // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць, вип. 14 - Рівне 2006 р., С. 253-260.
- [5] Мельник І.В., Царинник О.Ю., Сорохтей В.М. Конструювання і дослідження плоских монолітних перекриттів з ефективними вставками// Будівельні конструкції: Міжвідомчий наук.-техн. зб., вип. 67 - Київ, НДІБК, 2007 С. 794...801.

- [6] Передериенко И.Д. Экпериментальное исследование трехслойных шлакожелезобетонных изгибаемых элементов с обычным армированием // Дисс.на соиск. уч. ст. к.т.н. - Львов, 1958.

## SHAPE AND RESEARCH OF MONOLITHIC FLAT REINFORCED-CONCRETE SLABS WITH EFFECTIVE HOLLOW BLOCKS

### Summary

In last years all wider monolithic flat reinforced-concrete slabs, especially in building engineering (habitation, offices and others) are used. There is also a tendency to the increase of such slabs and use them in commercial and exhibition complexes.

The flights of the monolithic slabs are 6 to 9m, and limited by thickness 20 to 30cm. Checking the static calculations show the limit, by the general conditions of deformation and crack resistance. Own weight of such slabs is considerable and 2 to 3 times exceeds an actual useful load.

With the purpose of diminishing own weight of flat monolithic reinforced-concrete slabs it is expedient to put in them effective insertions from relation to easy and cheap materials, dispose in middle part a cut and abandon in slab after his concreting.

In the search of materials for such insertions were performed tests on the fragments of slabs from pipes by hollow and continuous expanded polystyrene insertions. Results of which are given in previous publications.

The results of these researches were taken into account at design and making of a few flat monolithic slabs with the effective insertions of different sizes, forms and charts:

- rectangular sizes in the plan of 7,6×12,1m in the Lviv area, Ukraine (diminishing of own weight of slab 32%);
- round the radius of 9,1m with intermediate radial metallic beams in m. Lviv (diminishing of own weight of slab 47%);
- rectangular uncut sizes in the plan of 12×24m with intermediate metallic beams with the step of 6m in the Zakarpatskiy area, Ukraine (diminishing of own weight of slab 49%);
- collapsible-monolithic sizes in the plan of 12×24m in the Zakarpatskiy area, Ukraine (diminishing of own weight of slab 52%).

Test of fragments of the flat monolithic slabs and model slab sizes to 7,6×12,1 static the features of the tensely deformed state of different type found out loading in cuts with insertions, that it is necessary to take into account at checking calculations and constructing of such ceilings.

General static chart of work of slab, form and sizes of insertions it can be simple and difficult uni- and the biaxial tensely deformed state, entailed to combination of general and local (in cuts with insertions) power factors.

Monolithic reinforced-concrete slabs with effective insertions are very useful in buildings on seismically active territories. They have substantially (to 35...50%) diminished dead weight and at the same time keep the continuous disk of slab as whole.

Piotr NAZARKO<sup>1</sup>  
Michał JUREK<sup>2</sup>  
Leonard ZIEMIAŃSKI<sup>3</sup>

## **FALE SPRĘŻYSTE W BADANIACH KONSTRUKCJI: I. PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW**

### **1. WPROWADZENIE**

Wykorzystanie zjawiska propagacji fal sprężystych do badań konstrukcji oraz monitorowania ich stanu cieszy się w ostatnich latach bardzo dużym zainteresowaniem [1-6]. Za pomocą fal sprężystych wykrywać można zarówno uszkodzenia zewnętrzne, jak i wady wewnętrzne, niewidoczne podczas inspekcji wizualnych lub znajdujące się w miejscach niedostępnych. Zastosowanie technologii przetworników piezoelektrycznych do wymuszania i rejestrowania propagujących w konstrukcji fal sprężystych, a także miniaturyzacja układów elektronicznych, umożliwiają integrację systemów pomiarowych z monitorowaną konstrukcją. Prowadzić to może w rezultacie do autonomicznych systemów diagnostycznych pracujących w czasie rzeczywistym i dostarczających informacji o aktualnym stanie konstrukcji lub nawet pozostałym czasie bezpiecznego użytkowania. Takie rozwiązanie skraca czas inspekcji, pozwala zaplanować naprawy, wprowadzać ograniczenia lub wyłączenia z użytkowania, a co za tym idzie, zwiększyć bezpieczeństwo i niezawodność monitorowanej konstrukcji.

### **2. ANALIZA FAL SPRĘŻYSTYCH**

Analiza sygnałów fal sprężystych w zadaniach wykrywania uszkodzeń polega na wyznaczeniu parametrów fali oraz porównaniu ich zmian w kolejnych etapach wzrostu uszkodzenia. Zakładając występowanie pewnych zmian rozchodzących się w konstrukcji fal, np. na skutek odbić od brzegów elementów, połączeń, pęknięć, itp., analiza takich sygnałów w układach złożonych może być dosyć trudna. Konieczne jest wówczas zastosowanie zaawansowanych technik przetwarzania sygnałów, które umożliwiają wyodrębnienie parametrów sygnałów czułych na pojawienie się i wzrost uszkodzenia.

#### **2.1 Filtracja sygnałów**

W pierwszym etapie przetwarzania sygnałów wykorzystane zostały filtry falkowe oraz filtry cyfrowe. Zadaniem pierwszego z nich jest ograniczenie wysokoczęstotliwościowych

<sup>1</sup>Dr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, POLSKA

<sup>2</sup>Mgr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, POLSKA

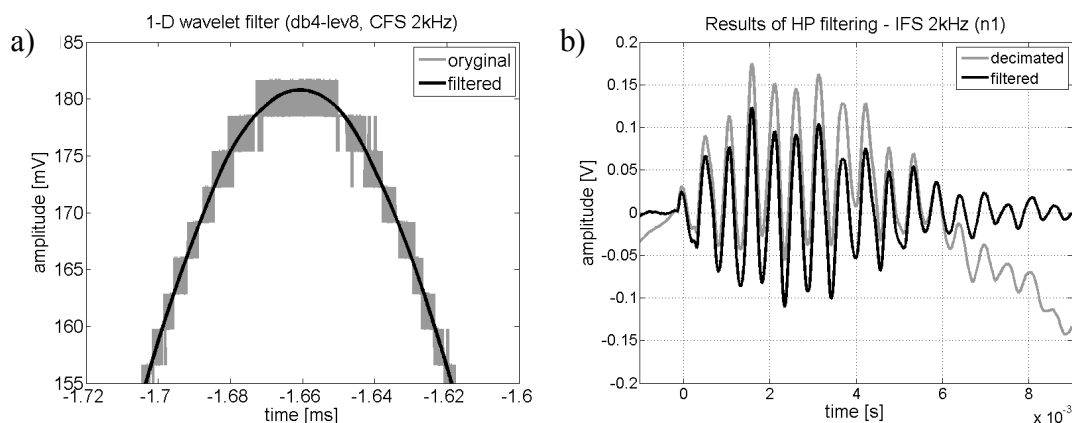
<sup>3</sup>Prof. dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, POLSKA

składników sygnału. Filtr ten bazuje na dekompozycji sygnału i odrzuceniu jego szczegółów, aż do założonego poziomu rozkładu  $n$ . Wymaga to określenia poziomu dekompozycji, wartości progowej odrzucanych współczynników falkowych oraz dobrania funkcji bazowej (falki matki). Dobór ten podyktowany jest zwykle kształtem, który najbardziej odpowiada zaburzeniu wprowadzanemu do konstrukcji. Podobieństwo takie skutkuje dużymi wartościami współczynników falkowych, jeśli w sygnale występują fragmenty zbliżone kształtem do falki bazowej. W wyniku przeprowadzonej analizy za falki bazowe przyjęto rodzinę *daubechies*, a do dalszych badań wykorzystano falki typu *db4*.

Aby dobrać odpowiedni poziom dekompozycji Falkowej, konieczne było wyznaczenie pseudo częstotliwości falek [7] na każdym z założonych poziomów dekompozycji. Jest to także niezbędne podczas analizy falkowej sygnałów i ustalania rozdzielczości rozkładu (zakresu wartości współczynników skali). Na tej podstawie przyjęto poziom dekompozycji od 8 do 10, w zależności od częstotliwości wymuszenia rejestrowanych przebiegów fal sprężystych.

Do wykonania procedury dekompozycji i odszumiania sygnału posłużono się funkcją *wden* pakietu Matlab. Za optymalny poziom progu przyjęto wartość  $\sqrt{2 \log(N)}$ , gdzie  $N$  jest rozmiarem próbki, zakładając równocześnie globalną jego wartość (brak przeskalowywania). Aby uzyskać możliwie gładkie przebiegi wybrano regułę miękkiego progowania [8]. Przykładowy wynik zastosowania filtrów falkowych w odniesieniu do sygnału źródłowego pokazany został na Rys. 1a.

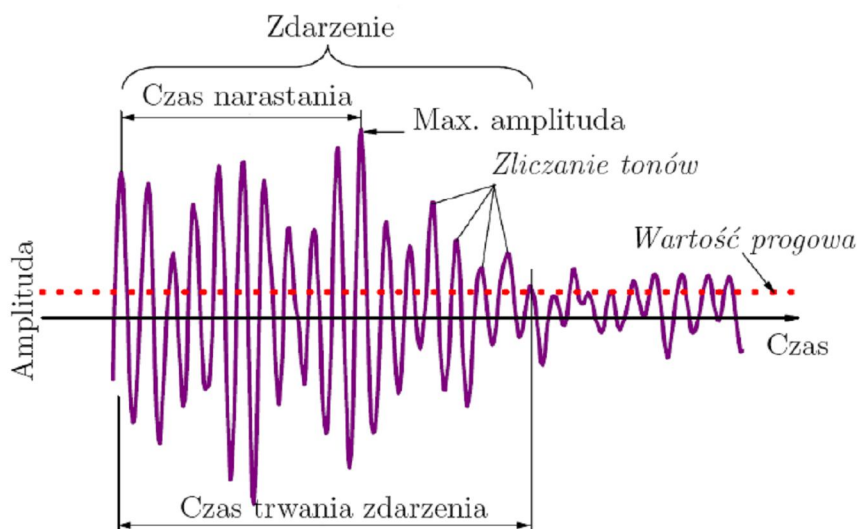
Projektując filtry cyfrowe, jako kolejny etap procedury odszumiania sygnałów, przeanalizowano użyteczność zarówno filtrów o *skończonej odpowiedzi impulsowej* (SOI), jak i filtrów o *nieskończonej odpowiedzi impulsowej* (NOI) [7]. Ich zadaniem było przede wszystkim wyeliminowanie szumu związanego z wolnozmiennymi składnikami sygnałów. Do tego celu użyto filtrów górnoprzepustowych HP (ang. *High Pass*). Przed przystąpieniem do filtrowania konieczne okazało się przeprowadzenie procedury decymacji, co pozwoliło zmniejszyć częstotliwość próbkowania ponad 100-krotnie (początkowa długość wektora danych 250002 po decymacji wynosiła 2001), a równocześnie skróciło czas filtrowania. Jako filtra decymującego użyto filtrów typu SOI (ze względu na znikome zafalowanie w paśmie przepustowym), wyznaczając dla danej częstotliwości próbkowania  $f_s$ , minimalną liczbę współczynników filtra, niezbędnych do zrealizowania zadanych parametrów. W trakcie symulacji porównano działanie filtrów HP typu SOI z oknem Kaisera oraz filtru NOI Czebyszewa o częstotliwościach odcięcia od 1 do 10 kHz (w zależności od częstotliwości sygnału wymuszenia). Okazało się, że obydwa działały z podobną dokładnością, a ostatecznie zdecydowano się na wykorzystanie w algorytmie filtru SOI. Uzyskane rezultaty filtrowania cyfrowego przedstawiono na Rys. 1b.



Rys. 1. Odszumianie sygnałów fal sprężystych: a) filtrem falkowym, b) filtrem górnoprzepustowym.

## 2.2. Ekstrakcja parametrów i kompresja sygnałów

Obecnie istnieje wiele technik przetwarzania sygnałów wykorzystywanych do ich analizy oraz ekstrakcji cech związanych z różnymi defektami konstrukcji. Wydzielić tu można dwa podejścia: analizę parametryczną sygnałów oraz analizę sygnałów przejściowych (ang. *transient signal analysis*) [9]. W pierwszym przypadku dąży się do wyznaczenia z poszczególnych sygnałów pewnej liczby parametrów. Zwykle w tym celu definiuje się wartość progową (ang. *threshold level*), której przekroczenie inicjuje analizę sygnału (Rys. 2).



Rys. 2. Parametry fali akustycznej wykorzystywane w wykrywaniu uszkodzeń (za [9]).

W identyfikacji uszkodzeń wykorzystuje się zwykle standardowe i dobrze zdefiniowane parametry, takie jak [10]:

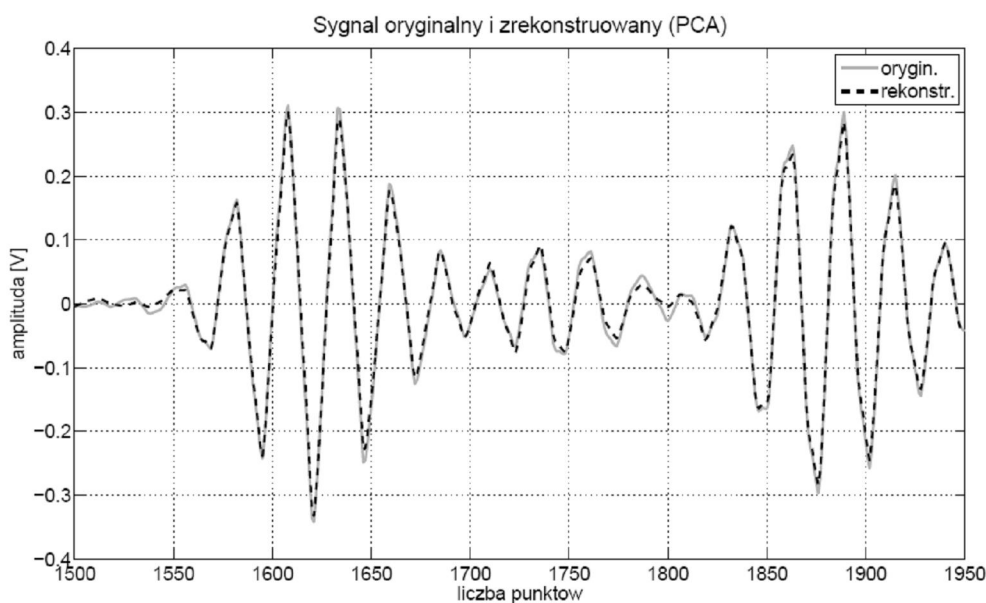
- *amplituda fali* - maksymalna amplituda sygnału,
- *czas przelotu* - bezwzględny czas pierwszego przejścia sygnału przez wartość progową,
- *czas trwania* - przedział czasu pomiędzy pierwszym i ostatnim przekroczeniem wartości progowej,
- *czas narastania* - przedział czasu pomiędzy pierwszym przekroczeniem wartości progowej oraz amplitudą piku,
- *zliczanie tonów* - liczba przekroczonych wartości progowych.

Zaletą analizy parametrycznej jest łatwość uzyskania parametrów sygnału, które dostarczają przydatnych informacji o uszkodzeniu. Czasem jednak trudno jest na tej podstawie wskazać różne mechanizmy zniszczenia [9]. Alternatywą jest w tym przypadku analiza sygnałów przejściowych, która często wykorzystuje zaawansowane techniki przetwarzania sygnałów. Nowoczesne metody ilościowe zajmują się formą i propagacją fali wewnątrz materiału oraz wykorzystują transformacje falkową (WT, WPA) lub Fouriera (FFT, STFT). Powszechnie uznaje się, że podejścia bazujące na WT lub STFT dostarczają dokładniejszych informacji o propagującej fali aniżeli analiza parametryczna [9].

Możliwość parametrycznego opisu sygnału, a nawet jego kompresji, dają także metody statystyczne. Przykładem takiego podejścia jest analiza składników głównych (ang. *Principal Component Analysis*, PCA), która określa przekształcenie liniowe  $y = \mathbf{W}x$ . Transformuje ono opis procesu reprezentowanego wektorem  $x \in R^N$  w wektor  $y \in R^K$  za pośrednictwem macierzy  $\mathbf{W}$ , w taki sposób, że przestrzeń wyjściowa o zredukowanym wymiarze ( $K < N$ ) zachowuje najważniejsze informacje dotyczące procesu [7]. Transformacja

PCA zamienia dużą ilość informacji zawartej we wzajemnie skorelowanych danych wejściowych w zbiór statystycznie niezależnych składników uporządkowanych według ich ważności. Stanowi to zatem formę kompresji stratnej, znanej także jako transformacja Karhunen-Loeve'go.

Kryterium, na podstawie którego przyjęto liczbę  $K$ -składników głównych polegało na określeniu błędu rekonstrukcji sygnałów wejściowych przy założeniu różnej liczby składników głównych (od 1 do 50). W celu określenia dokładności rekonstrukcji wykorzystano normę euklidesową  $L_2$  wektora. Dla przyjętej ostatecznie liczby  $K=16$  składników głównych, błąd rekonstrukcji sygnałów był mniejszy od 0,5%, co uznano za odwzorowania wystarczająco dokładne. Należy zauważyć, że uzyskano w ten sposób redukcję liczby parametrów z 2001 punktów do zaledwie 16 składników głównych.



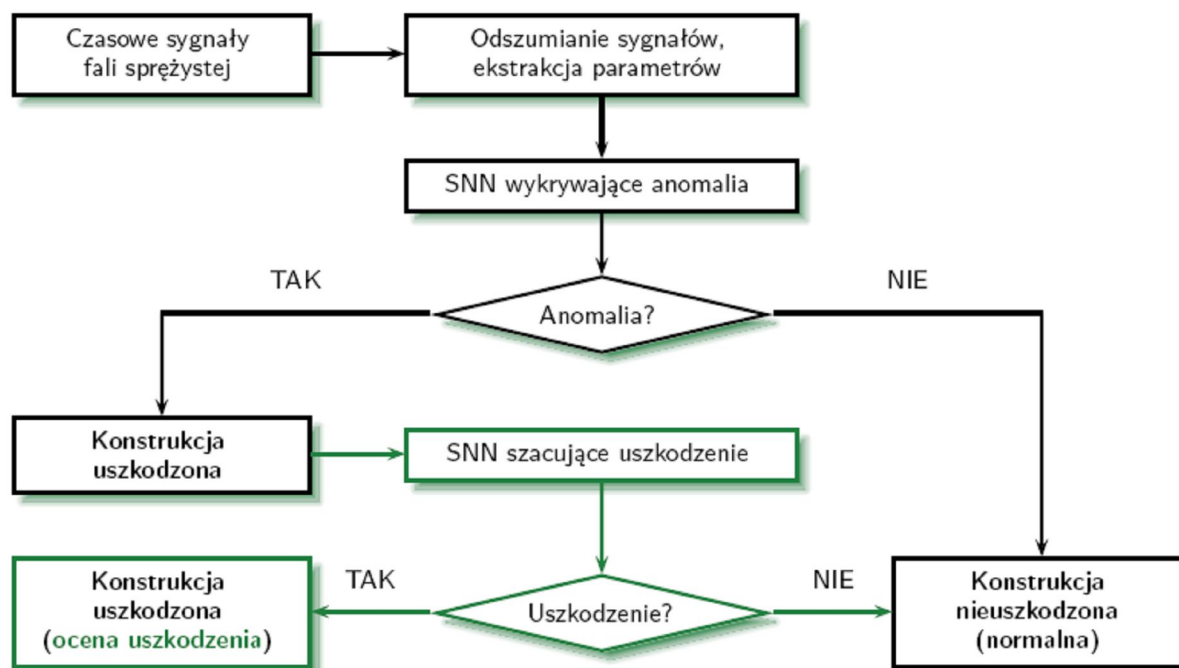
Rys. 3. Porównanie fragmentu oryginalnego i zrekonstruowanego (za pomocą PCA) przebiegu czasowego fali sprężystej dla przypadku konstrukcji z uszkodzeniem.

Ograniczając się do 16 dominujących składników głównych, zachowane w nich zostaje 99,97% informacji oryginalnych. Przeprowadzając na tej podstawie rekonstrukcję sygnału, uzyskano dokładność odtworzenia na poziomie 99,52%. Zrekonstruowany fragment sygnału (przypadek z uszkodzeniem), wraz z oryginalnym przebiegiem fali, został dla przykładu pokazany na Rys. 3. Można tam zauważyć bardzo dobrą ich zgodność, co potwierdza, że wyznaczone składniki główne jednoznacznie charakteryzują zarejestrowane sygnały propagujących w konstrukcji fal sprężystych.

### 3. SCHEMAT SYSTEMU DIAGNOSTYCZNEGO

Przyjęty w pracy model systemu wykrywania uszkodzeń oraz zasada jego działania przedstawione zostały na Rys. 4. Na wejściu układu wprowadzane są czasowe przebiegi fal sprężystych, zarejestrowane podczas przeprowadzonej procedury pomiarowej. Dalej wyróżnić możemy blok przetwarzania danych pomiarowych (filtrowanie, kompresja, ekstrakcja parametrów sygnału). Następnym elementem jest blok wykrywania uszkodzeń (anomalii), a po nim następuje etap oceny stanu konstrukcji (predykcji parametrów uszkodzenia). Na schemacie tym wyróżniono także obszary, gdzie zastosowane zostały miękkie metody obliczeniowe (sztuczne sieci neuronowe, SSN).





Rys. 4. Schemat systemu wykrywania i oceny uszkodzeń.

Realizacja pierwszego poziomu systemu diagnostycznego polegającego na wykrywaniu uszkodzeń, wymaga zaprojektowania do tego celu sieci klasyfikującej. Sygnały podawane na jej wejściu rozpoznawane będą jako sygnały odpowiadające konstrukcji uszkodzonej lub bez uszkodzenia. Drugi poziom systemu odpowiedzialny jest za predykcję parametrów potencjalnego uszkodzenia, tj. jego typu, położenia i rozmiaru. Zadanie to wymaga zastosowania SSN przeznaczonych do zadań regresji [11] i jest to problem trudniejszy do zrealizowania. Jednak nawet pomimo relatywnie małej liczby wzorców uczących (uzyskanych z pomiarów laboratoryjnych [7]), w obu wspomnianych przypadkach możliwe było poprawne wytrenowanie sieci neuronowych oraz uzyskanie zadawalających wyników identyfikacji stanu konstrukcji.

#### 4. WNIOSKI

Przedstawiony w pracy algorytm przetwarzania sygnałów został zaprojektowany na potrzeby systemów diagnostycznych, dla których źródłem informacji o aktualnym stanie konstrukcji są propagujące w nich fale sprężyste. Przeprowadzone doświadczenia udowodniły [7], że zastosowanie sztucznych sieci neuronowe oraz zaawansowanych technik przetwarzania sygnałów umożliwiają poprawne rozpoznawanie przypadków występowania uszkodzenia oraz identyfikację parametrów uszkodzenia. Analiza składników głównych pozwoliła na zredukowanie liczby parametrów sygnału, a tym samym wielkości wektora wejściowego SSN. Zastosowane procedury filtrowania sygnałów pomiarowych poprawiły dokładność identyfikacji uszkodzeń. Działanie zaprojektowanego systemu zweryfikowane zostało na przykładzie prostych i złożonych sygnałów fal sprężystych, które otrzymano w trakcie przeprowadzonych badań laboratoryjnych na modelach wykonanych z różnych materiałów, co zostało przedstawione w drugim artykule [12].

## LITERATURA

- [1] Kessler S.S., Spearing S.M., Soutis C., Damage detection in composite materials using Lamb wave methods, *Smart Mater. Struct.*, 2002, 11, 269-278
- [2] Staszewski W.J., Lee B.C., Mallet L., Scarpa F., Structural health monitoring using laser vibrometry: I. Lamb wave sensing, *Smart Mater. Struct.*, 2004, 13, 251-260
- [3] Mallet L., Lee B.C., Staszewski W.J., Scarpa F., Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: II. Lamb waves for damage detection, *Smart Mater. Struct.*, 2004, 13, 261-169
- [4] Giurgiutiu V., Tuned Lamb Wave Excitation and Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring, *Journal of intelligent material systems and structures*, 2005, 16, 291-305
- [5] Ostachowicz W.M., Damage detection of structures using spectral finite element method, *Computers and Structures*, 2008, 86, 454-462
- [6] Nazarko P., Ziemiański L., Wykrywanie uszkodzeń konstrukcji z wykorzystaniem fal sprężystych oraz sztucznych sieci neuronowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 2008, 258, 271-28
- [7] Nazarko P., Ocena stanu konstrukcji i wykrywanie uszkodzeń w jej elementach, *Politechnika Rzeszowska, Rzeszów*, 2008
- [8] Donoho D.L., De-noising by Soft-Thresholding, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41, 613-627
- [9] Woo S., Goo N.S., Identification of failure mechanisms in a smart composite actuator with a thin sandwiched PZT plate based on waveform and primary frequency analyses, *Smart Mater. Struct.*, 2007, 16, 1460-1470
- [10] Staszewski W., Boller C., Tomlinson G., *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*, John Wiley & Sons, 2003
- [11] Waszczyszyn Z., Ziemiański L., Neural networks in the identification analysis of structural mechanics problems, *Parameter Identification of Materials and Structures*, Springer – Wien, 2005, 265-340
- [12] Nazarko P., Jurek M., Ziemiański L., Fale sprężyste w badaniach konstrukcji: II. Badania laboratoryjne, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 2009

## ELASTIC WAVES IN STRUCTURE TESTS: I. SIGNAL PROCESSING

### Summary

The paper presents an idea of elastic waves application in the field of structure test and health monitoring. Smart technology used for this purpose can lead further to autonomous systems that may operate in real time providing information about the structure state or even remaining operational life. However, the analysis of the elastic waves signals, assuming reflections from structure boundaries, connections, cracks, delaminations, etc., may be rather clear or pretty complex. Due to this fact advance signal processing techniques were used here for a purpose of signal de-noising and features extraction. The proposed system performs two levels of structure diagnosis: novelty detection and damage prediction. The developed procedure of signal processing has been studied for the elastic waves signals measured in various laboratory specimens. It has been proved that the application of those techniques improves the accuracy of the designed diagnosis system. Trained neural networks were able to detect damage and predict its size with reasonably well accuracy.

Piotr NAZARKO<sup>1</sup>  
Michał JUREK<sup>2</sup>  
Leonard ZIEMIAŃSKI<sup>3</sup>

## **FALE SPRĘŻYSTE W BADANIACH KONSTRUKCJI: II. DOŚWIADCZENIA LABORATORYJNE**

### **1. WPROWADZENIE**

Systemy monitorowania stanu konstrukcji, utożsamiane także z identyfikacją uszkodzeń, stają się bardzo ważnym elementem konstrukcji poprawiającym jej bezpieczeństwo i niezawodność. Mogą one mieć zastosowanie do wykonywania badań nieniszczących, przeprowadzania inspekcji, wykrywania uszkodzenia, predykcji jego położenia, rozmiaru, a czasem nawet do oszacowania pozostałego czasu użytkowania konstrukcji. Korzyścią zastosowania takich systemów są niskie koszty inspekcji, wysoki wskaźnik dostępności kontroli oraz brak konieczności okresowego wyłączenia obiektu z użytkowania. Stale też poszukiwane są nowe techniki monitorowania stanu konstrukcji, które będą mogły poprawić dokładność i efektywność obecnie wykorzystywanych metod pomiarowych.

Potencjałem rozchodzenia się na duże odległości oraz możliwością kontrolowania szerokiego obszaru konstrukcji w czasie jednego tylko badania [1] cechują się techniki bazujące na zjawisku propagacji fal. Z tego też względu cieszą się one dużym zainteresowaniem inżynierów i naukowców związanych z różnymi dziedzinami przemysłu.

Wykorzystując zjawisko fal sprężystych do nieniszczących badań konstrukcji zainteresowani jesteśmy wykryciem i opisem zmian parametrów propagujących w modelach fal, które wywoływane są wprowadzeniem oraz wzrostem uszkodzenia. Nie jest to zadaniem łatwym, choć nawet pozornie niewidoczne zmiany przebiegów czasowych fali sprężystych udaje się wykryć za pomocą zaawansowanych technik przetwarzania sygnałów [2, 3].

Tematyka niniejszej pracy dotyczy głównie technik umożliwiających rejestrację fal sprężystych. Omówione w niej zostały elementy toru pomiarowego, idea prowadzenia badań oraz przykładowe wyniki identyfikacji stanu konstrukcji otrzymane na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych.

---

<sup>1</sup>Dr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, POLSKA

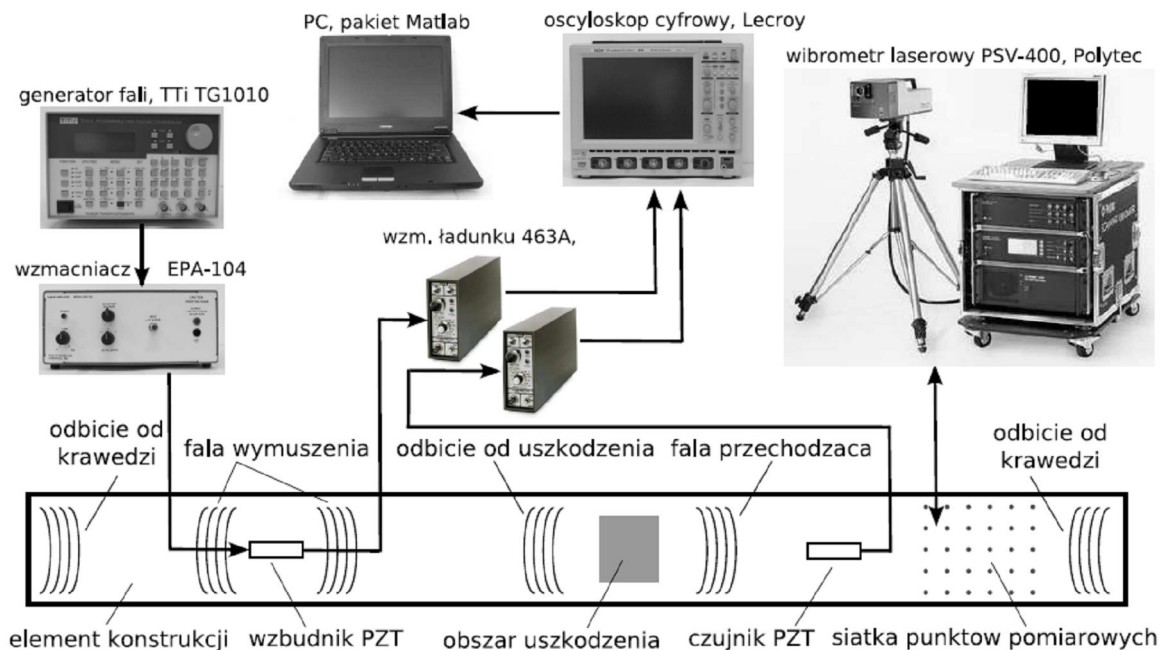
<sup>2</sup>Mgr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, POLSKA

<sup>3</sup>Prof. dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, POLSKA

## 2. OPIS EKSPERYMENTU

### 2.1 Idea badań

Idea badań z wykorzystaniem zjawiska propagacji fal sprężystych opiera na założeniu, iż każda napotkana przeszkoda powodować może odbicia propagującej w konstrukcji fali (por. Rys. 1), a jednocześnie amplituda fali przechodzącej przez obszar uszkodzenia ulegać może zmianie. Rozmieszczone na konstrukcji czujniki mają za zadanie rejestrować czasowe zmiany amplitudy fali, po czym sygnały takie poddawane są procedurze identyfikacji aktualnego stanu konstrukcji, lokalizacji zaburzeń, predykcji jego rozmiarów, czy nawet pochodzenia.



Rys. 1. Aparatura pomiarów oraz schemat modelu.

W odróżnieniu od klasycznych metod ultradźwiękowych, proponowane w niniejszej pracy podejście nie wymaga sondowania konstrukcji głowicą, lecz wykorzystuje przytwierdzone do konstrukcji elementy piezoelektryczne (przetworniki). Przewagą takiego rozwiązania jest możliwość okresowego, bądź też ciągłego monitorowania konstrukcji, łącznie z miejscami niedostępnymi dla metod lokalnych. Przy takim podejściu inspekcja obiektu sprowadzać się może do wykonania pomiarów w jednym zaledwie przebiegu. Konstrukcja na stałe wyposażona w system monitorowania pozwala zwiększyć częstość przeprowadzanych inspekcji, wpływając tym samym na wczesne wykrycie uszkodzenia.

Wiele nowoczesnych podejść wykrywania uszkodzeń bazuje obecnie na idei rozpoznawania wzorców. Polega to na przypisaniu pewnemu wzorcowi, np. z serii pomiarów, odpowiadającej mu etykiety (zwykle ze skończonego zbioru). Odpowiednie etykiety klas mogą kodować m.in. typ uszkodzenia, jego położenie, itp. Chcąc jednak zrealizować zadanie identyfikacji [2], konieczne jest zbudowanie bazy wzorców odpowiadających każdej z klas, tworząc tym samym zbiór wektorów trenujących jednoznacznie związanych z daną klasą.

Zadaniem maszyn uczących się wykrywania anomalii jest decydowanie, czy dany wektor wejściowy jest podobny, czy też nie, do zestawu wektorów trenujących, utożsamianych z „normalnym” stanem pracy konstrukcji. Nawiązując do procesu wykrywania uszkodzeń, zadaniem takiego systemu jest określenie, czy dany zestaw parametrów wejściowych odpowiada danym dla konstrukcji nieuszkodzonej. W przypadku, gdy dane te

nie pasują do założonego modelu, takiemu zestawowi danych przypisywany jest scenariusz wystąpienia w konstrukcji uszkodzenia.

Ważnym czynnikiem jest sygnalizowanie tylko znaczących odchyłeń odpowiadających normalnym warunków użytkowania. Każdy system narażony jest na szum pomiarowy oraz zmiany warunków otoczenia. System diagnostyczny odróżnić powinien statystyczne zaburzenia danych oraz rzeczywiste odchylenia od prawidłowego stanu funkcjonowania. Normalny stan użytkowania oznacza także stan konstrukcji, dla którego istnieje pewność, iż jest ona sprawna do wykonania powierzonego zadania. Jeśli w konstrukcji występują przykładowo makroskopowe uszkodzenia zmęczeniowe, a jednocześnie mamy pewność, że uszkodzenie nie powiększy się poza typowe obciążenia układu, taki stan zaliczyć należy do normalnych warunków użytkowania. Detektor anomalii będzie poszukiwał wówczas nowych uszkodzeń lub nieoczekiwanego wzrostu starych.

## 2.2 Tor pomiarowy

Przyjęty schemat toru pomiarowego oraz użyta w doświadczeniu aparatura przedstawione zostały na Rys. 1. Pierwszym jego składnikiem, zgodnie z zaznaczonym kierunkiem przepływu informacji, był generator fali typu TG1010 firmy TTI, emitujący wzorcowe sygnały fali wymuszającej.

Sygnał z generatora fali przekazywany był złączem BNC do liniowego wzmacniacza EPA-104 firmy Piezo System. Wyjście ze wzmacniacza realizowane przez złącze typu *banana jack* połączone było z przytwierdzonym do modelu wzbudnikiem.

W trakcie badań laboratoryjnych wykorzystywano dwa różne typy przetworników piezoelektrycznych (firm Mide oraz Noliac). Do każdego z badanych modeli przytwierdzono (za pomocą kleju epoksydowego) po dwa czujniki piezoelektryczne używane jako wzbudniki i odbiorniki fali sprężystej. Dobór wielkość i parametrów tychże urządzeń intuicyjnie podyktowany był rozmiarem i rodzajem materiału badanych pasm.

Sygnał odbierany z przetwornika przekazywany był do konwertera pojemnościowego 422E12 firmy PCB Piezotronics. Urządzenie to posiadało wysokoprzyrostowy, niskoszumowy wzmacniacz, liniowo połączony z układem wzmacniania ładunku. Wyjście z przetwornika transformowane było do kondensatora zwrotnego wzmacniacza i w ten sposób uzyskiwano napięcie (V).

Sygnały ze wzmacniaczy ładunku trafiały następnie do kondycjonera sygnału IEPE (model PA-3000) firmy TEAC. Alternatywnie do układu wzmacniacza ładunku 422E12 oraz kondycjonera sygnału, wykorzystywano również wzmacniacze ładunku PCB 463A. Ich zaletą była możliwość regulacji czułości wzmacniacza w odniesieniu do pojemności elektrycznej znajdującego się przed nim przetwornika i okablowania.

Jednym z ostatnich składników toru pomiarowego był cyfrowy oscyloskop WaveSurfer 424 firmy Lecroy, wyposażony w cztery kanały i oprogramowanie pozwalające na wstępną analizę oraz rejestrowanie odbieranych sygnałów.

Przetwarzanie i analizę zarejestrowanych w trakcie eksperymentu przebiegów czasowych wykonano na komputerze klasy PC (Pentium IV, 2,8 GHz), wykorzystując pakiet MATLAB ver. 6.5 oraz samodzielnie przygotowane skrypty. Całość badań zrealizowano w laboratorium Katedry Mechaniki Konstrukcji, Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej.

Do przeprowadzenia pomiarów bezdotykowych wykorzystano wibrometr laserowy PSV-400 (Polytec) umożliwiający skanowanie powierzchni modelu. W tym celu zdefiniowana została siatka punktów pomiarowych, a następnie dla każdego z tych punktów rejestrowano czasowe przebiegi fali sprężystej. Aby zredukować wpływ optycznych błędów pomiarowych, na etapie skanowania powierzchni modelu przyjęto uśrednianie przebiegów fali. Do wymuszenia propagacji fali, podobnie jak poprzednio użyto układu generatora fali

(zsynchronizowanego z wibrometrem), wzmacniacza liniowego oraz wzbudnika piezoelektrycznego.

Dużą zaletą skanujących wibrometrów laserowych jest możliwość wizualizacji zmierzonych wielkości oraz obejrzenia zmian tych wielkości w czasie (animacja propagacji fali). Pozwala to zaobserwować zachodzące w trakcie badań zjawiska, a jednocześnie umożliwia prowadzenie diagnostyki konstrukcji uzupełnionej o techniki przetwarzania obrazów.

### 3. WYNIKI DOŚWIADCZEŃ LABORATORYJNYCH

Zjawisko propagacji fal sprężystych zostało zbadane na przykładzie kilku modeli laboratoryjnych wykonanych z różnych materiałów. Badania te można podzielić na dwa przypadki. Pierwszy dotyczy sytuacji, w której odbicia od występujących w konstrukcji przeszkód (takich jak obszary uszkodzenia, granice modelu) są dobrze rozdzielone, natomiast w drugim przypadku odbicia te są dość złożone ze względu na liczne nakładające się odbicia, a niekiedy nawet niemożliwe do rozdzielenia. Analiza pierwszej grupy sygnałów oraz wykrywanie ewentualnych uszkodzeń jest w tym przypadku stosunkowo łatwa. Natomiast w przypadku modeli o małych wymiarach, wymuszeniach o niskiej częstotliwości, obecności szumu, analiza takich sygnałów staje się bardzo trudna. Z tego też powodu, do analizy sygnałów zaproponowano w niniejszej pracy zastosowanie zaawansowanych technik przetwarzania danych pomiarowych [2, 3] oraz sztucznych sieci neuronowych.

#### 3.1 Pasma aluminium

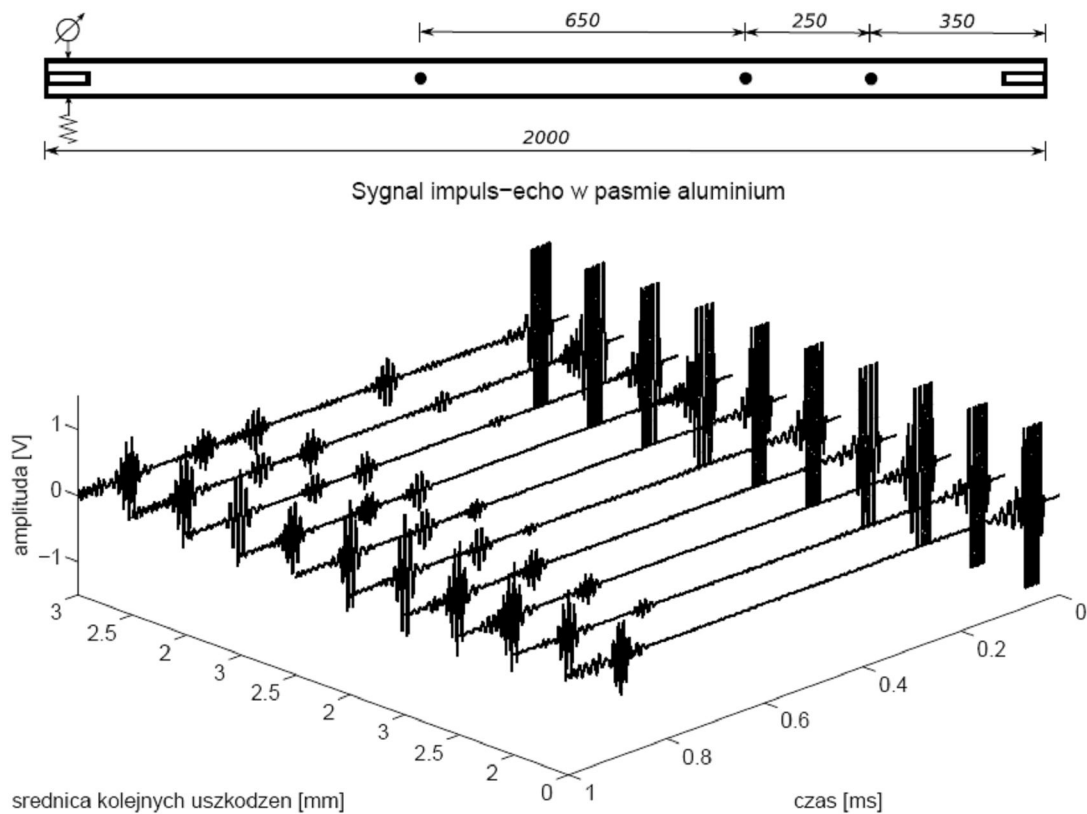
Jeden z etapów badań laboratoryjnych przeprowadzono na próbkach pasm aluminium o wymiarach 10x2x2000 mm. Przypadek ten analizowano dla trzech różnych sytuacji, gdy do analizowanego pasma: i) przykładano obciążenie zewnętrzne, ii) doczepiano dodatkową masę, iii) wprowadzono uszkodzenie. Ze względu na znaczną długość pasma oraz przyjęte parametry wymuszenia, za każdym razem odbicia od wprowadzanych przeszkód były dobrze rozpoznawalne, nawet tylko poprzez wizualne porównanie sygnałów.

Sytuacja ta została omówiona na przykładzie wyników dotyczących modelu pasma aluminium z występującymi w nim uszkodzeniami. Uszkodzenia te modelowano poprzez nawiercanie otworów o różnej średnicy, począwszy od 1 mm, a skończywszy na otworze średnicy 3,2 mm. Schemat modelu oraz położenie uszkodzeń pokazane zostały na górze Rys. 2. Pierwsze z uszkodzeń wprowadzono w odległości 35 cm od końca pasma, wierząc w tym miejscu otwory łącznie 7 średnicami wiertel. Następnie, w odległości 60 cm, wprowadzono do modelu drugie uszkodzenie, uzyskując łącznie 8 przypadków uszkodzenia. Ostatnie, trzecie uszkodzenie, wprowadzono do modelu w odległości 125 cm, także uzyskując 8 wzorców uszkodzenia. Badania prowadzone były przemiennie - dla wymuszenia wprowadzanego na początku oraz na końcu pasma.

Przykładowe przebiegi fal sprężystych, zarejestrowanych w modelu pasma aluminium z uszkodzeniami, pokazuje Rys. 2. Można tam zauważyć występowanie dodatkowych odbić fali (pomiędzy paczką wymuszenia i odbicia od końca modelu), które związane są z pojawieniem się i wzrostem kolejno wprowadzanych uszkodzeń. Łatwo zauważyć, że występujące paczki fal są dobrze rozdzielone i dają się jednoznacznie zidentyfikować.

Łączna liczba otrzymanych w tym doświadczeniu wzorców wynosiła 91, z czego:

- dla konstrukcji bez uszkodzenia uzyskano 22 wzorce (zarejestrowane na różnych etapach badań i przy różnych warunkach otoczenia),
- dla modelu z uszkodzeniami uzyskano 69 wzorców ( $3 \cdot 7 + 3 \cdot 8 + 3 \cdot 8$ ).



Rys. 2. Zestawienie wybranych przebiegów fali sprężystej (90 kHz) dla modelu pasma aluminium bez uszkodzenia i z uszkodzeniem.

Realizacja zadania wykrywania uszkodzeń bazuje, w prezentowanym podejściu, na zastosowaniu SSN jako narzędzia ostrzegającego o możliwości wystąpienia awarii. W tym przypadku rolą SSN jest klasyfikacja konstrukcji (wzorców) na nieuszkodzone lub uszkodzone. Wykorzystano do tego celu sieci neuronowe o architekturze 16-3-16.

Po zakończeniu procesu uczenia, do SSN wprowadzono zbiór wartości walidujących (dla przypadku konstrukcji bez uszkodzenia) oraz zbiór testujący (dla wszystkich przypadków uszkodzenia). Otrzymane w ten sposób wartości wyjściowe porównano ze znanym wyjściem SSN poprzez indeks uszkodzenia

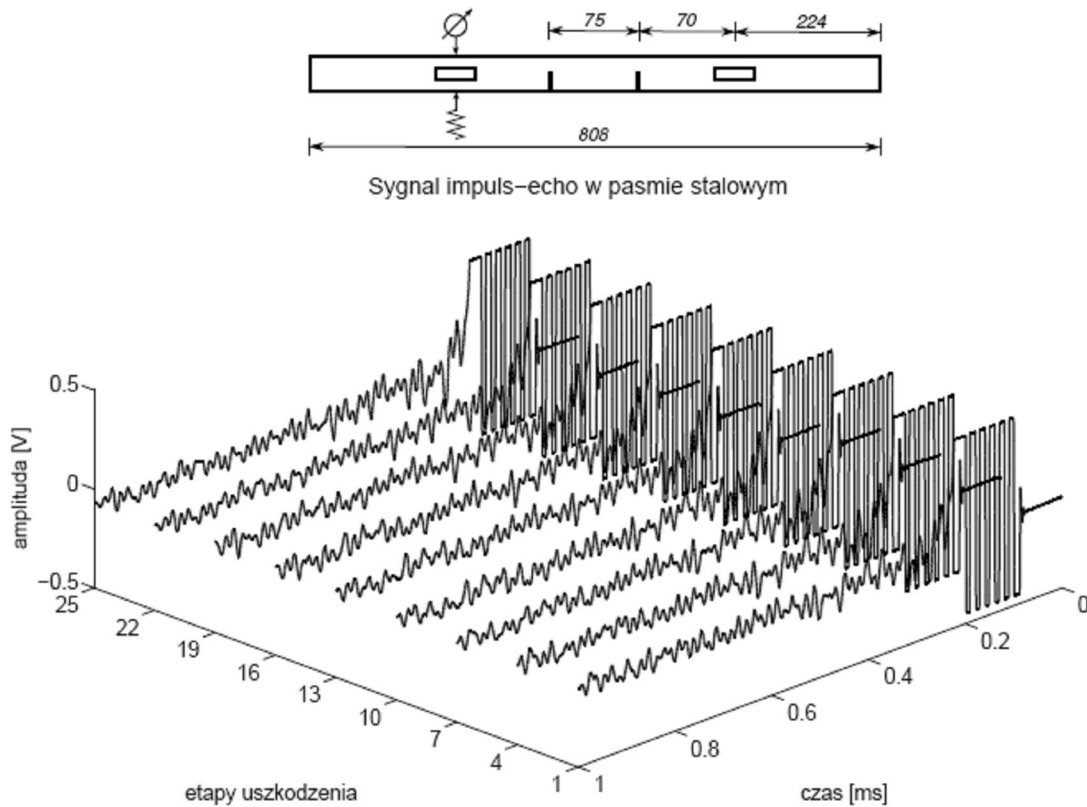
Podobnie jak w pozostałych z analizowanych przypadków, w wyniku działania wytrenowanej SSN otrzymano 100% skuteczność rozdziału wzorców na dwie klasy: nieuszkodzoną i uszkodzoną, czego dowodem jest Rys. 3.



Rys. 3. Rezultat wykrywania anomalii w paśmie aluminium przez sieć neuronową 16-3-16.

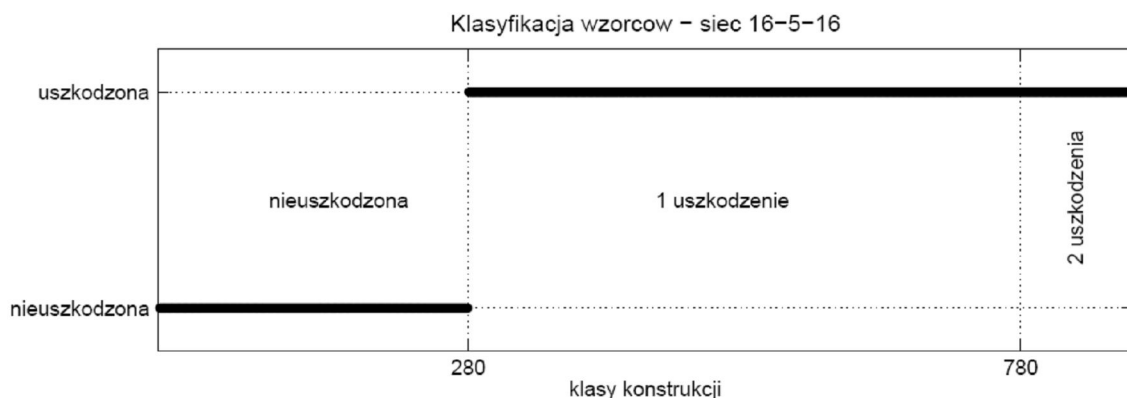
### 3.2 Pasma stali

Ze względu na uwarunkowania geometryczne, wymiary oraz położenie czujników, wyniki doświadczeń przeprowadzone na paśmie stalowym (Rys. 4) są o wiele bardziej złożone, aniżeli w przypadku pasma aluminium. Pomimo, że przebiegi czasowe fal sprężystych przedstawione na Rys. 4 dotyczą kolejnych etapów wzrostu uszkodzenia, to jednak różnice pomiędzy sygnałami są praktycznie niezauważalne.



Rys. 4. Czasowe przebiegi fali sprężystej zarejestrowane w paśmie stalowym (IFSx6, 50 kHz)

Bez względu jednak na złożoność wykresów, do zadania wykrywania anomalii zastosowano identyczną procedurę jak w przypadku sygnałów prostych. Jak się okazało, jej rezultaty (Rys. 5) nie odbiegają dokładnością od poprzedniego doświadczenia. Zauważyć można, że zarówno wzorce z uszkodzeniem, jak i bez uszkodzenia rozdzielone zostały ze 100% dokładnością.



Rys. 5. Rezultat wykrywania anomalii w paśmie stalowym przez sieć neuronową 16-5-16.

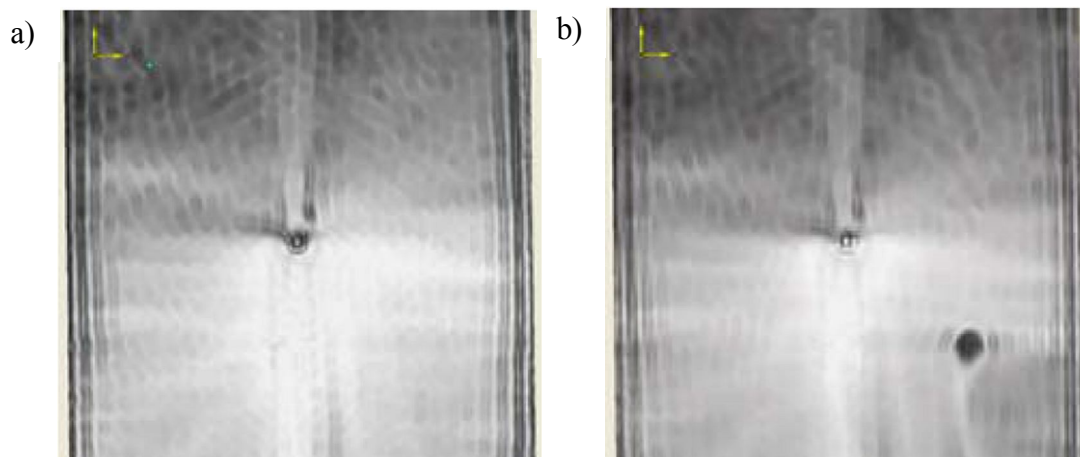


W przypadku modelu pasma stali zaprojektowane i wytrenowane zostały sieci neuronowe przeznaczone do zadania predykcji parametrów uszkodzenia, tj. jego szerokości i wysokości. Uzyskana w ten sposób dokładność oszacowania wielkości uszkodzenia wyniosła od 0.03 do 1.36 mm, co wydaje się całkiem dobrym wynikiem.

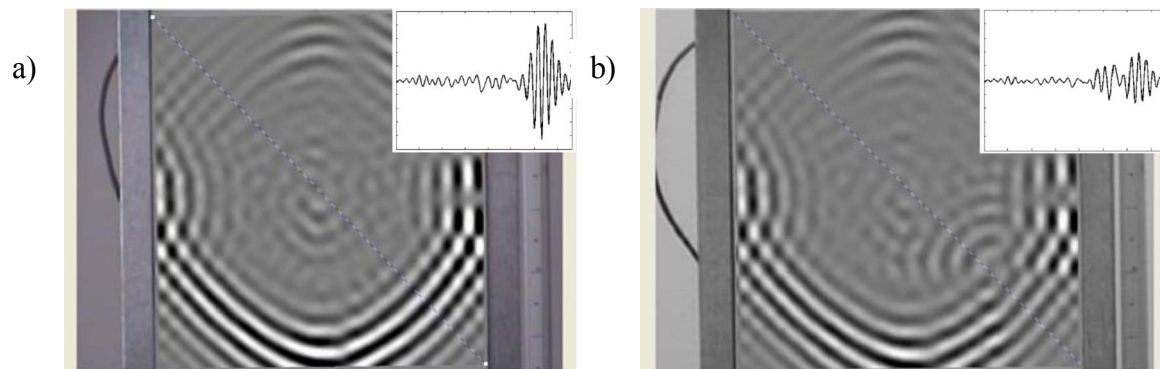
### 3.3 Laminowana płyta z włókien węglowych

Badania elementów związanych z modelami 2-D, takich jak płyty, różni się od omawianych do tej pory modeli pasm. Ze względu na konieczność analizowania fal w dwóch kierunkach, korzyści zastosowania do tego celu pomiarów bezdotykowych oraz systemu skanowania powierzchni wydają się wręcz oczywiste. Niestety metody te nie są pozbawione wad. Kluczową kwestią pozostaje rodzaj skanowanej powierzchni z uwagi na konieczność odbicia wiązki lasera. Pomimo tego, techniki te mogą być bardzo przydatne podczas inspekcji konstrukcji, weryfikacji pomiarów, wizualizacji oraz analizy wyników badań.

Badania laboratoryjne z użyciem wibrometru laserowego PSV-400 przeprowadzone zostały na płycie kompozytowej wykonanej z włókien węglowych. Do modelu o wymiarach 270x940 mm zamocowano przetwornik piezoelektryczny, służący jako wzbudnik fali (320 mm od góry modelu). Sygnał wymuszenia składał się z 3.5 fali sinus modulowanej oknem Hanninga, a przyjęta częstotliwość operacyjna wynosiła 5 kHz. Skanująca głowica lasera umieszczona została w odległości 3 m od badanego modelu. Zawieszony pionowo model pokryty został siatką punktów pomiarowych, dla których rejestrowano czasowe przebiegi fali sprężystej. Podczas badań rozważono dwa przypadki: model w stanie początkowym oraz model z zaburzeniem. Zaburzenie zrealizowano przez doklejenie dodatkowej masy, na którą składała się aluminiowa płytką o wymiarach 9x12x1 mm. Otrzymane rezultaty skanowania powierzchni modelu, zarówno na wykresach średniej kwadratowej (RMS) prędkości fali (Rys. 6) oraz czasowych zmianach prędkości fali (Rys. 7), pokazują dość wyraźnie położenie wzbudnika, jak i lokalizację dodatkowej masy. W podobny sposób identyfikować można położenie uszkodzenia, choć automatyzacja procesu diagnostycznego wymagać może zastosowania technik przetwarzania obrazów.



Rys. 6. Wynik skanowania powierzchni modelu płyty – średnie kwadratowe (RMS) prędkości propagacji fali: a) model bez uszkodzenia, b) model z dodatkową masą.



Rys. 7. Propagacja fal sprężystych w płycie oraz profil amplitud dla chwili czasu  $t=0.48$  ms:  
a) model bez uszkodzenia, b) model z dodatkową masą.

#### 4. WNIOSKI

Otrzymane wyniki wstępnych testów związanych z wykrywaniem oraz identyfikacją uszkodzeń pokazały, że wykorzystane podejście może być z powodzeniem wykorzystywane do zadań monitorowania stanu konstrukcji. Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że opracowana procedura dostarcza wystarczająco precyzyjnych informacji o chwili wystąpienia uszkodzenia oraz jego wielkości. Jednocześnie działanie systemu zweryfikowane zostało zarówno w odniesieniu do prostych, jak i złożonych przebiegów fali sprężystej.

Wykorzystanie bezdotykowych technik pomiaru drgań za pomocą wibrometru laserowego dostarcza informację na temat występowania w konstrukcji ewentualnych uszkodzeń i zmian.

#### LITERATURA

- [1] Lestari W., Qiao P., Application of wave propagation analysis for damage identification in composite laminated beams. *Journal of Composite Materials*, 39(22):1967–1984, 2005.
- [2] Nazarko P., Ocena stanu konstrukcji i wykrywanie uszkodzeń w jej elementach, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2008
- [3] Nazarko P., Jurek M., Ziemiański L., Fale sprężyste w badaniach konstrukcji: I. Przetwarzanie sygnałów, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 2009

#### ELASTIC WAVES IN STRUCTURE TESTS: II. LABORATORY EXPERIMENTS

##### Summary

The paper presents an idea of elastic waves application in the field of structure test and health monitoring. Laboratory experiments were performed for several laboratory specimens made of various materials. In this paper strips elements and plates were analyzed. The main components of the used equipment and the laboratory setup were discussed. The obtained results of preliminary tests have shown that such the approach can be successfully used for the purpose of diagnosis systems since it provides good indication about damage appearance and predicts its size with reasonably well accuracy.

Adam RYBKA<sup>1</sup>,  
Magdalena KYCKO<sup>2</sup>,

## **KSZTAŁTOWANIE DOMÓW WIELORODZINNYCH O KONSTRUKCJI STALOWEJ**

### **1. WIELORODZINNE BUDYNKI MIESZKALNE**

Wielorodzinne budownictwo mieszkaniowe rozpowszechniło się w XVIII w., kiedy rozwinęła się produkcja manufakturowa, w której zatrudniano znaczną liczbę najemnych pracowników. Pojawiły się pierwsze kamienice czynszowe w wyniku rozbudowy istniejących budynków i zwiększenia liczby pięter oraz przebudowy wewnątrz na mieszkania o zróżnicowanej powierzchni.

Wiek XIX przyniósł przemiany ekonomiczne i społeczne spowodowane dynamicznym rozwojem przemysłu. Gwałtownie rosło zaludnienie w istniejących miastach, co powodowało ogromne zapotrzebowanie na mieszkania. Mieszkanie stało się podstawową jednostką strukturalną wielorodzinnej zabudowy w miastach. Dążąc do maksymalnego wykorzystania terenu, wznoszono wielokondygnacyjne budynki mieszkaniowe tworzone przez spiętrzanie mieszkań. Rozwój dużych miast, centrów handlowych, administracyjnych i komunalnych, stworzył potrzebę wznoszenia budynków wielokondygnacyjnych ze względu na brak wolnych terenów w gęstej zabudowie aglomeracji miejskich. Oprócz niskich budynków przeznaczonych na siedziby urzędów administracyjnych, zarządów przedsiębiorstw, banków, na hotele, usługi komunalne czy też rzadziej na mieszkania, coraz częściej są wznoszone budynki wielokondygnacyjne lub wysokie o liczbie kondygnacji ponad 30, przeznaczone do pełnienia wielorakich funkcji. Szkielety budynków bardzo wysokich są wznoszone jako konstrukcje stalowe.

Wielorodzinne budynki mieszkalne to takie obiekty, których konstrukcja, wyposażenie instalacyjne i rozwiązania funkcjonalne umożliwiają wykorzystanie ich do celów mieszkaniowych. Spiętrzenie mieszkań wymaga użycia odpowiednich ustrojów i elementów konstrukcji nośnych i osłonowych trwale ze sobą powiązanych w układ przestrzenny. Układ mieszkań w budynku wpływa na rozwiązania konstrukcyjne, estetykę oraz położenie budynku w stosunku do stron świata. Układ nośnych elementów konstrukcji ma istotne znaczenie dla uzyskania odpowiedniej przestrzeni wewnętrznej, umożliwiającej rozplanowanie niezbędnych pomieszczeń mieszkania. Układ ten powinien zajmować możliwie najmniejszą powierzchnię rzutu poziomego budynku stwarzając jednocześnie warunki bezpiecznego przenoszenia obciążeń występujących w trakcie użytkowania domu mieszkalnego. Wymiary elementów konstrukcji nośnej, a przede wszystkim rozpiętości przykryć, są dostosowane do możliwości materiałów i wyrobów budowlanych oraz poziomu technik wykonywanych. W budownictwie

<sup>1</sup> Dr hab. inż. arch, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, POLSKA,

<sup>2</sup> Mgr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, POLSKA,

mieszkaniowym stosuje się układy nośne podłużne, poprzeczne i krzyżowe. Odpowiednio dobrana struktura mieszkań w budynku przyczynia się do powstania różniących się między sobą układów mieszkań, o określonym sposobie rozwiązań przestrzennych oraz powstania spójnych z nimi układów komunikacyjnych opartych na systemach wewnętrznej komunikacji pionowej i poziomej. W układach tych występują rozwiązania, w których podporami są ściany nośne lub słupy z ryglami. Stosuje się również rozwiązania zarówno ze ścianami nośnymi, jak i częściowo szkieletowe. Wymiary elementów konstrukcji nośnej, są dostosowane do aktualnych możliwości produkcyjnych materiałów i wyrobów budowlanych oraz poziomowi technik wykonywanych powszechnie w kraju.

Wyróżniamy układy konstrukcyjne:

- Układy konstrukcyjne ze ścianami nośnymi;  
Optymalnie wykorzystują elementy nośne. Ściany nośne przenoszą obciążenia stałe i zmienne. Układy te dają możliwość swobodnego kształtowania przestrzeni mieszkania z zastosowaniem odpowiedniej rozpiętości między podporami konstrukcyjnymi, możliwość swobodnego kształtowania bryły budynku, który może mieć dowolny zróżnicowany przekrój poprzeczny. Możliwość dowolnego umieszczenia loggii lub tarasu. Możliwość realizowania w sposób prosty stropodachów na stropach płaskich i pochylonych.
- Układy szkieletowe:  
Konstrukcje tworzy szkielet żelbetowy lub stalowy. Układ stanowią słupy i stropy. Połączenia słupów ze stropami mogą być sztywne lub przegubowe. Ściany wypełniając mogą być stawiane w kierunku poprzecznym lub podłużnym. Ściany mogą być wykonane, jako mur z cegły lub bloczków betonowych lub jako ściany betonowe zbrojone.

## 2. STALOWE BUDYNKI SZKIELETOWE

Za wyborem konstrukcji szkieletowej, w szczególności stalowej, także w budynkach do kilkunastu kondygnacji przemawia możliwość uzyskania stosunkowo dużej swobody podziału powierzchni wewnątrz budynku i kształtowania elewacji. Do ważnych zalet szkieletów stalowych należą: względnie mała masa własna, zdolność do przenoszenia bardzo zróżnicowanych obciążeń pionowych, dość duża szybkość wznoszenia budynku oraz łatwość rozbudowy, przebudowy lub rozbiórki. Budownictwo stalowe jest nowoczesne, efektywne, ekologiczne i bezpieczne. Dzięki nowym wyrobom, technologiom produkcyjnym i metodom projektowym osiąga coraz wyższe standardy jakościowe. Budownictwo stalowe, mieszkaniowe zużywa tylko o około 33% więcej stali niż budownictwo żelbetowe. Typowy budynek wielokondygnacyjny o konstrukcji stalowej wymaga około 65 kg stali na 1 m<sup>2</sup> powierzchni użytkowej, odpowiadający mu budynek o konstrukcji żelbetowej około 40 kg stali na 1 m<sup>2</sup>. W Wielkiej Brytanii konstrukcje stalowe stanowią układ nośny 95% budynków parterowych oraz 68% budynków wielokondygnacyjnych wykonywanych w technologii szkieletowej. Przewaga ta jest także widoczna w segmentach budownictwa użyteczności publicznej, komunikacyjnym, sportowym i oświatowym.

### a) Trwałość budynków stalowych

Precyzja wytwarzania elementów stalowych umożliwia obecnie ich dowolne kształtowanie, wytwarzanie i zestawianie w układy konstrukcyjne. Produkcja specjalnego rodzaju profili i wyrobów, w dowolny sposób wycinanych i giętych z blach stalowych staje się ekonomicznie opłacalna. Niezależnie od swego kształtu, konstrukcja stalowa przenosi przypadające na nią obciążenia przy wykorzystaniu najmniejszej ilości materiału

konstrukcyjnego. i jeśli styl lub przeznaczenie obiektu ulegnie zmianie, konstrukcję tę jest łatwo „ubrać” w inną fasadę lub w inny sposób zmienić jej wygląd architektoniczny. Belki stalowe mogą zawierać otwory wycinane w średnicach zarówno ze względów estetycznych, jak i funkcjonalnych i nie powoduje to zmniejszenia ich nośności na przenoszenie obciążeń zewnętrznych. Można przez te otwory prowadzić instalacje i przewody, co powoduje, że nie jest konieczne kształtowanie specjalnych przestrzeni instalacyjnych w budynkach poniżej lub powyżej każdego stropu. Sprzyja to zmniejszeniu całkowitej wysokości budynków, redukując tym samym koszty materiału oraz eksploatacji obiektu. Otwory w średnicach rygli i belek stropowych mogą być wycięte kiedy zajdzie taka potrzeba, nawet w trakcie eksploatacji obiektu.

#### b) Ekonomiczność budynków

Zmniejszanie wysokości konstrukcyjnej kondygnacji w budynku jest ważne z punktu widzenia redukcji kosztów. Eliminacja nawet 0,5 metra z wysokości każdej kondygnacji znacznie redukuje wielkość zużycia stali oraz innych materiałów wypełniających, izolujących czy wykończeniowych. Z punktu widzenia efektywności ekologicznej obiektu, zmniejszenie wysokości użytkowej kondygnacji pozwala zredukować nakłady związane z wentylacją, ogrzewaniem czy oświetleniem obiektu. Projektowanie obiektu w sposób, który ograniczy wysokości konstrukcyjne stropów wymaga większej staranności ze strony architektów i konstruktorów. Lecz w efekcie powstanie obiekt budowlany, którego oddziaływanie na środowisko będzie mniejsze, a realizacja i eksploatacja tańsze.

W niektórych przypadkach, możliwe jest zmniejszenie wysokości konstrukcyjnej stropów przez zastosowanie na belki stropowe elementów o tej samej nośności, lecz mniejszej wysokości, bardziej krępych, a przez to cięższych. W przeszłości rozwiązanie takie nie było ekonomiczne, lecz obecnie przy stale zmniejszających się cenach wyrobów stalowych staje się coraz bardziej racjonalne. Stropy zespolone lub dwuteowniki asymetryczne są nową, coraz częściej stosowaną alternatywą w stosunku do tradycyjnych stropów o belkach stalowych i płytach stropowych wykonywanych, jako ceramiczne, prefabrykowane lub monolityczne na podkładzie z blachy fałdowej.

#### c) Elastyczność budynków szkieletowych

Stal, jako materiał o dużym współczynniku wytrzymałości w stosunku do masy pozwala „przykrywać” znaczne rozpiętości przestrzeni użytkowych, dużo większe niż można to uczynić za pomocą innych materiałów konstrukcyjnych takich jak żelbet lub drewno. W obiektach parterowych zastosowanie belek pełnościennych lub ażurowych pozwala na kształtowanie niezabudowanych powierzchni o rozpiętości przekraczającej 50 metrów, a wykorzystanie układów kratowych pozwala powiększyć ten zasięg nawet do 150 metrów. W budynkach wielokondygnacyjnych można kształtować duże przestrzenie bez użycia słupów wewnętrznych.

Chociaż systemy szkieletów stalowych budynków wielokondygnacyjnych o małych i średnich rozpiętościach rygli są najbardziej ekonomiczne, to coraz większa liczba inwestorów wymaga zwiększenia uniwersalności obiektu przez stosowanie układów o rozpiętościach rygli sięgających 15 m i więcej. Mniejsza ilość słupów to lepsza możliwość podziału przestrzeni na większą liczbę pomieszczeń dla obecnych i przyszłych dzierżawców.

Budynki szkieletowe umożliwiają elastyczne rozmieszczenie powierzchni wewnątrz budynku. Otwarta przestrzeń to także swoboda dysponowania powierzchnią przy zmianie użytkownika, a zmiany te są coraz częstsze, gdy poszczególne części obiektów lub kondygnacji są użytkowane przez mniejsze biura, placówki handlowe lub usługowe i tym podobne funkcje. W magazynach lub halach produkcyjnych mniejsza ilość słupów to mniejsze ograniczenia w komunikacji, transporcie czy prowadzeniu ciągów

technologicznych. Właściciele budynków w celu sprostania stale rosnącemu poziomowi życia stają często przed problemem zmiany lub unowocześnienia istniejącego obiektu, wprowadzenia nowego ciągu komunikacyjnego, wydzielenia pomieszczenia o znacznej niezabudowanej przestrzeni, a nawet zwiększenia lub zmniejszenia wysokości pomieszczenia.

Zmiany konstrukcji są często także wymuszane wprowadzeniem nowych przepisów i norm budowlanych. Stal jest jedynym materiałem, który daje się przebudować lub wzmocnić przez dostawanie nowych części pod obciążeniem. Jest to bardzo ważne w sytuacji, gdy dzierżawca obiektu chciałby zwiększyć obciążenie użytkowe pomieszczeń przez dodanie nowego wyposażenia. Stalowe belki stropowe można zespolić z płytą stropową lub wzmocnić przykładkami z blach lub profili stalowych.

Połączenia śrubowe mogą być łatwo wykonywane przy nowych dostosowaniach. Lekkie ściany zewnętrzne i wewnętrzne na stalowym szkielecie mogą być łatwo rozebrane, przesunięte lub wymienione na inne.

Budownictwo stalowe cechuje krótki cykl inwestycyjny. Wcześniejsze zakończenie inwestycji oznacza, że inwestor wcześniej będzie mógł wynająć pomieszczenia użytkownikom, a właściciel zakładu wcześniej będzie mógł rozpocząć produkcję. Szybkość obrotu kapitału włożonego w inwestycję ma duże znaczenie. To wcześniej spłacony kredyt lub szybciej uwolnione środki finansowe.

### 3. PROJEKTOWANIE

- a) W budynkach szkieletowych stosuje się najczęściej stropy żelbetowe. Wynika to z konieczności zapewnienia stropom odpowiedniej nośności i sztywności, a także z wymagań akustycznych i ochrony przeciwpożarowej. Początkowo płyty stropowe projektowano jako oparte na stalowych belkach i ryglach bez uwzględniania współpracy stali i żelbetu.

Zmniejszenie kosztów wykonania przegród poziomych w budynkach szkieletowych uzyskuje się przez uwzględnienie płyty stropowej jako usztywnienia bocznego stalowych belek zabezpieczającego belki przed zwichrzeniem.

Kolejnym krokiem jest uwzględnienie zespolenia między płytą żelbetową a belkami stalowymi. Za pomocą łączników zespolą się płytę żelbetową z belkami stalowymi, elementy te współpracują ze sobą podczas przenoszenia obciążeń. Celem wzajemnego połączenia jest lepsze wykorzystanie cech mechanicznych składowych materiałów -stali przy rozciąganiu, a betonu przy ściskaniu. Daje to wymierne korzyści konstrukcyjne i ekonomiczne wyrażające się zmniejszeniem zużycia stali oraz zastosowania betonu jako materiału tańszego. Następuje też istotne zwiększenie sztywności i nośności otrzymanego przekroju oraz zmniejszenie wysokości konstrukcyjnej stropu przez redukcję belki stalowej.

- b) Przeciwożarowa i antykorozyjna ochrona konstrukcji

Nośność konstrukcji stalowych ulega obniżeniu pod działaniem na ich elementy wysokiej temperatury. Temperatura spalin podczas pożaru może wynosić od 880 stopni C do 1600 w zależności od rodzaju i ilości spalonych materiałów, intensywności ich odpływu na zewnątrz oraz od właściwości izolacyjnej przegród. Czas nagrzewania się stali nieosłoniętej do temp krytycznej  $T_{cr} = 450$  do 580 stopni C, w której elementy tracą całkowicie nośność, wynosi w zależności od odległości od źródła ciepła od kilku do kilkunastu minut od chwili przejścia pożaru w fazę intensywnego spalania. Zapewniając ludziom ewakuację z budynku objętego pożarem i ograniczając skutki działania ognia względem wyposażenia budynku, a także ograniczając zakres zniszczeń konstrukcji chroni się konstrukcję stalową przed temperaturą krytyczną, w której traci ona nośność, a

także wyposaża budynek w odpowiednie urządzenia i instalacje sprzyjające wydłużeniu czasu ewakuacji, a przede wszystkim ułatwiające likwidację pożaru.

Sposoby antykorozyjnej ochrony są przedstawione w licznych monografiach i normach krajowych.

Ochronę budynków stalowych należy dostosować przede wszystkim do środowiska otaczającego o łagodnym lub umiarkowanym oddziaływaniu, wynikającym z warunków użytkowania. Środowiska o silnej lub bardzo silnej agresywności zdarzają się zarówno wewnątrz budynków przy przemysłowej eksploatacji lub na zewnątrz budynków, na terenach zanieczyszczonych albo nadmorskich. Sposoby ochrony wielokondygnacyjnych budynków szkieletowych różnią się od sposobów ochrony obiektów halowych tym, że nakładane warstwy nie są bezpośrednio widoczne, lecz znajdują się pod powłokami ognioochronnymi. Ich inspekcja jest utrudniona i w dużym stopniu stan ich jakości zależy od jakości powłok ognioochronnych od szczelności tych powłok, braku spękań i stanu warstwy malarskiej, zapobiegającej przenikaniu wody do warstw przeciwogniowych farb i natrysków pęczniących. W przypadku suchych tynków przeciwkorozyjne lakiery nawierzchniowe powinny stanowić pierwszą warstwę wodochronną.

#### 4. WYMAGANIA REALIZACYJNE

##### a) Plac budowy i transport, roboty montażowe i wykończeniowe

Konstrukcje stalowe cechuje pełne uprzemysłowienie produkcji elementów oraz ograniczenie pracy na budowie do montażu trwającego krótko i możliwego do prowadzenia przez cały rok. Lekkość elementów składowych nie wymaga angażowania dużych ilości środków transportowych oraz ciężkich urządzeń dźwigowych podczas montażu.

Ograniczenie wielkości placu budowy ma znaczenie przy wznoszeniu budynków na terenach gęsto zabudowanych miast o wąskich ulicach, przeciążonych ruchem samochodowym. Budowa stalowego szkieletu pozwala na stosowanie lekkich, fabrycznie wytwarzanych i wykończonych elementów obudowy. Te elementy są szybko wbudowane w szkielet, sukcesywnie tuż po zakończeniu operacji montażowych konstrukcji nośnej segmentu budynku lub jego kondygnacji. Elementy stalowe i lekkie osłonowe przy prawidłowym ich traktowaniu podczas załadunku i składowania nie wymagają napraw i uzupełnień na placu budowy. Wykonywanie robót związanych z instalacjami i wyposażeniem jest możliwe tuż po zakończeniu montażu konstrukcji i obudowy w kolejno przekazywanych segmentach lub kondygnacjach budynku.

Łatwość przewidywania procesów organizacyjnych i dokładność planowania robót montażowych pozwala na skoordynowanie robót konstrukcyjnych i ogólnobudowlanych.

Mimo dużego tempa prowadzenia robót montażowych uzyskuje się wysoką niezawodność i bezpieczeństwo podczas budowy i eksploatacji obiektu.

##### b) Bezpieczeństwo

Duża odporność na obciążenia dynamiczne i wyjątkowe (np. na zmęczenie niskocyklowe konstrukcji, obciążenia sejsmiczne i wybuchy).

Stal jest materiałem homogenicznym o gwarantowanej jakości, którego skład chemiczny jest w wąskich granicach regulowany. Wskutek tego jest możliwe uzyskiwanie wysokich właściwości mechanicznych i technologicznych. Stosowane procedury jakościowe wytwarzania i montażu elementów oraz ich kontroli, badania i pomiary, usystematyzowane w międzynarodowych wymaganiach (normach ISO) pozwalają na dostarczenie wyrobów z dowolnych państw i przedsiębiorstw bez obawy wbudowania elementów o niezadowalającej lub nierozpoznanej jakości. Stosowane rozwiązania konstrukcyjne, zwłaszcza połączenia elementów, umożliwiają łatwą kontrolę w wytwórni

i na placu budowy i prowadzą do zapewnienia pełnej odpowiedzialności poszczególnych uczestników procesu budowlanego.

Połączenia są łatwo dostępne do przeglądów i kontroli ich stanu podczas eksploatacji.

Gwarantowana jakość i właściwości mechaniczno-technologiczne wyrobów przyczyniają się do pewności konstrukcji i ich odporności na awarie. W przypadku przeciążenia konstrukcje stalowe dzięki sprężysto-plastycznym właściwościom materiału nie ulegają nagłemu zniszczeniu, lecz odkształcają się ponad wartości dopuszczalne normami sygnalizując stan zagrożenia.

## 5. LITERATURA

- [1] Neufert E., Podręcznik projektowania architektonicznego-budowlanego. Arkady, Warszawa 2003.
- [2] Adamczewska-Wejchert H., Kształtowanie zespołów mieszkaniowych. Arkady, Warszawa 1985.
- [3] Korzeniewski W., Budownictwo mieszkaniowe, poradnik projektanta. Arkady, Warszawa 1989.
- [4] Arendarski J., Trwałość i niezawodność budynków mieszkaniowych. Arkady, Warszawa 1978.
- [5] Parczewski W., Projektowanie architektoniczne. Wydawnictwo szkolne i pedagogiczne, Warszawa 1993.
- [6] Kuldschun H., Rossmann E., Budownictwo dla upośledzonych fizycznie. Arkady, Warszawa 1980.
- [7] Bródka J., Kozłowski A., Stalowe budynki szkieletowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [8] Kozłowski A., Kształtowanie ram stalowych i zespolonych z węzłami podatnymi. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2002.
- [9] Kapela M., Sieczkowski J., Projektowanie konstrukcji budynków wielokondygnacyjnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
- [10] Lewicki B., Budynki wznoszone metodami uprzemysłowionymi. Arkady, 1979.
- [11] Bogucki W., Poradnik projektanta konstrukcji metalowych. Arkady, 1982.
- [12] Niewiadomski J., Głabik J., Kazek M., Zamorowski J., Obliczanie konstrukcji stalowych. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [13] Żmuda J., Podstawy projektowania konstrukcji stalowych. Wydawnictwo TiT, Opole 1992.
- [14] Biegus A., Stalowe budynki halowe. Arkady, Warszawa 2003.
- [15] Miesięcznik, Architektura & Biznes, Grudzień 2002 .

## THE SHAPING OF MULTIFAMILY BUILDINGS WITH THE STEEL STRUCTURE

### Summary

The shaping of multifamily buildings with the steel construction. Multifamily buildings spread in XIX century. Nowadays habitable buildings have very folded arrangements. The arrangement of flats in such buildings influences on constructional solutions. The steel skeleton construction gives the large possibilities of formation of the planning out internal of habitable buildings. Such buildings are durable, elastic, susceptible on later changes during its exploitation.



Григорій І. ШПАК<sup>1</sup>

## **ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧАХ**

### **1. ВСТУП**

Використання теплоти продуктів спалювання природного газу в промислових печах для нагрівання в рекуператорах повітря є досить вагомим резервом економії природного газу [1]. На сьогодні, є актуальним оцінювання ефективності використання природного газу за рахунок рекуперації теплоти продуктів спалювання. Традиційні методи розрахунків [2], порівнюючи теплові баланси печей без рекуперації та з нею, не враховують, що за інших рівних умов, температури продуктів спалювання цих печей відрізняються. Тобто результати оцінювання досить наближені.

### **2. МЕТА РОБОТИ**

Метою даної роботи є аналіз конструкцій і параметрів рекуператорів теплоти продуктів спалювання промислових печей і вибір найбільш доцільного методу оцінювання економного використання природного газу.

### **3. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ**

Наявність різних конструкцій та широкий діапазон параметрів роботи промислових печей, що працюють на природному газі, не дає змоги створити універсальну конструкцію рекуператора, який би ефективно працював на всіх типах печей. Вибір типу рекуператора для певної печі залежить від параметрів продуктів спалювання (максимальна температура, зміна температури в часі, наявність пилу), а також від конструктивних особливостей самого рекуператора (теплостійкість, газоцильність, габарити, вартість).

Енергоефективність рекуператорів (співвідношення кількості переданої теплоти і витрат потужності на переміщення продуктів спалювання і повітря в рекуператорі) істотно підвищується за рахунок інтенсифікації процесу теплопередачі. Таке підвищення є дуже важливим у випадку високих температур продуктів спалювання (1200 ÷ 1400 °С). В конструкціях рекуператорів промислових печей використовують такі способи теплообміну, як: струминне натікання повітря, канал із змінними перерізами (дифузор-конфузор), канал із переривчастими ребрами та канал із гладкими стінками.

---

<sup>1</sup>Доцент, к.т.н., Національний Університет “Львівська політехніка”, Львів, УКРАЇНА

Порівняння енергетичної ефективності цих конструкцій рекуператорів проводилось за методикою [3] визначення енергетичного коефіцієнта, що являє собою відношення кількості теплоти, що її отримало повітря, до витрат енергії на переміщення повітря і продуктів спалювання. За результатами порівняння, при однакових витратах енергії ефективність струминного теплообміну в 1,7 – 2,0 рази більша, ніж в каналі з гладкими стінками, та у 1,3 – 1,5 разів більша, ніж в каналі типу дифузор-конфузор.

На основі [4] можна визначити оптимальні геометричні та режимні характеристики струминних рекуператорів. Такі рекуператори доцільно використовувати у скловарних та подібних печах, де до рекуператорів висувають особливі вимоги через високу температуру продуктів спалювання (1200 ÷ 1400 °С), їх значну запиленість та вміст агресивних компонентів. Такі рекуператори, завдяки інтенсивному теплообміну на стороні повітря, а також завдяки своїм конструктивним особливостям здатні ефективно та надійно працювати при високих температурах продуктів спалювання та запиленою середовищі. Ці рекуператори дають можливість економити до 30 % природного газу, термін їх експлуатації складає не менше 2 років. Крім того, на їх виготовлення витрачається у 1,5 ÷ 2 рази менше нержавіючої сталі, ніж для радіаційних щілинних рекуператорів, які традиційно використовують в таких печах.

При використанні струминних рекуператорів для оцінювання економії природного газу найбільш доцільним є рівняння [5]

$$E = \frac{V \cdot I_n}{Q_n^p + V \cdot I_n - I_{nz}} \quad (1)$$

де  $E$  – економія палива у частках від одиниці;

$I_n$  – теплота нагрітого повітря, віднесена до одиниці палива, кДж/м<sup>3</sup>;

$Q_n^p$  – нижча теплота згорання палива, кДж/м<sup>3</sup>;

$I_{nz}$  – теплота продуктів спалювання в печі без нагрівання повітря, кДж/м<sup>3</sup>;

$V$  – коефіцієнт розподілу температури продуктів спалювання в печі.

#### 4. ВИСНОВКИ

Використання теплоти продуктів спалювання природного газу в промислових печах приводить до значної економії природного газу. При оцінюванні ефективності використання природного газу необхідно враховувати енергетичну ефективність рекуператора і розподіл температури продуктів спалювання в печі.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Шпак Г.І. Підвищення ефективності використання природного газу в теплотехнологічних процесах будіндустрії. – Львів: Вісник НУ «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва», № 602, 2007 р.
- [2] Тебенков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. – М.: Металлургия, 1975.
- [3] Кирпичев М.В. О наиболее выгоднейшей форме поверхности нагрева. – М.: Известия ЭНИИ, 1985.

- [4] Скотникова Т.В. Оптимизация характеристик струйных рекуператоров. – М.: Химическая технология, 1989.
- [5] Розробка САПР рекуперативних теплообмінників. Інститут газу НАН України, 1998.

## **INCREASING OF NATURAL GAS USING EFFICIENCY IN HEATING ENGINEERING AGGREGATES**

### **Summary**

In connection with considerable losses due to the warmth of products of incineration the temperature in many cases arrives at to 1000 OC|. A thermal output-input of thermal technological aggregates ratio does not exceed 30 %. Therefore in the conditions of power crisis there is an urgent problem of incineration products warmth using with the purpose of increasing of efficiency of natural gas.

In this paper an analysis of burning products for air heating heat utilization devices constructions and parameters is carried out. Technical and economical advantage of burning products heat recuperation is confirmed.



Орест Т. ВОЗНЯК<sup>1</sup>  
Юрій С. ЮРКЕВИЧ<sup>2</sup>  
Василь М. ЖЕЛИХ<sup>3</sup>  
Оксана В. ОМЕЛЬЧУК<sup>4</sup>

## **АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИПЛИВНОГО ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ СТРУМИН**

### **1. ВСТУП**

При проектуванні систем вентиляції та кондиціонування повітря в приміщеннях важливим є чинник виникнення шуму при витіканні струмини з повітророздаючих пристроїв. Генерація шуму повітророздаючими насадками залежить в основному від його конструктивного виконання та швидкості витікання струмини.

### **2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ**

Відомі акустичні характеристики повітророзподільвачів типу: циліндрична труба з відводом, прямокутні щілинні отвори [1]. Однак є можливим застосування в системах вентиляції та кондиціонування повітря повітророзподільники з використанням ефекту взаємодії зустрічних некоаксіальних круглих струмин, зустрічних неспіввісних щілин чи повітророзподільника, що створює закручену припливну струмину в супутньому потоці.

### **3. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Метою даної роботи було дослідження акустичних властивостей струмин, що витікають з насадків, описаних вище.

Експериментальні дослідження повітророзподільників із взаємодією зустрічних неспіввісних струмин та щілин відповідно проводились на установках, схеми яких представлені на рис. 1, при таких умовах та спрощеннях:

- струмини ізотермічні;
- припливні насадки – циліндричні патрубки з коефіцієнтом погасання швидкості  $m = 6,8$ , щілини з коефіцієнтом погасання швидкості  $m = 2,5$ ;
- лінійні розміри насадів не змінювалися: діаметр циліндричних патрубків  $d_0 = 50$  мм, ширина щілин  $b_0 = 20$  мм;

<sup>1</sup>Доцент, к.т.н., Національний Університет “Львівська політехніка”, Львів, УКРАЇНА

<sup>2</sup>Доцент, к.т.н., Національний Університет “Львівська політехніка”, Львів, УКРАЇНА

<sup>3</sup>Доцент, к.т.н., Національний Університет “Львівська політехніка”, Львів, УКРАЇНА

<sup>4</sup>Інженер, Національний Університет “Львівська політехніка”, Львів, УКРАЇНА

- лінійний розмір повітропроводів не змінювався і становив  $H = 1,5$  м;
- співвідношення витрат повітряних потоків  $\bar{L} = L_{л}/L_{пр}$ , що взаємодіють, залишалось незмінним, при цьому  $L_{л} = L_{пр}$  ;
- початкова швидкість повітря в припливних насадках знаходилася в межах:  
 $V = 5 - 15$  м/с.

Експериментальні дослідження повітророзподільника, що створює закручену припливну струмину в супутньому потоці проводились на установці, схема якої представлена на рис.1, при таких умовах та спрощеннях:

- струмини неізотермічні;
- повітророзподільний пристрій складається з труб супутньої, осьової і тангенціальної подачі повітря, діаметри цих труб залишались сталими;
- діаметр отвору для випуску закрученої струмини залишався сталим і становив  $d_{закр} = 46$  мм;
- діаметр отвору для випуску супутньої струмини залишався сталим і становив  $d_{сн} = 98$  мм;
- отвір для випуску закрученої струмини виступав від отвору для випуску супутньої струмини на  $X_0 = 20$  мм.

Рівень звукової потужності та вібрації вимірювався приладом DE-3301. Як відомо з [2], між вібрацією металевих стінок  $V$  [мм/с] і рівнем звукової потужності  $L_v$  [дБ(А)] існує така залежність:

$$V = 10^{\frac{L_v}{20}} \cdot 5 \cdot 10^{-5}, \text{ мм/с.} \quad (1)$$

При відомій величині вібрації Форм.1 можна визначити рівень звукової потужності:

$$L_v = 20(\lg V + 5 - \lg 5), \text{ дБ(А)} \quad (2)$$

При цьому слід врахувати наявність декількох джерел шуму, а саме: 1 – вентилятор, 2 – вібрація пружних металевих стінок повітропроводу, 3 – аеродинамічний шум витікання струмини з насадка.

Сумарний рівень звукової потужності визначається за Форм. 3:

$$L = 10 \lg \left( 10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}} \right), \text{ дБ(А)} \quad (3)$$

де  $L_1, L_2, L_3$  – рівні звукової потужності, створювані, відповідно, вентилятором за рахунок вібрації і витікання струмини.

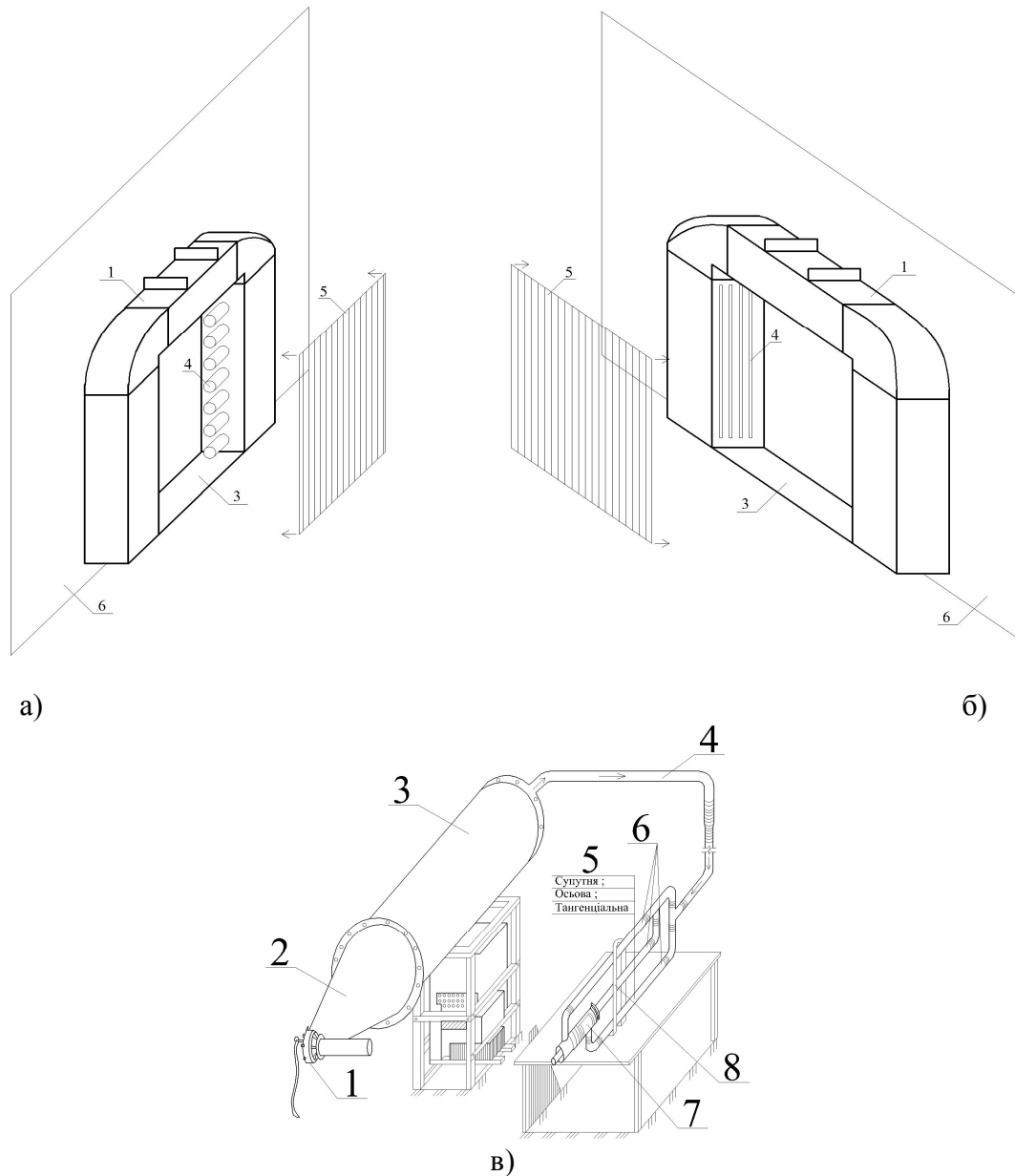


Рис. 1. Схеми експериментальних установок

- а) повітророзподільник із взаємодією зустрічних неспіввісних круглих струмин;  
 б) повітророзподільник із взаємодією зустрічних неспіввісних плоских щілин,  
 де 1 – повітропровід; 2 - конструктивна частина повітророзподілювача;  
 3 - конструктивна частина повітророзподілювача; 4 - припливні циліндричні насадки  
 $d_0=50$  мм; припливні щілини  $b_0=20$  мм; 5 – сітка; 6 – основа;  
 в) повітророзподільник, що створює закручену припливну струмину в супутньому  
 потоці, де 1- вентиляційний агрегат; 2 – конфузور; 3 – камера статичного тиску;  
 4 – колектор (гнучкий шланг); 5 – повітророзподільний пристрій; 6 – шибер;  
 7 – форсунка; 8 – стійка.

На основі Форм.3 отримаємо величину рівня звукової потужності, створювану лише витіканням припливної струмини:

$$L_3 = 10 \lg \left( 10^{\frac{L}{10}} - 10^{\frac{L_1}{10}} - 10^{\frac{L_2}{10}} \right), \text{ дБ(А)} \quad (4)$$

При цьому величини  $L_1$  визначались за Форм.3, а  $L_2$  і  $L$  – вимірювались експериментальним шляхом (безпосереднім вимірюванням вібретром і шумоміром відповідно).

За результатами виконаних експериментальних досліджень побудована номограма (рис. 2) залежності рівня звукової потужності  $L$  від швидкості витікання повітряної струмини з насадка  $V$  і безрозмірної площі  $\bar{S}$ , як співвідношення вільного перерізу насадка  $S$  до  $S_0=0,01 \text{ м}^2$  [4], тобто  $\bar{S} = S/S_0$ .

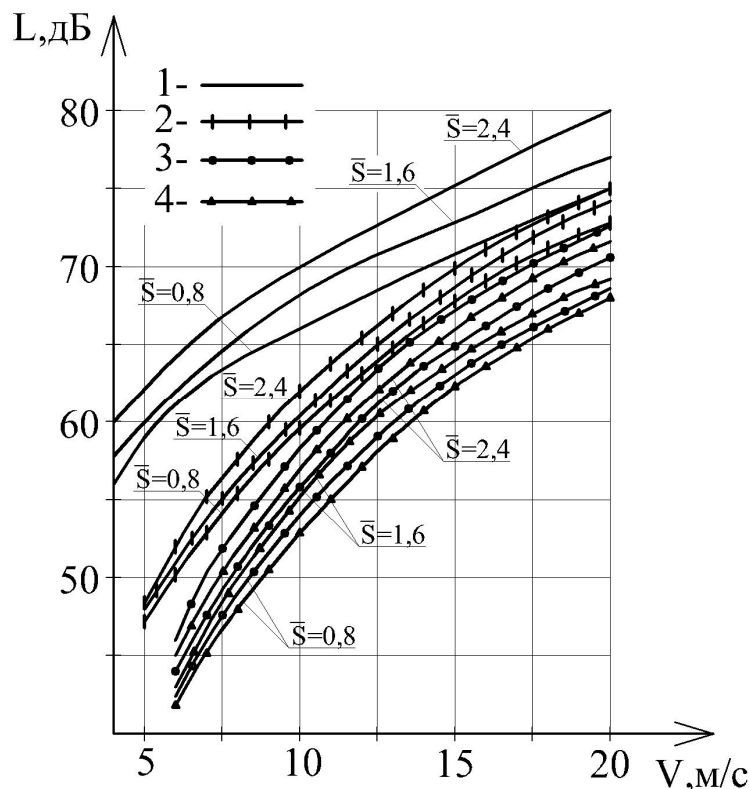


Рис. 2. Номограма залежності звукової потужності  $L$  від швидкості витікання припливної струмини з повітророзподільника з використанням ефекту взаємодії зустрічних некоаксіальних круглих струмин, зустрічних неспіввісних щілин чи повітророзподільника, що створює закручену припливну струмину в супутньому потоці і відносної площі вільного перерізу насадка  $S$ :

- 1 – прямокутна щілина; 2 - закручена припливна струмина в супутньому потоці; 3 - взаємодія зустрічних некоаксіальних круглих струмин; 4 - взаємодія зустрічних неспіввісних плоских струмин.

Ці графічні залежності були апроксимовані і отримано відповідний аналітичний вираз:

$$L = (1,24\bar{S} + 56,3)V^{0,2}, \text{ дБ(А)} \quad (5)$$



Отже, отримано узагальнену залежність, що дає змогу оцінити акустичні характеристики повітряних потоків, що утворюються у повітророзподільниках з використанням зустрічних неспіввісних струмин, зустрічних плоских щілин та повітророзподільника, що створює закручену припливну струмину в супутньому потоці.

На рис.2 наведені залежності для витікання припливних струмин, які були побудовані на основі відомої аналітичної залежності [1]:

$$L = 60 \lg V + 30 \lg \xi + 10 \lg F + B \quad (6)$$

де  $V$  – середня швидкість на вході у повітророзподільний пристрій, м/с;  $\xi$  – безрозмірний коефіцієнт місцевого опору елемента;  $F$  – площа перерізу насадка, м<sup>2</sup>;  $B$  – поправка, що залежить від типу обтічного елемента (для повітророзподільників з використанням зустрічних неспіввісних струмин, зустрічних плоских щілин та повітророзподільника, що створює закручену припливну струмину в супутньому потоці  $B=0$ ).

#### 4. ВИСНОВКИ

Порівнюючи номограми для струмин, що витікають з повітророзподільників з використанням зустрічних неспіввісних струмин, зустрічних плоских щілин та повітророзподільника, що створює закручену припливну струмину в супутньому потоці відмітимо, що рівень шуму є найнижчим при витіканні струмини, яка утворюється в результаті взаємодії зустрічних неспіввісних плоских щілин.

На основі отриманої залежності стає можливим виконати перевірку підбору повітророзподільників з врахуванням допустимого рівня шуму для заданої продуктивності припливного насадка.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройств. Ч.II: Вентиляция и кондиционирование воздуха /Под ред. И.Г.Староверова. М., 1978.
- [2] Виброакустика, механика, опоры электрических машин: Тр. Всесоюз. Науч.-исслед. ин-та электромех. Т.37 М., 1971.
- [3] Справочник проектировщика. Защита от шума /Под ред. Е.Я. Юдина. М., 1974.
- [4] Борьба с шумом на производстве: Справочник / Е.Я. Юдин и др. М., 1985.
- [5] О.Возняк, А.Ковальчук. Ефективність повітророзподілу зустрічними неспіввісними струминами. Вісник Національного Університету “Львівська політехніка” № 460 “Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація”, 2002 р., - с.157 – 161.
- [6] O.Vozniak, A.Kovalchuk. Air distribution by opposite non-coaxial air jets. Zbornik prednasok: VII Vedecka Konferencia s medzinarnou ucastou Kosicko – Lvovsko – Rzeszowska, 2002 r., - s. 173 – 178.
- [7] О.Возняк, А.Ковальчук, Є.Іванусь, А.Кіц. Повітророзподіл у приміщенні при взаємодії зустрічних неспіввісних струмин. Вісник Національного Університету “Львівська політехніка” № 432 “Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація”, 2001 р., - с.31 – 37.
- [8] O.Vozniak, O.Dovbush. Influence of indoor climate on a person heat exchange in a room. Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej “Aktualne problemy budownictwa i Inzynierii srodowiska”; czesc 2 - inzynieria srodowiska”, Rzeszow, 2000 r., - s.441 – 447.

## AIR DISTRIBUTION AND AIR JET'S ACOUSTIC PROPERTIES

### Summary

In this article relation between such factors as a noise level, air flow rate and incoming hole size were considered. The aim of investigations is to obtain the chart and analytic equations for determination of the necessary incoming hole size (diameter or width and height) under condition of the necessary amount of air satisfaction at the rated noise level. In this paper there are presented results of investigations with interaction of opposite non-coaxial of air jet's acoustic characteristics, which give possibility to make a control of air supply devise choice at air distribution calculation. Dependence of noise level from jet's leakage velocity and size of air supply devise has been investigated.

Стефан С. ЖУКОВСЬКИЙ<sup>1</sup>  
Олександр М. ДОВБУШ<sup>2</sup>  
Антон ЧЕТЕРБОК<sup>3</sup>

## **РОЗПОДІЛ ТИСКІВ НА ВХОДІ ЛОКАЛЬНОГО ВІДСМОКТУВАЧА З КІЛЬЦЕВИМ ПОВІТРООБМЕЖНИКОМ**

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** місцева витікальна вентиляція, локальний відсмоктувач, повітрообмежник.

### **1. ВСТУП**

Системи місцевої витікальної вентиляції існуючих виробничих приміщень, внаслідок недосконалості їх конструкційних елементів, функціонують із великими повітропродуктивностями, що спричиняє значні енергетичні та матеріальні затрати.

Збільшення зони дії локальних відсмоктувачів ймовірно спричинить краще вловлення забрудників і зменшення розмірів відсмоктувача та кількості витікального повітря.

Ефективність вловлювання забрудників відсмоктувачем можна збільшити, наприклад, оснащенням його конструкції кільцевим повітрообмежником.

### **2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ**

Відомо, що ефективність відкритих відсмоктувачів залежить від їх конструкції і геометричних характеристик, місця розміщення щодо джерела забрудників, швидкостей повітряних потоків і їх рівномірності у вхідному отворі, рухомості внутрішнього повітря в просторі між відсмоктувачем і джерелом забрудників.

Основними недоліками вентиляційних відсмоктувачів є:

- велика повітропродуктивність завдяки великій площі вхідного отвору та підсмоктуванню навколишнього повітря;
- нерівномірність швидкості у вхідному перерізі, що зумовлено великими значеннями коефіцієнтів турбулентного перемішування;
- обмежена зона дії.

<sup>1</sup>Доцент, к.т.н., Національний Університет “Львівська політехніка”, Львів, УКРАЇНА

<sup>2</sup>Ст. викладач, Національний Університет “Львівська політехніка”, Львів, УКРАЇНА

<sup>3</sup>Інженер, Національний Університет “Львівська політехніка”, Львів, УКРАЇНА

В. Ельтерман, Т. Фіалковська, О. Тимофєєва, В. Батурін [1, 2, 3] стверджують, що вагомою причиною низької ефективності вловлювання смоками забрудників є рухомість внутрішнього повітря, тобто величина дисипації в приміщенні енергії, на яку впливають енергія притікальних та теплових струменів, енергія від рухомих предметів, затрати енергії на циркуляцію повітря у вертикальній площині при неізотермічних умовах.

Ефективність відсмоктувачів відкритого типу, що розміщені над джерелами теплоти, збільшується з наближенням повітровхідних отворів до місць утворення забрудників і їх розміщенням перпендикулярно до осі пилогазового потоку. При обмеженні зони всмоктування можна досягнути зменшення площі всмоктувального отвору і витрати витікального повітря [1]. Аналіз можливих умов використання відсмоктувачів показує, що, не дивлячись на значну кількість дослідів і конструкційних пропозицій, проблема підвищення ефективності відсмоктувачів відкритого типу є актуальною.

### **3. МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Мета роботи – визначення розподілення поля надлишкових тисків в зоні всмоктування циліндричного відсмоктувача з кільцевим повітрообмежником та оптимізація діаметра повітрообмежника.

### **4. НАУКОВА НОВИЗНА ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Представлено результати досліджень повітряних потоків, які затікають у локальний циліндричний відсмоктувач з повітрообмежником круглої форми змінних геометричних характеристик за ізотермічних умов, а саме: зона дії відсмоктувачів та її площа. Виявлені оптимальні геометричні характеристики повітрообмежника.

Під час вільного стікання в торець труби із гострими кромками зона дії всмоктувального отвору розповсюджується і в прилеглу область стінки труби. При цьому лінії течії повітряного потоку різнонапрямлені і сильно викривлені, і це зумовлює зменшення довжини активної зони струменя.

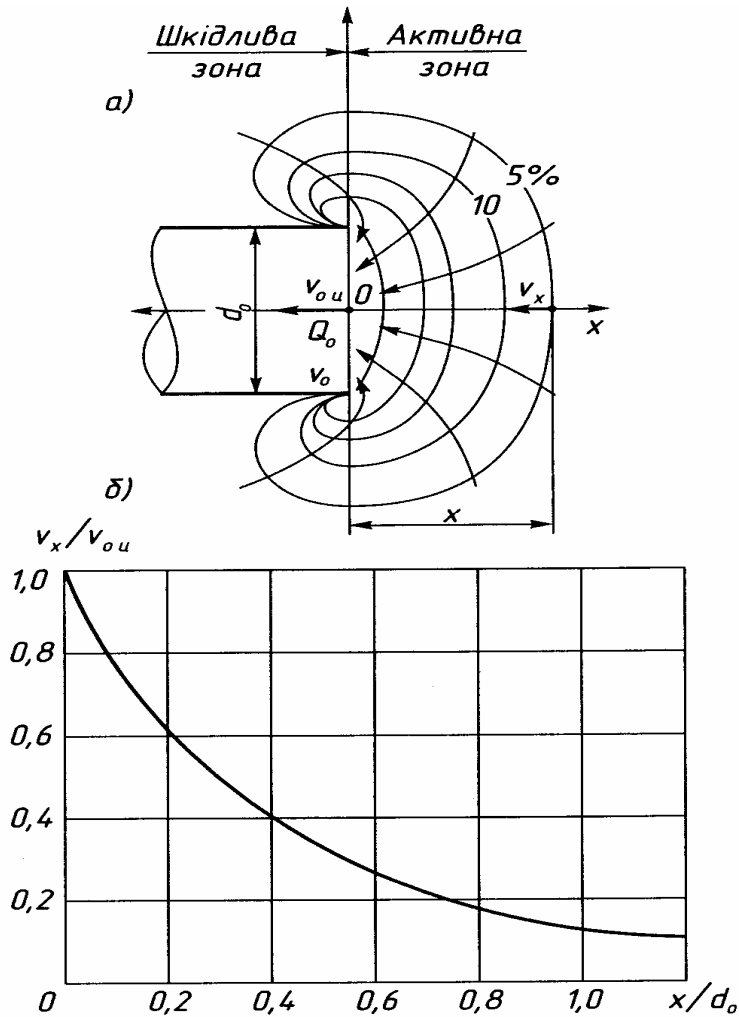


Рис. 1. Структура потоку під час вільного стікання до центра отвору:  
а – схема стікання в торець труби круглого перерізу; б – результати експериментальних досліджень

На основі аналізу стікання з усіх напрямків в точковий отвір можна записати

$$v_x = \frac{Q_0}{4\pi \cdot X^2}, \quad (1)$$

Зміну осьової швидкості незалежно від перерізу всмоктувальної труби (круглий, квадратний, прямокутний) також можна описати виразом

$$\frac{v_x}{v_0} = \frac{\omega_0}{10X^2 + \omega_0}, \quad (2)$$

де  $v_0$  – середня за витратою швидкість у всмоктувальному отворі труби, м/с;

$\omega_0$  – площа перерізу всмоктувального отвору, м<sup>2</sup>.

Із рис. 2. видно, що збільшити довжину активної зони потоку можна мінімізувавши навколотрубну шкідливу зону, наприклад, завдяки застосуванню повітронепроникної жорсткої стінки (повітрообмежника).

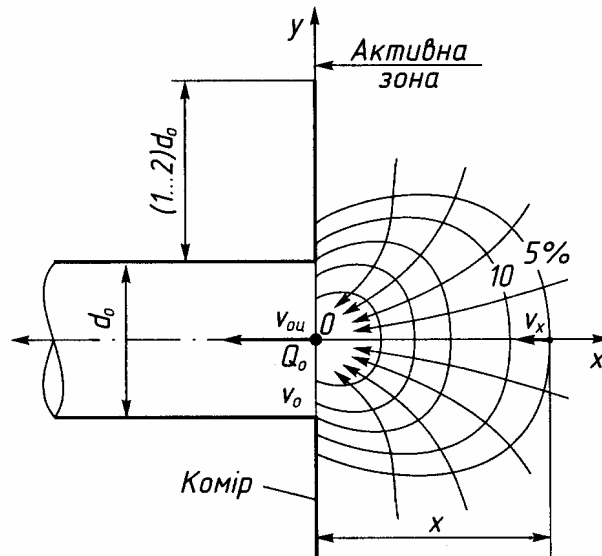


Рис. 2. Схема стікання в торець труби круглого перерізу за наявності повітронепроникної жорсткої стінки (повітрообмежника)

На основі теоретичного аналізу напівобмеженого стікання в точковий отвір

$$v_x = \frac{Q_0}{2\pi \cdot X^2}, \quad (3)$$

Аналіз експериментальних даних (рис.3) дає таку залежність зміни осьової швидкості під час напівобмеженого стікання в отвори круглого і квадратного перерізів

$$\frac{v_x}{v_0} = 1,33 \cdot \frac{\omega_0}{10X^2 + \omega_0}, \quad (4)$$

Порівнюючи залежності (2) і (4), бачимо, що за напівобмеженого стікання порівняно з вільним стіканням, осьова швидкість зростає на 33%.

Подальше збільшення довжини активної зони всмоктуваного потоку можна досягти завдяки трансформації циліндричного торця труби в дифузорній або стругленій, тобто завдяки плавному звуженню області підтікання і більш вирівняних ліній течій потоку.

На основі теоретичного аналізу потоку, який стікає в точковий отвір з плавно звуженого простору, маємо

$$v_x = \frac{Q_0}{\psi \cdot X^2}, \quad (5)$$

де  $\psi$  - тілесний кут, під яким з точки 0 видно частину відкритого простору, звідки стікає повітряний потік, рад.

Експериментальні дослідження локального циліндричного відсмоктувача з повітрообмежником проводились на стенді, схема якого представлена на рис.3, за таких початкових умов:

- повітряний потік є вільним та ізотермічним;
- розмір повітрообмежника  $a$  змінювались в межах  $\frac{a}{D} = 0 \div 2$ ;
- швидкість повітря у початковому (вхідному) отворі зонта забезпечувалась в межах  $1 \div 5$  м/с.

Експериментальний стенд (рис. 3) складається із радіального вентилятора 1, електродвигун 2 якого живиться постійним струмом від автотрансформатора 3 з випрямлячем змінного струму 4. До всмоктувального патрубка вентилятора 1 за допомогою повітропроводу 5 приєднана камера розрідження 7 із локальним відсмоктувачем 9, що кріпиться до знімної стінки 10 камери 7. Для замірів статичного тиску повітря в камері 7 застосовується диференціальний мікроманометр 14, а для замірів його температури – спиртовий термометр 17. До нагнітального патрубка вентилятора через повітропровід 6 приєднана камера плюсового надлишкового тиску 8, з витратомірним колектором 11 до якого кріпиться вихідний патрубок 12. Статичні тиски повітря в камері 8 та витратомірному колекторі визначаються, відповідно, різницевиими мікроманометрами 15, 16, а температура заміряється спиртовим термометром 13. Наявність камери статичного тиску 8 дає змогу повітряному потоку плавно підтікати до робочої частини колектора 11 без турбулізації та завихрень.

Зміна витрати повітря у всмоктувальній і нагнітальній частинах стенда забезпечується зміною кількості обертів турбіни вентилятора 1.

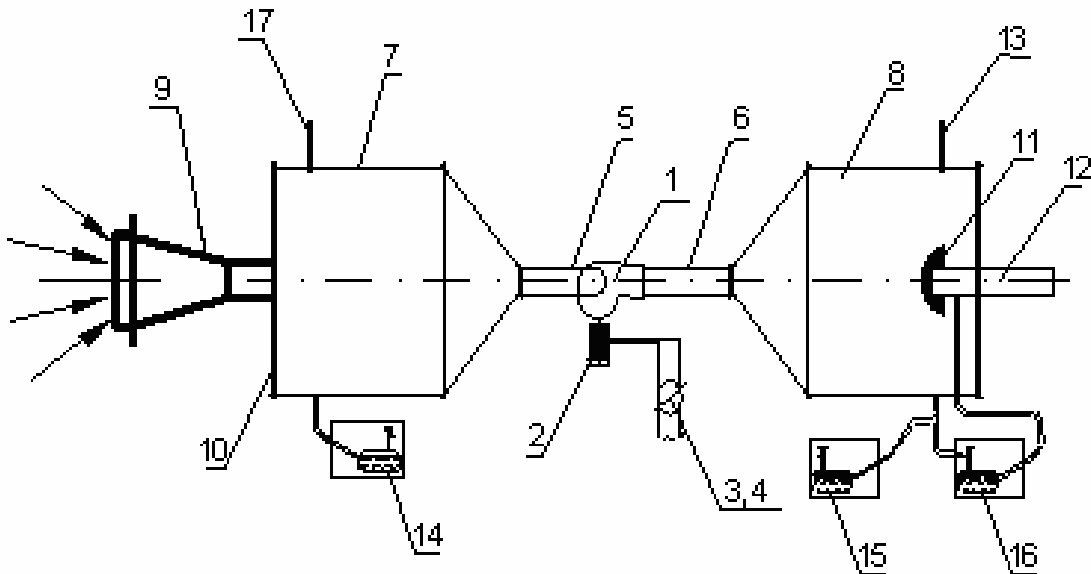


Рис. 3. Схема експериментального стенда:

- 1 – радіальний вентилятор постійного струму; 2 – електродвигун; 3 – автотрансформатор, 4 – випрямляч змінного струму; 5 – повітропровід на всмоктуванні; 6 – повітропровід на нагнітанні; 7 – камера розрідження; 8 – камера плюсового надлишкового тиску; 9 – вхідний патрубок; 10 – знімна стінка; 11 – витратомірний колектор; 12 – вихідний патрубок; 13, 17 – спиртові термометри; 14, 15, 16 – різницеві (диференційні) мікроманометри.

Таблиця 1. Засоби вимірювання

№ п/п	Найменування засобів вимірювання	Характеристики
1	Барометр-анероїд БАММ, № 8795	8000...106000Па; точність $\pm 200$ Па
2	Спиртові термометри	Точність 0,5 °С
3	Мікроманометр ММН-240 № 2000 і № 2220	Точність $\pm 2$ Па, $\pm 6$ Па

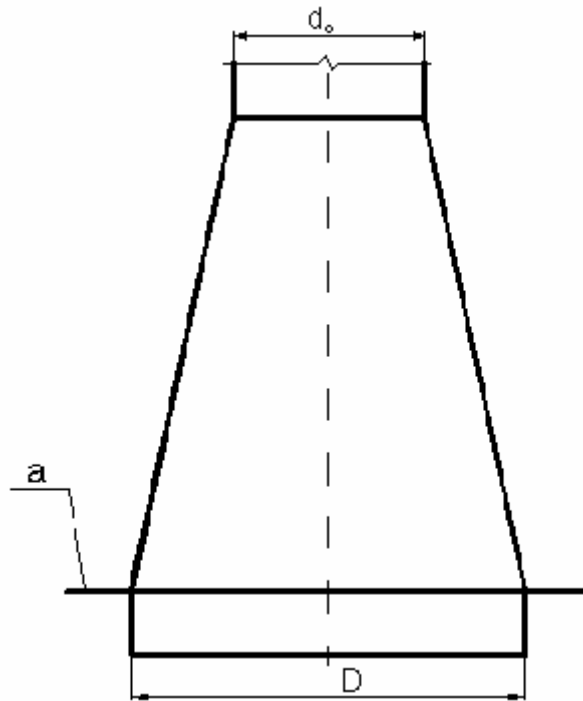


Рис. 4. Схема експериментального локального відсмоктувача (зонта)

Окремі результати експериментальних досліджень представлені на рис. 5 ÷ 8 у вигляді полів однакових швидкостей (ізотах) – сині лінії та полів надлишкових статичних тисків - помаранчеві лінії за змінних відносних величин  $a/D$ .



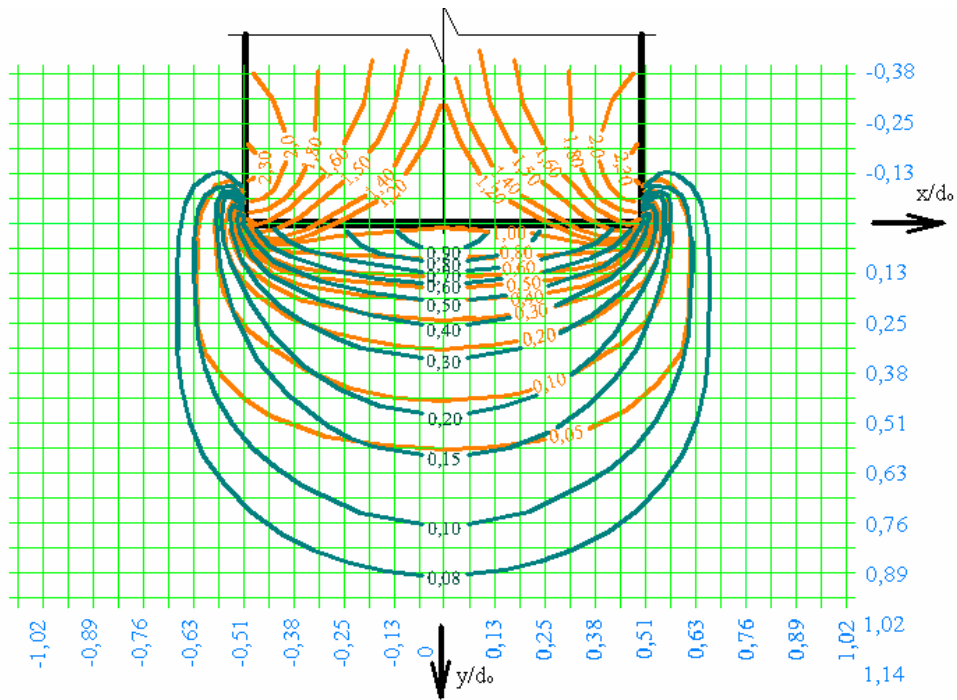


Рис. 5. Схема поля ізотех та поля надлишкових статичних тисків повітряного потоку, спричиненого вентиляційним зонтом за  $a/D = 0$

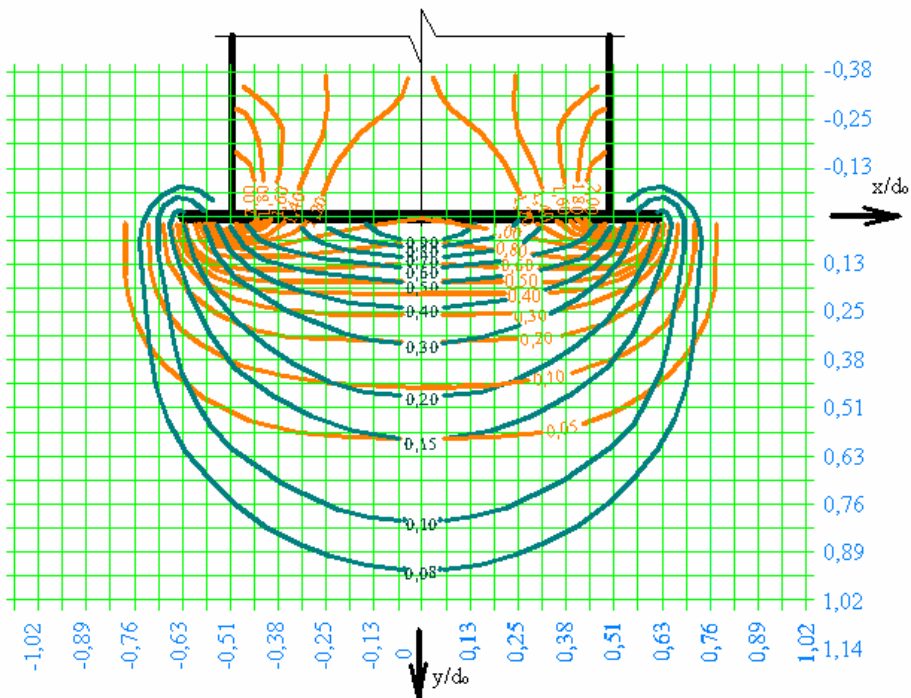


Рис. 6. Схема поля ізотех та поля надлишкових статичних тисків повітряного потоку, спричиненого вентиляційним зонтом за  $a/D = 1,25$

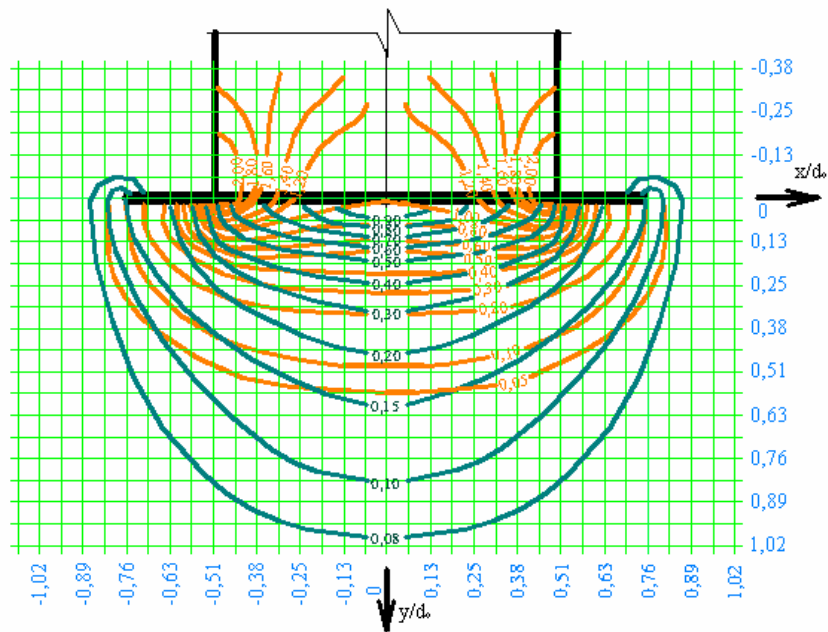


Рис. 7. Схема поля ізотех та поля надлишкових статичних тисків повітряного потоку, спричиненого вентиляційним зонтом за  $a/D = 1,5$

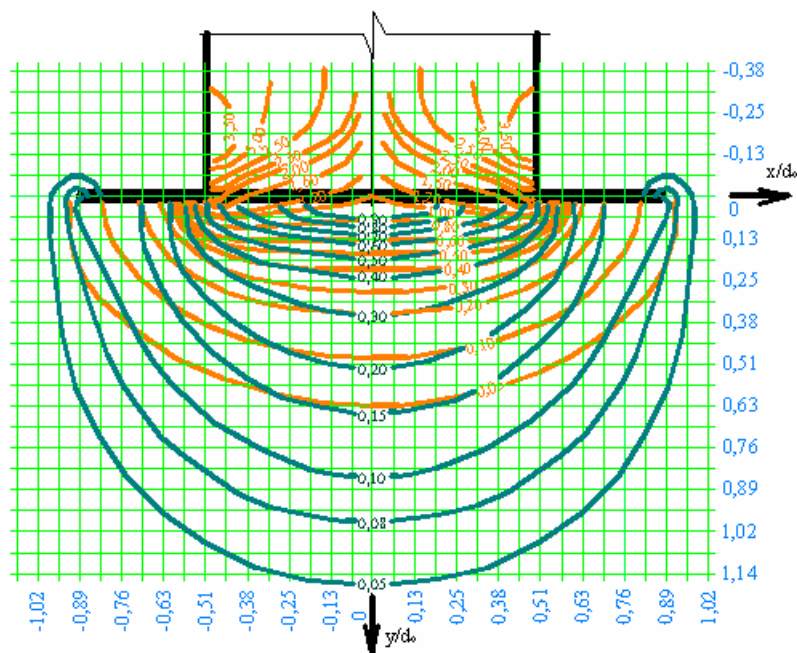


Рис. 8. Схема поля ізотех та поля надлишкових статичних тисків повітряного потоку, спричиненого вентиляційним зонтом за  $a/D = 1,75$

## 5. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Застосування того чи іншого типу локального відсмоктувача обумовлене технологічними умовами конкретного виробництва.

2. Позитивну роль у збільшенні площі дії відсмоктувача відіграє наявність повітрообмежника.
3. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено що за відношення діаметру повітрообмежника до діаметра вхідного отвору відсмоктувача  $\frac{a}{D} = 1.75$  зона всмоктування і величина розрідження є максимальними.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Фиалковская Т.А. Вытяжные зонты и шкафы. - М.: Стройиздат, 1947. - 67 с.;
- [2] Тимофеева О.Н. и др. Местная вытяжная вентиляция при электросварочных работах. - М.: Промиздат, 1961.
- [3] Батулин В.В, Эльтерман В.М. Аэрация промышленных зданий. - М.: Госстройиздат, 1963. - 260 с.
- [4] Посохин В.Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования. - М.: Машиностроение, 1984. - 180с.
- [5] Рекомендации по расчету отсосов от оборудования, выделяющего тепло и газы. - М.: Стройиздат, 1983. - 32с.
- [6] W.Chakroun, M.M.A.Quadri. Flow characteristics a local exhaust system. ASHRAE, Annual Meeting, 2003, p.527-539. 12. S.M.Lee, J.W. Lee. A new local ventilation system using a vortex flow generated with a finned rotating annular disk. AHRAE, Winter Meeting, 2005, p.149-158.

## PRESSURE DISTRIBUTION ON INPUT OF LOCAL HOOD WITH CIRCULAR AIR DISTINCTOR

### Summary

The systems of local exhaust ventilation of existing industrial enterprises, as a result of their construction elements imperfection, work with large air flow rate that causes considerable power and financial expenses.

It is possible to increase efficiency of pollutants output hood, e.g. by set of its construction by circular air distinctor.

A purpose of work is determination of distributing of the field of surplus pressure in the suction zone of cylinder hood with circular air distinctor and also optimization of its diameter.

Investigations of hood with circular air distinctor has been carried out on an experimental installation at isothermal conditions. The diameter of air distinctor **a** was varied within the limits of (0 ÷ 2,0) diameter **D** of hood inlet chink.

The analysis of the obtained epures of surplus pressure certifies:

- due to application circular air distinctor, which is located in plane of output aperture in the hood construction area of hood sucktion increases;
- zone of sucktion and vacuum value are maximum at attitude of diameter of air distinctor toward the diameter of hood inlet chink  $a/D = 1,75$ .