

**І.І. Анік'єв<sup>1</sup>**, **В.А. Максимюк<sup>1</sup>**, **Є.О. Сущенко<sup>1</sup>**,  
**І.Б. Фетисов<sup>2</sup>**

### ПРО ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ТИСКУ В УДАРНІЙ ТРУБІ ТА МУЗИЧНИХ ІНСТРУМЕНТАХ ДАТЧИКОМ WIKA A-10

<sup>1</sup>*Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ,*

*вул. Нестерова, 3, 03057, Київ Україна; e-mail: desc@inmech.kiev.ua,*

<sup>2</sup>*Інститут мистецтвознавства, фольклористики і етнології ім. Г.Рильського НАНУ,*

*вул. Грушевського, 4, 01001, Київ Україна; e-mail: vamdf@yahoo.com*

**Abstract.** The tools of registration of dynamic mechanical processes in scientific researches, in particular, concerning musical performance, are described. The recorder LMS SCADAS Mobile, dynamic pressure sensor WIKA A-10, and tensoresistors are used. Some features of the process of registration of dynamic pressure by the WIKA A-10 sensor are established which are not regulated by the manufacturer. The recorder with pressure and strain sensors is used in searching for the correlations between the amplitude of oscillations of the drum membrane and the pressure in the harmonics during the joint performance of music for the folk dance.

**Key words:** strain gauging, deformation, pressure, shock tube, harmonics, folk music.

#### **Вступ.**

Впливу ударних хвиль [14] на нестационарне деформування тонкостінних конструкцій присвячено ряд теоретичних [16], експериментальних [15] та теоретико-експериментальних [7, 13] праць. Оригінальне дослідження [3] присвячено біомеханічному навантаженню на макет голови. Формування ударної хвилі спостерігали в музичному інструменті – тромбоні в експериментах на вимірювання тиску і візуалізації потоку [11].

Ударні труби [8, 10, 14] дозволяють експериментально досліджувати нестационарне деформування конструкцій під дією ударної хвилі. В Інституті механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України ударна труба [4, 5] з поперечним перерізом прямокутної форми розміром 140 мм х 210 мм використовується для вивчення динаміки тонкостінних конструкцій. Для реєстрації динамічних процесів успішно використовується високочутливий реєстратор вібраційних, акустичних і тензосигналів LMS SCADAS Mobile в корпусі SCM01 разом з програмним забезпеченням LMS Test.Xpress. Для вимірювання деформацій використовуються п'єзодатчики та тензорезистори. Крім динаміки інженерних конструкцій під дією ударних хвиль [4 – 6] засобами тензометрії досліджувались часові та амплітудні характеристики виконання музичних творів на ударних інструментах [2, 17].

Донедавна тиск у вимірювальній камері ударної труби обчислювався за формулою [9] на основі швидкості поширення ударної хвилі та температури, тобто визначався непрямым вимірюванням. Такий спосіб вимагав високої точності до вимірювань швидкості й температури, особливо за невеликих тисків. Вимірювання ж динамічного тиску безпосередньо датчиком, підключеним до реєстратора LMS SCADAS, зменшить систематичні похибки та сприятиме автоматизації реєстрації експериментальних даних. Оскільки ударна труба формує ударну хвилю з крутим фронтом, це накладає ряд вимог до датчика динамічного тиску щодо часу відгуку, резонансної частоти, чутливості до малих змін тиску, паразитної чутливості до прискорення та можливості

узгодженого підключення до реєстратора LMS SCADAS Mobile. Причому, оскільки реєстратор використовується переважно в режимі тензостанції, то датчик має бути підключеним до універсального вхідного так званого «вольтового» модуля VB8-E реєстратора. Остання вимога зразу звужує коло можливих датчиків. Крім того, існує проблема калібрування датчиків для вимірювання тиску в ударних хвилях [8].

Подальший виклад присвячено модернізації ударної труби датчиком динамічного тиску WİKA A-10, вивченню його недокументованих виробником характеристик і дослідженню деяких динамічних процесів в тонкостінній балці та музичних інструментах.

### 1. Конструкція датчика, монтаж, калібрування.

Було вибрано сертифікований промисловий (рис. 1) датчик фірми WİKA модель A-10 [12]. Ця модель датчика вже використовується в наукових дослідженнях [15]. Основні характеристики датчика такі [12]: вимірюється надлишковий над атмосферним тиск; діапазон вимірювання 0...1 бар; вихідний сигнал 0...5 В; трипровідна схема включення; напруга живлення 8...30 В. Інтервал тиску 0...1 бар відповідає вихідному сигналу 0...5 В з максимальною нелінійністю не більше 0,11% та відносною похибкою не більше 0,32%.

Принцип дії датчика WİKA A-10 ґрунтується на тензорезистивному ефекті. Тензорезистори встановлені так, щоб зменшити паразитну чутливість до прискорення та вібрацій корпусу датчика, що дозволяє монтувати його безпосередньо без демпферів. Важливо відмітити, що в датчик WİKA A-10 влаштована електронна схема з невідомими характеристиками. Тому особливо важливим було дослідити амплітудні і часові характеристики датчика стосовно здатності вимірювати динамічний тиск в ударній хвилі та можливості реєстрації на тензостанції LMS SCADAS Mobile (рис. 2).



Рис. 1

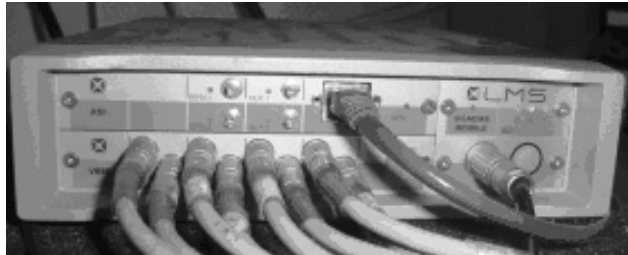


Рис. 2

Датчик монтувався в ударну трубу за допомогою дюймового різьбового з'єднання G 1/8" двома способами. В першому випадку він був вмонтований в закритий торець вимірювальної секції ударної труби для вимірювання тиску у відбитій хвилі. В другому – в бокову сторону секції на відстані 330 мм від закритого торця так, що він спочатку фіксував тиск у падаючій хвилі, а потім – у відбитій.

Електричне з'єднання виконано відповідно до схеми виробника. Сигнальні виводи роз'єму датчика були під'єднані височастотним екранованим кабелем РК 50 до байонетного конектора (BNC штекер для кабелів з хвильовим опором 50 Ом), що дозволяло підключати датчик безпосередньо до осцилографа, а до реєстратора LMS SCADAS – за допомогою кабеля-перехідника (BNC-LEMO) з комплекту реєстратора. Виводи живлення роз'єму були під'єднані кабелем до низьковольтного конектора (DC 5,5 x 2,1 мм, гніздо) для подальшого підключення до джерела постійної напруги 12 В (рис. 1). Вихідний сигнал від датчика подавався на один з вхідних каналів тензометричного блоку реєстратора LMS SCADAS Mobile в режимі: тип моста – «по bridge» і з одиницею вимірювання напруги – В.

Для перевірки калібрування датчика за квазістатичного (порівняно повільного) навантаження до компресора з ресивером паралельно гумовими трубками були під'єднані датчик WİKA A-10 та аналоговий манометр класу 0,4. Повітря ручним регулюванням нагніталось до деякого значення тиску на аналоговому манометрі. На

осцилограмі реєстратора в цей момент спостерігався максимум, оскільки потім повітря повільно стравлювалось через з'єднання. Максимальна відносна похибка між двома вимірюваннями становила 1,2%, що дещо перевищує суму відносних похибок кожного з пристроїв. Очевидно цю похибку можна віднести до аналогового манометра. Такі вимірювання були виконані для ряду значень тиску. На загал, датчик показав заявлену виробником чутливість та лінійність.

Калібрування датчика в динаміці ґрунтується на теоретичних положеннях монографії [9], згідно з якими тиск в ударній хвилі визначається її швидкістю. На схемі розподілу тиску в ударній трубі (табл. 1) наведено загальноприйняті позначення для тиску в різних її областях. Між областями 4 і 3 знаходиться діафрагма, а між 2 і 1 – фронт ударної хвилі. Якщо торець труби в області 1 закритий, то хвиля від нього відбивається, а тиск у ній позначають  $P_5$ . Зазвичай, тиск в області 1  $P_1$  є рівним атмосферному.

Таблиця 1

Камера високого тиску	Камера низького тиску	
Область 4	Області 3, 2	Область 1
$P_4$	$P_3 = P_2$	$P_1$

Для обчислення швидкості [4] ударної хвилі  $c = l/\Delta t$  в камері низького тиску на відстані  $l = 311 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$  розташовано два п'єзодатчики, сигнали від яких в моменти проходження через них фронтів ударної хвилі з інтервалом  $\Delta t$  фіксувались на осцилографі GDS – 806S з точністю 0,5 мкс. В кожному досліді також фіксувалась температура у вимірювальній секції  $t^\circ$  з точністю 0,1 $^\circ\text{C}$ . За цими даними розраховувалась швидкість ударної хвилі  $c$ , швидкість звуку в повітрі (табл. 1, область 1)  $a = 20,046\sqrt{t^\circ + 273,15} \text{ [м/с]}$  та число Маха  $M = c/a$ .

Тиск  $P_2$  в падаючій хвилі (табл. 1, область 2) обчислюється за формулою [9]:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}, \quad (1)$$

де  $\gamma$  – показник адиабати газу.

У момент зустрічі із плоскою перешкодою у фронті відбитої хвилі формується тиск  $P_5$  відповідно до формули:

$$\frac{P_5}{P_2} = \frac{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} + 2 - \frac{P_1}{P_2}}{1 + \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{P_1}{P_2}}. \quad (2)$$

Для повітря  $\gamma = 1,4$ . Тоді формули (1) і (2) набирають вигляду:

$$P_2/P_1 = (7M^2 - 1)/6; \quad (3)$$

$$P_5/P_2 = \left(8 - \frac{P_1}{P_2}\right) / \left(1 + 6 \frac{P_1}{P_2}\right). \quad (4)$$

У камеру високого тиску (область 4) з ресивера подавалось стиснене повітря до тиску  $\Delta P_4 = P_4 - P_1$  понад атмосферного. Датчик WIKA A-10 вимірює надлишковий

понад атмосферним тиск, тобто  $\Delta P_2 = P_2 - P_1$  у падаючій хвилі або  $\Delta P_3 = P_3 - P_1$  у відбитій. Тоді надлишковий тиск у падаючій хвилі буде таким:

$$\Delta P_2 = \frac{7}{6} P_1 (M^2 - 1). \quad (5)$$

На рис. 3 показана типова осцилограма сигналу від датчика WIKA A-10, вмонтованого в торець ударної труби. Вертикальні пунктирні лінії відмічають курсорами моменти часу. Відбита ударна хвиля має крутий фронт та інтервал майже сталого тиску тривалістю 8,4 мс. Рівень 0,6 В згідно з технічним паспортом відповідає тиску 0,12 бар = 12 кПа. Тобто, отриманий прямим вимірюванням надлишковий тиск у відбитій хвилі становить  $\Delta P_3 = 12$  кПа.

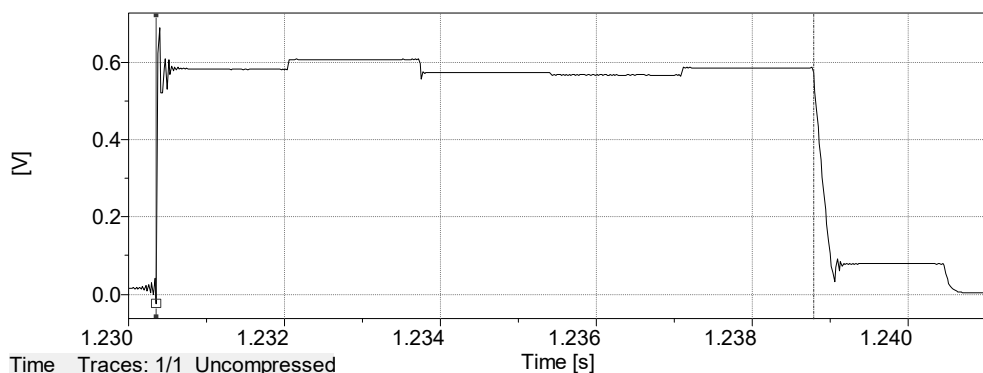


Рис. 3

В даному досліді було зафіксовано: надлишковий над атмосферним тиск у камері високого тиску  $\Delta P_4 = 16$  кПа; час проходження хвилі між п'єзодатчиками  $\Delta t = 880$  мкс; температура у вимірювальній секції  $t^\circ = 23,3^\circ\text{C}$ ; тиск  $P_1 = 100$  кПа. За таких параметрів число Маха  $M = 1,0239$ , а розраховане за формулами (3), (4) значення тиску у відбитій хвилі  $P_3 = 111,5$  кПа. Тобто, теоретично розрахований надлишковий тиск у відбитій хвилі становить  $\Delta P_3 = P_3 - P_1 = 11,5$  кПа, що на 4,2% менше від експериментально отриманого значення ( $\Delta P_3 = 12$  кПа). Такі досліді було виконано для ряду значень  $8 \text{ кПа} \leq \Delta P_4 \leq 32 \text{ кПа}$ . Вони показали задовільні відповідності між виміряними і розрахованими тисками.

В табл. 2 дана залежність відносного надлишкового тиску у відбитій хвилі від тиску у камері високого тиску, яку можна назвати амплітудною характеристикою ударної труби. З досвіду попередніх досліджень [6] було встановлено емпіричне співвідношення  $\Delta P_3 / \Delta P_4 \approx 0,75$  за невеликих тисків, що в певному діапазоні тисків відповідає даним табл. 2 і додатково свідчить про коректне використання датчика WIKA A-10 в динаміці.

Таблиця 2

$\Delta P_4 / P_1$	$\Delta P_3 / P_1$	$\Delta P_3 / \Delta P_4$
0,08	0,048	0,6
0,12	0,085	0,71
0,16	0,12	0,75
0,20	0,15	0,75
0,32	0,27	0,84

Необхідно відзначити, що за невеликих тисків число Маха незначно перевищує одиницю. Тому результати розрахунків надлишкового тиску в ударній хвилі мають велику чутливість до точності вимірювання величин  $\Delta t$  та  $l$ , що є недоліком непрямого вимірювання тиску. Причину втрати точності видно з формули (5), в якій від числа Маха віднімається одиниця.

На рис. 4 показана осцилограма сигналу від датчика WKA A-10, вмонтованого на боковій стінці вимірювальної секції. Торець труби був заглушений. Надлишковий над атмосферним тиск у камері високого тиску становив  $\Delta P_4 = 20$  кПа.

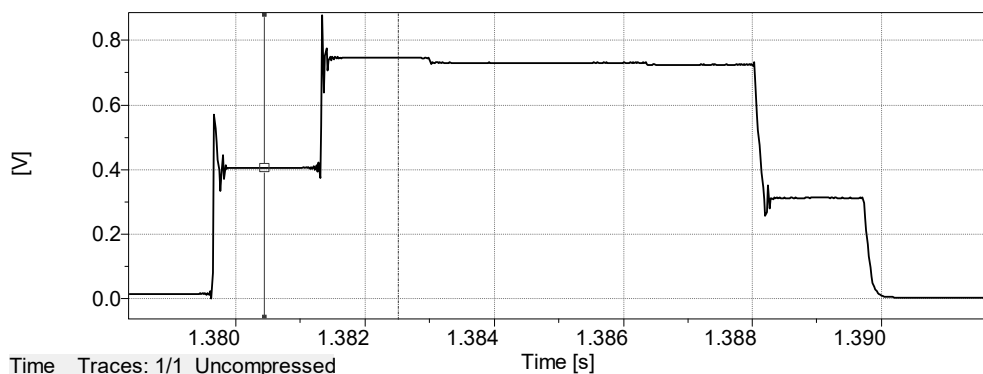


Рис. 4

Рівень напруги  $U = 0,41$  В, відмічений суцільним курсором, відповідає тиску у падаючій хвилі  $\Delta P_2 = 8$  кПа. Потім хвиля доходить до заглушеного торця труби, відбивається від нього і створює сталий тиск  $\Delta P_5 = 15$  кПа, що відмічено штрихпунктирним курсором на рівні  $U = 0,75$  В.

Наступний дослід (рис. 5) відрізняється від попереднього (рис. 4) лиш відсутністю заглушки в торці ударної труби. В цьому випадку в початковий момент часу тиск такий самий, як і в попередньому випадку. В подальшому через відсутність заглушки він різко спадає до нуля, причому за той же проміжок часу 8,4 мс.

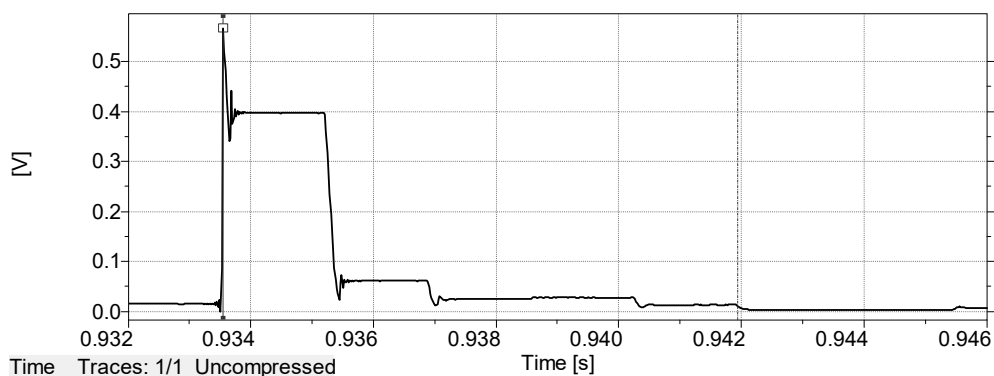


Рис. 5

Певний подив викликає ступеневий характер осцилограми. Очевидно, вона має виглядати гладкою кривою. Подібний ступеневий характер спостерігався і на попередніх осцилограмах (рис. 3, 4).

Такий ступеневий характер осцилограм (рис. 3 – 5) можна пояснити притаманними датчику WKA A-10 недолікам, які не є суттєвими в промисловому використанні. Так, електроніка датчика видає дані, як правило, дискретними в часі порціями сталої величини тривалістю біля 1,7 мс. Після стрибкоподібної зміни рівня сигналу спостері-

гаються згасаючі коливання, які можна пояснити або власними коливаннями мембрани датчика, або перехідними процесами в електроніці. Крім того, перед фронтом сигналу на рис. 3 можна помітити передвісник у вигляді наростаючого коливального процесу. На рис. 4 та 5 цей передвісник майже непомітний. Таке, певною мірою, можна пояснити тим, що в першому випадку фронт хвилі є паралельним до мембрани датчика, яка заглиблена у втулці, а в другому – перпендикулярним.

В наукових дослідженнях ударна хвиля падає на конструкцію і відбивається від неї, тобто конструкція протягом короткого інтервалу часу (8,4 мс, рис. 3) перебуває під дією практично сталого тиску у відбитій хвилі. Оскільки для подальшого аналізу важливо знати тільки рівень цього тиску та тривалість його дії, то вказані недоліки датчика WIKA A-10 не є суттєвими в таких експериментах і легко враховуються.

## 2. Випробовування модернізованої ударної труби.

Найважливішими часовими характеристиками модернізованої установки є крутизна фронту ударної хвилі та час відгуку датчика тиску на фронт хвилі. Певний інтерес становлять коливні процеси, які реєструє датчик WIKA A-10 за стрибкоподібної зміни тиску.

Для аналізу перехідних коливальних процесів на рис. 6 показано розтягнутий в часі фрагмент осцилограми з рис. 3. Вертикальними курсорами заміряно період коливань мембрани. Він становить  $T = 0,39$  мкс як для «передвісника», так і для постфронтного сплеску. Це відповідає досить високій частоті власних коливань мембрани датчика  $f = 1/T = 2,56$  МГц.

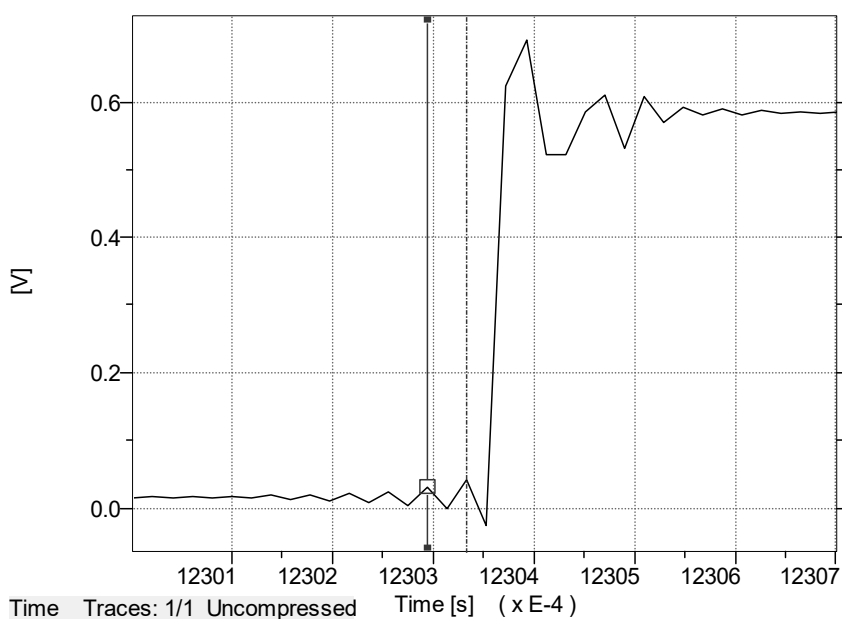


Рис. 6

Вимірювання часу відгуку датчика тиску WIKA A-10 на фронт хвилі відбувалось на реєстраторі LMS SCADAS Mobile та на осцилографі GDS-806S шляхом порівняння з моментом відгуку п'єзодатчика власної конструкції [1]. В досліді обидва датчики розміщувались в торці ударної труби, тобто вони були під дією відбитої ударної хвилі величиною  $\Delta P_3 = 12$  кПа ( $\Delta P_4 = 16$  кПа). Сигнали від обох датчиків підключались до двох каналів вимірювальних приладів.

На рис. 7 зафіксовано на реєстраторі LMS SCADAS момент  $t_1 = 0,82893$  с відгуку датчика WIKA A-10 на фронт відбитої ударної хвилі, а на рис. 8 – момент  $t_2 = 0,82699$  с відгуку п'єзодатчика в тому ж масштабі за часом. Датчик WIKA A-10 реагує на фронт хвилі на  $t_1 - t_2 = 1,94$  мс пізніше від п'єзодатчика.

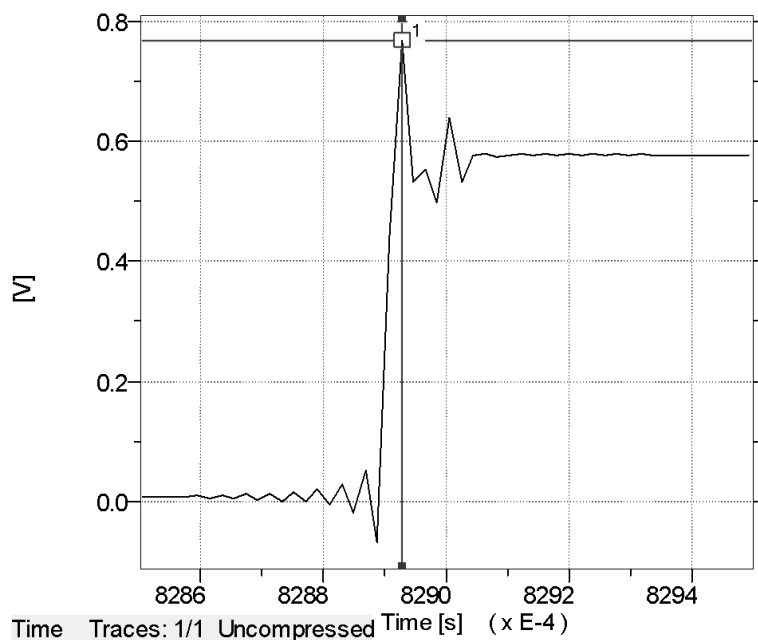


Рис. 7

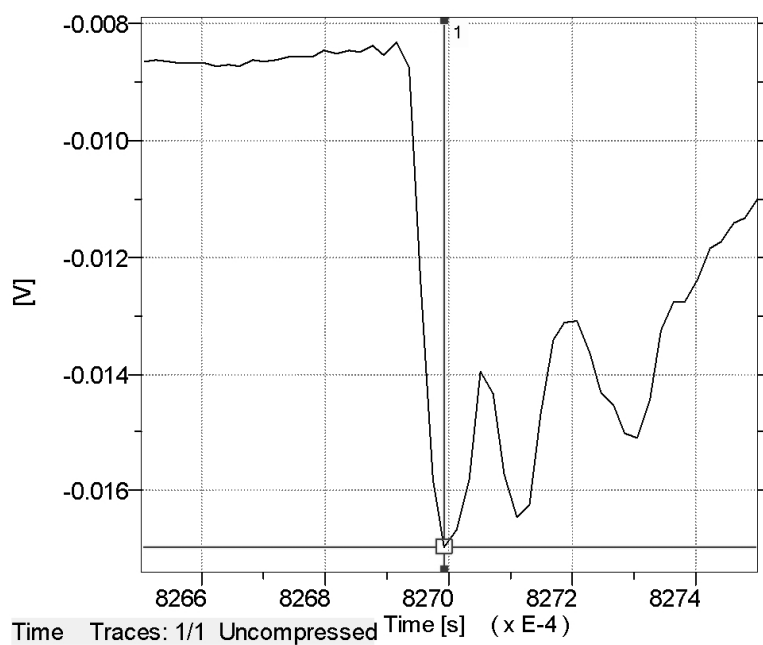


Рис. 8

На одній і тій же осцилограмі (рис. 9) з GDS-806S присутні зразу сигнали від обох датчиків за тих же інших умов, що й в попередньому досліді (рис. 7, 8). Верхня лінія записана від датчика WIKA A-10, нижня – від п'єзодатчика. Вертикальні курсори відмічають моменти реакції датчиків на фронт хвилі, різниця між якими  $\Delta = 1,48$  мс. Хоча, як уже відмічалось, п'єзодатчик, підключений до «вольтового» входу приладів, має низьку чутливість, але на фронт хвилі він реагує досить стрімко.

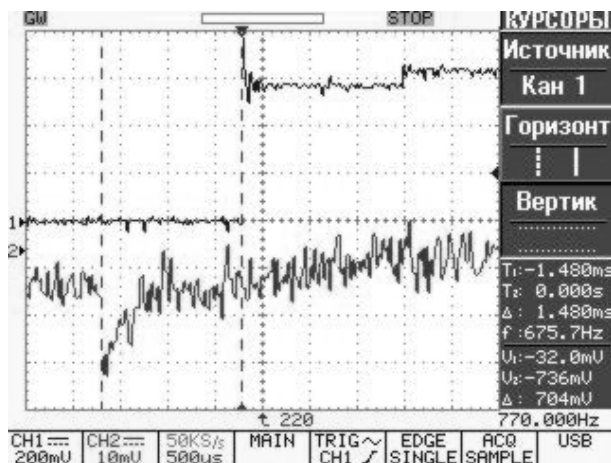


Рис. 9

Оскільки п'єзодатчик реагує на фронт хвилі практично миттєво, то можна вважати, що час відгуку датчика WIKA A-10 становить 1,5 мс – 2 мс.

За рис. 7 і 8 вже можна судити про крутизну фронту ударної хвилі. Видно, що хоча п'єзодатчик швидше відгукується на фронт хвилі, але він показує повільніше його наростання. Такі, на перший погляд, суперечливі співвідношення можна пояснити тим, що електричні заряди з п'єзодатчика швидко стікають через порівняно невеликий вхідний опір «вольтового» модуля реєстратора, спотворюючи крутизну наростання сигналу.

Конкретні часові інтервали наростання тиску у фронті ударної хвилі отримано за допомогою курсорів. Так, датчик WIKA A-10 на реєстраторі LMS SCADAS показав наростання сигналу від мінімального до максимального значення за 39 мкс (рис. 7), а п'єзодатчик – 58 мкс (рис. 8). На осцилографі GDS-806S датчик WIKA A-10 показав час наростання сигналу 40 мкс, що практично збігається з результатом на реєстраторі LMS SCADAS і збігається з періодом коливання мембрани датчика  $T = 0,39$  мкс.

Отже, датчик WIKA A-10 має такі часові характеристики: частота власних коливань мембрани 2,56 МГц; час відгуку 1,5 мс – 2 мс. Час наростання тиску у фронті ударної хвилі становить 40 мкс.

### 3. Нестационарне деформування тонкостінної балки під дією ударної хвилі.

Тонкостінна балка виготовлена зі склотекстоліту СФ-1-150 довжиною 0,21 м, шириною 0,064 м і товщиною 2,5 мм. Модуль пружності матеріалу визначався експериментально при розтягуванні зразка на випробувальній машині й дорівнював  $E=2,6 \cdot 10^{10}$  Па; густина матеріалу  $\rho = 1,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Балка встановлена в торець ударної труби, а решта просвіту торця була закрита фольгованим склотекстолітом. Вертикальні краї балки були жорстко закріплені. На балку з двох боків уздовж довгої сторони клеєм УВС-10ТС були наклеєні фольгові тензорезистори типу КФ 5П1-3-120-Б-12 з базою 3 мм і опором 120 Ом.

Датчик WIKA A-10 був встановлений на боковій стороні вимірювальної секції. Він був підключений до одного з каналів тензостанції LMS SCADAS. До іншого каналу в режимі «full bridge» і з одиницею вимірювання деформації мкс був підключений тензорезистор, розташований у центрі балки з протилежної до ударної хвилі сторони.



Розміри ударної труби такі, що за час 100 мс хвиля встигає тричі пробігти повз датчик, відбиваючись від торців. Період, з яким хвиля повторно повертається, становить 30,55 мс. Деформування балки за таких умов показано на рис. 10.

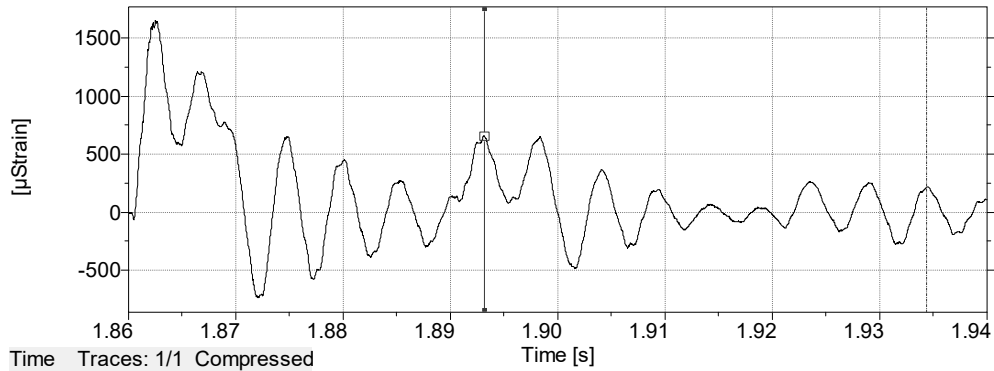


Рис. 10

Видно, що балка, коливаючись з певною частотою, реагує на повторні ударні хвилі. Вертикальні курсори відмічають відрізок часу тривалістю 41,2 мс за 8 періодів. Звідси період коливання балки становить 5,15 мс, а її власна частота – 194,1 кГц.

Цікавим є початок коливань балки під дією первинної ударної хвилі (рис. 11). Загалом, хвиля на рис. 11 подібна до хвилі на рис. 4 з тією відмінною, що протягом майже 7 мс вона на рис. 4 є практично сталою, а на рис. 11 вона дещо спадає через наявність щілин між балкою та заглушками. Відмічений курсором моменту часу 1,86098 с відповідає початку реакції датчика WKA A-10 на фронт хвилі. Тензодатчик на балці реагував в момент часу 1,86055 с, тобто на 0,43 мс раніше. Це видно з наглядного порівняння графіків, поданих в однаковому часовому масштабі на рис. 11 і 12, що неможливо було б помітити без датчика тиску.

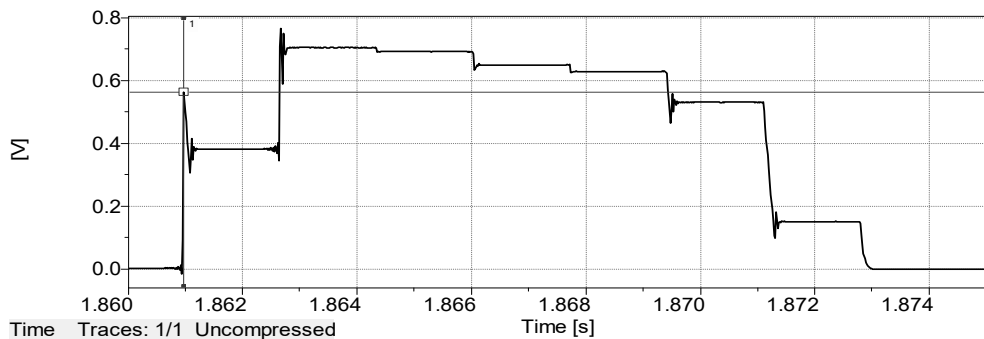


Рис. 11

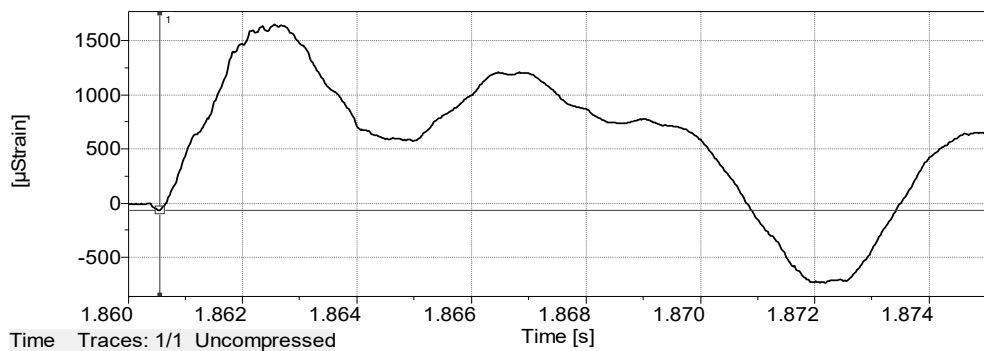


Рис. 12

Отже, п'єзодатчик реагує на фронт ударної хвилі найшвидше, пізніше реагує тензодатчик на балці через її інерційність, ще пізніше – датчик WIKA A-10 через особливості його електроніки.

#### 4. Динаміка музичних інструментів.

Реєстратор LMS SCADAS Mobile використовувався також для вимірювання часових та амплітудних характеристик виконання музичних творів на ударних інструментах [2, 17]. Описаний датчик тиску WIKA A-10 було використано для пошуку кореляцій між амплітудою коливань мембрани барабана і тиском в гармоні (гармоніці) (рис. 13) під час спільного виконання музичного твору (танцювального награвання).

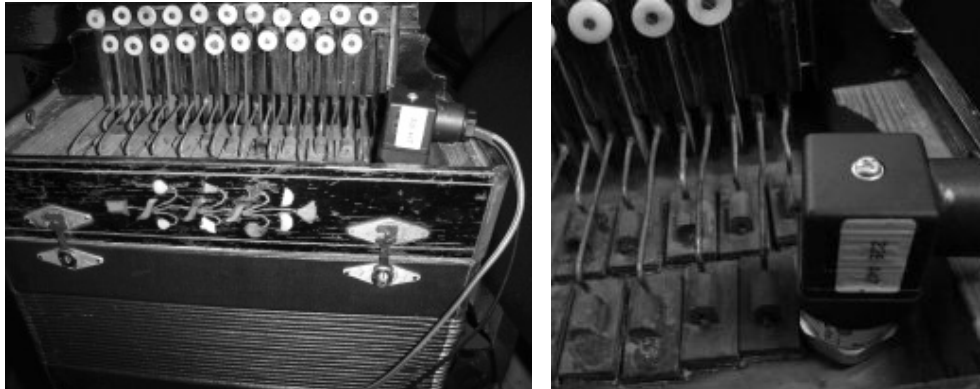


Рис. 13

Під час виконання награвання реєструвались два сигнали: один від тензодатчика, наклеєного на мембрану барабана, а другий від датчика тиску, змонтованого на терті в рідко використовуваний ігровий отвір правої клавіатури гармоніки. Оскільки даний датчик реєструє тільки надлишковий над атмосферним тиск, то розрідження при розтягуванні міха гармоніки не реєструвалось.

На рис. 14 у співмірному масштабі показано осцилограми сигналів від обох датчиків в часовому проміжку стискання міхи гармоніки. Вздовж ординати відкладено

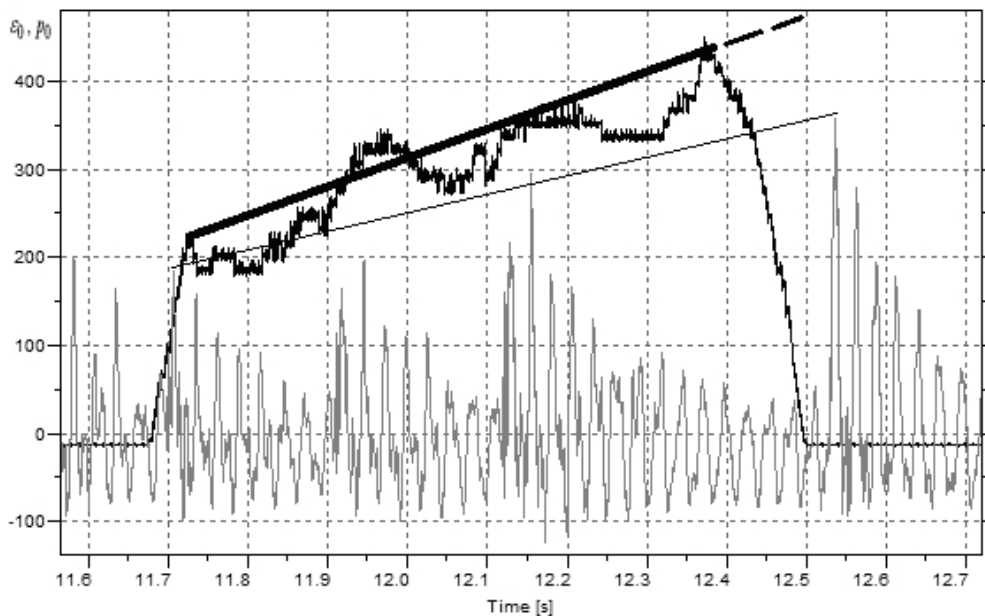


Рис. 14

безрозмірні параметри  $\varepsilon_0$  і  $p_0$ , які відповідають деформації  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot 10^{-6}$  і тиску  $p = 4p_0$  Па. Шумоподібний вигляд осцилограми тиску (верхня крива) пояснюється описаними вище особливостями електроніки датчика.

Для порівняння сигналів обрано фрагмент, який відповідає ритмічній групі з двох восьмих та однієї четвертної тривалості та (для осцилограми, яка відображає удари по мембрані барабану) першому удару наступної ритмічної групи. На осцилограмі, яка відповідає тиску всередині гармоні, момент, який відповідає нанесенню цього удару, не відображено через зміну напрямку руху міху на розтягування.

Осцилограми тиску в гармоні та деформації мембрани барабана демонструють синхронне зростання цих явищ (позначене прямими лініями між крайніми точками вибраного фрагменту). Ріст тиску всередині гармоні та збільшення деформації мембрани (що відповідає збільшенню сили удару по ній) на слух сприймаються як зростання гучності.

Отже, застосування датчика тиску WIKA A-10 та реєстратора LMS SCADAS Mobile дозволило побачити спільні музичні явища (зростання гучності), які досягаються різними шляхами (постійне підтримування та збільшення тиску в гармоні та дискретні удари різної сили по мембрані). Одночасне зростання гучності виконавцями свідчить про їх спільне відчуття організації та розвитку музики під час виконання танцювального награвання.

### Висновки.

Експериментально встановлено параметри ударної хвилі, що генеруються наявною ударною трубою діафрагменного типу. Виявлено такі характерні особливості реєстрації параметрів ударної хвилі.

1. Датчик тиску WIKA A-10 видає дані дискретними в часі порціями сталої величини тривалістю біля 1,7 мс. Після стрибкоподібної зміни рівня сигналу спостерігаються згасаючі коливання. Перед фронтом сигналу бувають передвісники у вигляді наростаючого коливального процесу.

2. Датчик WIKA A-10 має такі часові характеристики: частота власних коливань мембрани 2,56 МГц; час відгуку на фронт хвилі 1,5 мс – 2 мс.

3. Час наростання тиску у фронті ударної хвилі становить 40 мкс.

4. П'єзодатчик реагує на фронт ударної хвилі найшвидше, пізніше реагує тензодатчик на балці, ще пізніше – датчик WIKA A-10.

Наукові дослідження, результати яких опубліковано в даній статті, виконано за рахунок бюджетної програми «Підтримка пріоритетних напрямків наукових досліджень» (КПКВК 6541230) та «Програми наукового приладобудування НАН України» (КПКВК 6541030).

**РЕЗЮМЕ.** Описано засоби реєстрації динамічних механічних процесів в наукових дослідженнях, зокрема, які стосуються музичного виконавства. Використано реєстратор LMS SCADAS Mobile, датчик динамічного тиску WIKA A-10, тензорезистори. Встановлено деякі не регламентовані виробником особливості процесу реєстрації динамічного тиску датчиком WIKA A-10. Для пошуку кореляцій між амплітудою коливань мембрани барабана і тиском в гармонії під час спільного виконання музики до народного танцю застосовано реєстратор з датчиками тиску і деформації.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** тензометрія, деформація, тиск, ударна труба, гармоніка, народна музика.

1. А.с. 1059456 (СРСР) Датчик импульсных давлений / И.И. Аникьев, М.И. Михайлова, А.С. Спировский, Е.А. Сущенко // Бюлл. изобр. –1983. – № 45. – С. 181.
2. Максимюк В.А., Фетисов І.Б. Дослідження інтенсивності та тривалості звуків ритмічного супроводу на барабані награвання «український гопак» // Студії мистецтвознавчі. – Київ: ІМФЕ, 2019. – №1. – С. 7 – 18.
3. Alay E., Skotak M., Misistia A., Chandra N. Dynamic loads on human and animal surrogates at different test locations in compressed-gas-driven shock tubes // Shock Waves. – 2018. – 28. – P. 51 – 62.

4. *Anik'ev I.I.* Reflection of weak shock waves in air from plane obstacles made of various materials // *Soviet Appl. Mech.* – 1979. – **15**, N 6. – P. 552 – 554.
5. *Anik'ev I.I., Maksimyyuk V.A., Mikhailova M.I., Sushchenko E.A.* Incidence of a Shock-Wave on a Cantilever Plate Coupled with an Elastic Rod // *Int. Appl. Mech.* – 2013. – **49**, N 4. – P. 482 – 487.
6. *Anik'ev I.I., Maksimyyuk V.A., Mikhailova M.I., Sushchenko E.A.* Experimental Determination of the Amplification Factor for an Elastic Cantilever-Beam-Bar System // *Int. Appl. Mech.* – 2016. – **52**, N 4. – P. 398 – 403.
7. *Beltman W.M., Burcsu E.N., Shepherd J.E., Zuhai L.* The Structural Response of Cylindrical Shells to Internal Shock Loading // *J. Pressure Vessel Technol.* – 1999. – **121**, N 3. – P. 315 – 322.
8. *Downes S., Knott A., Robinson I.* Towards a shock tube method for the dynamic calibration of pressure sensors // *Phil. Trans. R. Soc. A.* – 2014. – 372(2023). – P. 299 – 316.
9. *Gaydon A.G., Hurler I.R.* *The Shock Tube in High-Temperature Chemical Physics.* – London: Chapman and Hall, 1963. — 307p.
10. *Fomin N.A.* 110 years of experiments on shock tubes // *J. Engng. Physics and Thermophysics.* – 2010. – **83**, N 6. – P. 1118 – 1135.
11. *Hirschberg A., Gilbert J., Msallam R., Wijnands A.* Shock waves in trombones // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1996. – **99**, N 3. – P. 1754 – 1758.
12. [https://www.wika.ua/upload/DS\\_PE8160\\_ru\\_ru\\_35761.pdf](https://www.wika.ua/upload/DS_PE8160_ru_ru_35761.pdf).
13. *Khawaja H.A., Messahel R., Ewan B., Mhamed S., Moatamedi M.* Experimental and Numerical Study of Pressure in a Shock Tube // *J. Pressure Vessel Technol.* – 2016. – **138**, N 4. – 041301 (6 pages).
14. *Krehl P.O.K.* *History of Shock Waves, Explosions and Impact: A Chronological and Biographical Reference.* – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – 1297 p.
15. *Kuriakose M., Skotak M., Misistia A., Kahali S., Sundaramurthy A., Chandra N.* Tailoring the blast exposure conditions in the shock tube for generating pure, primary shock waves: The end plate facilitates elimination of secondary loading of the specimen // *PLoS One.* – 2016. – **11**, N 9. – e0161597.
16. *Lugovoi P.Z., Meish V.F., Orlenko S.P.* Numerical Simulation of the Dynamics of Spherical Sandwich Shells Reinforced with Discrete Ribs Under a Shockwave // *Int. Appl. Mech.* – 2020. – **56**, N 5. – P. 590 – 598.
17. *Maksimyyuk V.A., Sushchenko E.A., Fetisov I.B.* Technique of Strain-Gauge Measurement of the Dynamic Characteristics of Percussion Music // *Int. Appl. Mech.* – 2020. – **56**, N 2. – P. 186 – 191.

Надійшла 01.12.2020

Затверджена до друку 24.06.2021