

АКУСТИКА ХРАМІВ КИЇВСЬКОЇ РУСІ

І. В. ВОВК, В. Т. ГРІНЧЕНКО, А. П. МАКАРЕНКОВ,
Л. М. ОСИПЧУК, М. П. ТРОХИМЕНКО

*Інститут гідромеханіки НАН України, Київ,
НДІ будівельних конструкцій Держкоммістобудування України, Київ*

Отримано 15.12.97

Стаття присвячена вивченню акустичних властивостей основних приміщень Софіївського собору та Кирилівської церкви у місті Києві. Зокрема, визначені час реверберації, нерівномірність звукового поля, структура ранніх звукових відбиттів та рівні шуму. Проведені дослідження є частиною започаткованої програми по вивченню акустики храмів Київською Русі.

ВСТУП

Архітектурне мистецтво Київської Русі є визначним явищем світової середньовічної культури. Кам'яне будівництво культових споруд було відоме ще в середині X сторіччя. Однак блискучий розквіт давньоруської архітектури припадає на XI–XII ст., коли будуються Софіївський, Успенський, Михайлівський Золотоверхий собори та Кирилівська церква у Києві, а також Спаський собор та П'ятницька церква у Чернігові [1–7]. Слід зазначити, що попри все розмаїття архітектурних особливостей згаданих храмів, їх основні планувальні характеристики є вельми подібними.

Однією з найважливіших особливостей соборів є їхні специфічні акустичні властивості, покликані створити неповторний емоційний стан у відвідувачів церковної служби. Відповідна акустика забезпечувалась завдяки своєрідному внутрішньому об'ємно-планувальному вирішенню, характеру облицювання внутрішніх поверхонь, а також використанням спеціальних акустичних пристроїв – голосників [8]. Тут слід зазначити, що в архітектурній акустиці голосниками називають керамічні (або мідні) посудини (горщики, амфори), які вбудовуються в стіни та склепіння соборів. При цьому їх відкриті горловини спрямовані в приміщення. Основне призначення голосників – позитивний вплив на акустичні властивості приміщень у певному частотному діапазоні. Відзначимо, що голосники використовувались зі стародавніх часів і були обов'язковим акустичним елементом у церковному будівництві Русі X–XII сторіч [8]. Зокрема, голосники присутні в Софіївських соборах Києва та Новгород, Кирилівській церкві Києва, П'ятницькій церкві Чернігова. Як показують літературні джерела, голосники були наявні й у Михайлівському Золотоверхому соборі [2, 3, 5]. На жаль, до теперіш-

нього часу ні Успенський, ні Михайлівський Золотоверхий собори не збереглися. Наявні архіви та літературні матеріали стосуються виключно зовнішнього вигляду, інтер'єрів та архітектурно-планувальних даних. Що ж до матеріалів про акустичні властивості приміщень соборів, то їх просто не існує. Це пов'язано як з об'єктивними причинами – відсутністю на початку XX сторіччя відповідної вимірювальної акустичної апаратури, так і суб'єктивними – відсутністю державного та соціального замовлення на дослідження культових споруд у період радянської влади.

Тим часом, дані про акустичні властивості соборів XI–XII століть, які збереглися до нашого часу, мають велике наукове значення, оскільки їх аналіз міг би пролити додаткове світло на методи та секрети архітектурного мистецтва Київської Русі. Окрім того, вивчення акустичних властивостей цих храмів має й практичний аспект, оскільки в наш час створилися певні передумови для відродження видатних пам'яток Київської Русі, зокрема в місті Києві. У першу чергу до таких пам'яток належать Михайлівський Золотоверхий та Успенський (Киево-Печерської лаври) собори. Як видається нам, базовою концепцією при проведенні відновлення повинне бути максимально можливе відтворення усіх особливостей згаданих храмів – як архітектурних форм, так і акустичних властивостей, характерних для храмів тієї епохи.

Виникає питання: яким чином отримати дані відносно акустичних характеристик Михайлівського Золотоверхого собору? Одним з можливих шляхів вирішення цієї проблеми є натурні вимірювання акустичних характеристик у близьких за часу спорудження та архітектурно-планувальними характеристиками храмах, що збереглися на сьогоднішній день.

У сучасній архітектурній акустиці існує ряд па-

раметрів, які дозволяють тією чи іншою мірою оцінювати акустику приміщень. Одним з найважливіших інтегральних параметрів є час реверберації T (с), тобто час після вимкнення джерела звуку, за який звукова енергія у приміщенні зменшується у мільйон разів (на 60 дБ) [9]. Час T залежить від багатьох характеристик приміщення, перш за все, від його об'єму та звукопоглинаючих властивостей обмежуючих поверхонь. Не менш важливими параметрами є необхідний ступінь дифузності звукового поля у приміщенні та структура звукового сигналу, відбитого від обмежуючих поверхонь. Істотну роль грає звукоізоляція огорожувальних конструкцій, тобто їх здатність ослаблювати шуми джерел, що знаходяться поза приміщенням.

Як показав аналіз архітектурно-планувальних вирішень та об'ємів головних приміщень храмів XI–XII сторіч, найбільш близькими до Михайлівського Золотоверхого собору можна вважати існуючі нині Кирилівську церкву та Софіївський собор міста Києва, а також собор Апостолів у селі Білогородка під Києвом [3–6]. Серед перерахованих споруд найбільш доступними для проведення акустичних вимірювань виявились Кирилівська церква та Софіївський собор міста Києва. Об'єм головних приміщень вказаних храмів становить приблизно 5000 м³ і 7500 м³ (об'єм головних приміщень Михайлівського Золотоверхого собору становить ~ 4300 м³). Усі ці споруди побудовані приблизно в один і той же час, що дозволяє сподіватися на близькість за своїми характеристиками матеріалів, застосованих для кладки стін, куполів і склепінь, а також облицювальних матеріалів. Крім того, у згаданих храмах, аналогічно до Михайлівського собору, наявні голосники як у барабані головного купола, так і у бокових склепіннях. Зазначені особливості дають певні підстави сподіватися, що акустичні характеристики Софіївського собору та Кирилівської церкви можуть бути взяті за основу при реконструкції Михайлівського собору.

Результати акустичних вимірювань у Софіївському соборі і Кирилівській церкві та їх аналіз викладені в наступних розділах.

1. МЕТОДИКА ВИМІРЮВАНЬ

Вимірювання передбачали визначення таких характеристик приміщень:

- час реверберації;
- однорідність звукового поля;

- рівні проникаючого до приміщення шуму від зовнішніх джерел;

- структура ранніх звукових відбиттів.

Натурні вимірювання акустичних характеристик проводились у відповідності до вимог діючих на теперішній час в Україні вітчизняних та міжнародних стандартів і рекомендацій [9–11]. Застосована апаратура відповідала вимогам стандартів на проведення акустичних вимірювань і мала свідоцтво про держпівірку за ГОСТ 8.002-71.

Частотний діапазон вимірювань часу реверберації складав 125 ÷ 4000 Гц. У процесі проведення вимірювань контролювався рівень завад у приміщенні. При цьому рівень корисного сигналу в кожній вимірювальній частотній смузі перевищував рівень завад не менш, як на 35 дБ. Випромінювачі звуку (звукові колонки) були встановлені у двох найбільш характерних місцях: на амвоні та на хорах (балконі). Вимірювальний мікрофон встановлювався в ряді точок, що охоплювали усі основні зони приміщення.

За допомогою випромінюючого тракту формувалася звуковий сигнал “білого шуму” шириною в одну октаву з рівнем не менш, як 80 ÷ 90 дБ. Після різкого обриву (вимикання) сигналу реєструвалася рівнеграма процесу реверберації.

Вимірювання однорідності звукового поля проводились в найбільш характерних октавних смугах низькочастотного (125 Гц), середньочастотного (500 Гц) та високочастотного (2000 Гц) діапазонів. При цьому, звукові колонки, встановлені на амвоні, випромінювали смуги “білого шуму” в напрямі, протилежному основному приміщенню. У різних точках приміщення, розташованих, як правило, в зонах з переважанням відбитого звуку, реєструвались октавні рівні звукового тиску.

Вимірювання рівнів проникаючого у приміщення шуму проводились за умови, що всі внутрішні джерела шуму були вимкнені. При цьому вимірюваний фоновий рівень характеризував вплив зовнішніх джерел шуму (шумів міста) на акустичний режим приміщення. Вимірювання проводились в октавних частотних смугах у діапазоні 63 ÷ 8000 Гц. Під час усіх проведених вимірювань висота розміщення мікрофона над рівнем підлоги становила 1.5 м.

2. АНАЛІЗ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

2.1. Час реверберації

Вимірювання часу реверберації T (с) проводились у кількох точках незаповнених людьми

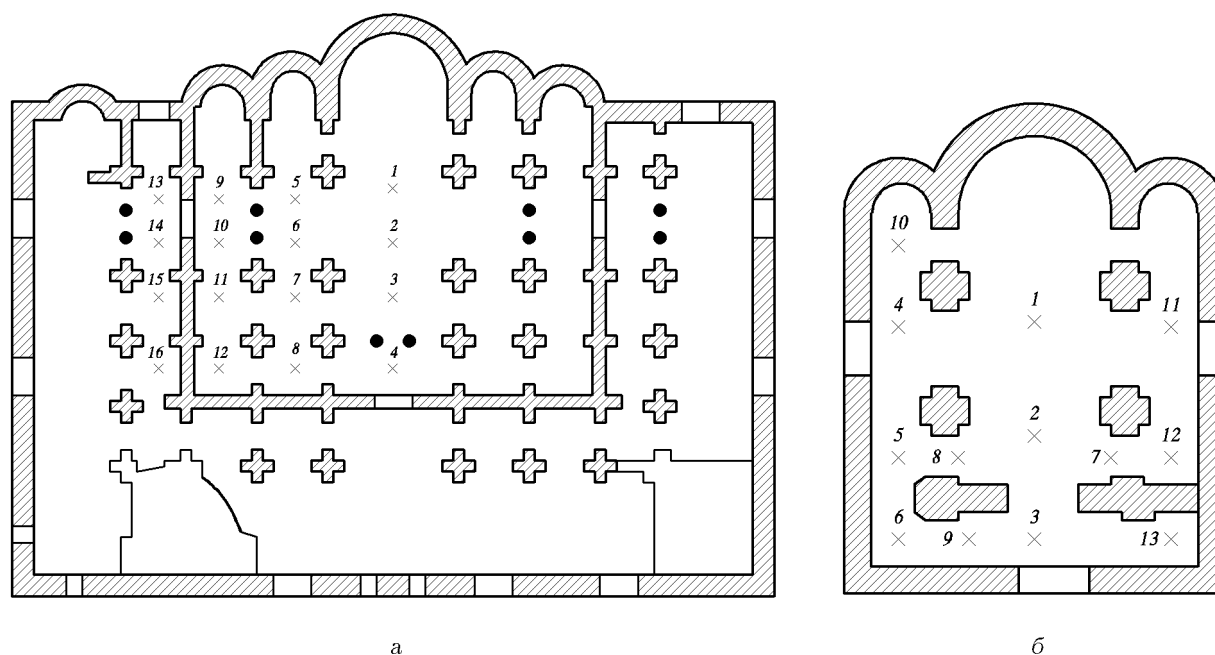


Рис. 1. Плани основних приміщень (1–16 – точки, в яких проводились вимірювання):

а – Софіївський собор, б – Кирилівська церква

приміщеннях храмів. Схема розміщення точок показана на планах храмів (рис. 1). При цьому точки були розташовані у центральній частині приміщень і на хорах. У кожній точці вимірювань реєструвались від 3-х до 5-и ревербограм.

Результати вимірювань у вигляді частотних характеристик середньоарифметичних значень часу реверберації по всіх точках вимірювання в приміщеннях храмів наведені на рис. 2. Слід зазначити, що розкид значень часу реверберації у різних зонах приміщення виявився незначним. У діапазоні частот $250 \div 4000$ Гц значення T для різних зон відрізняються не більш, як на 10%. В цілому, час реверберації у головних приміщень храмів складає:

- в області низьких частот ($125 \div 250$ Гц)
 $T = 5.0 \div 6.1$ с;
- в області середніх частот ($500 \div 1000$ Гц)
 $T = 4.9 \div 5.1$ с;
- в області високих частот ($2000 \div 4000$ Гц)
 $T = 2.6 \div 4.8$ с.

При цьому в діапазоні частот $500 \div 2000$ Гц час реверберації приміщень обох храмів має практично однакові значення. Слід зазначити, що на час реверберації (особливо це стосується Софіївського

собору) впливає наявність більшої кількості притворів, об'єми яких зв'язані арокними переходами з центральною частиною.

Порівняння одержаних експериментальних даних і оптимальних величин T (згідно нині діючих нормативних рекомендацій оптимальний час реверберації для заповнених людьми приміщень такого об'єму становить $1.2 \div 1.3$ с, а згідно рекомендацій для храмів, викладених Контюрі у [12] – $1.7 \div 1.95$ с) вказує на те, що значення часу реверберації в обстежених храмах є дуже великим. Цікаво відзначити, що час реверберації в області низьких частот у Троїцькому соборі у Костромі [13], котрий збудовано значно пізніше (десь у XVII столітті) і має об'єм головних приміщень 3200 м^3 , також вельми великий (див. рис. 2) і близький до часу реверберації Софіївського собору та Кирилівської церкви. Дещо несподіваним є порівняно мале значення часу реверберації у діапазоні $500 \div 2000$ Гц. Можливо, це пов'язано з особливостями інтер'єра Троїцького собору. Таким чином, враховуючи отримані результати, а також відомі нам дані відносно часу реверберації інших храмів, приходимо до висновку, що такі великі значення часу реверберації слід вважати характерними для православних храмів взагалі та храмів епохи Київської Русі зокрема.

2.2. Однорідність звукового поля

Однорідність звукового поля є однією з основних характеристик приміщень з природною акустикою. У приміщеннях Софіївського собору і Кирилівської церкви ступінь дифузності поля визначається об'ємно-планувальним вирішенням їх центральної частини, формою та розмірами куполів, вівтаря, балкона та склепінь. Значну роль у розсіянні звукових хвиль грає розчленування стін та наявність колон складної геометричної форми. Як зазначалось вище, прийнятий метод оцінки дифузності поля ґрунтується на вимірюваннях рівнів звукового тиску в різних точках (зонах) приміщення при роботі ненапрявленого джерела звуку. Точки вимірювання однорідності поля показані на рис. 1.

Ступінь однорідності поля визначався за різницею рівнів звукового тиску (δ_i) у досліджуваній точці та у точці, що була прийнята за базову, в октавних смугах з середньоарифметичними частотами 125, 500 та 2000 Гц. Результати вимірювань наведені у таблиці.

Аналіз одержаних результатів дозволяє зробити висновок про те, що у приміщенні явно виділяються три зони сприйняття інформації від джерела: зона прямого звуку, зона прямого і відбитого звуку і зона акустичної тіні, обумовленої екрануванням колонами великого перерізу. Так, для Кирилівської церкви у зонах прямого, прямого і відбитого звуку (точки 2–4, 7, 8 та 11) неоднорідність звукового поля становить 0 ÷ 4 дБ в усьому частотному діапазоні. У зоні відбитого звуку – акустичної тіні (точки 5, 6, 9, 10 та інші симетричні) – звукове поле є менш однорідним, величина $\delta_i = 1 \div 5$ дБ. На хорах (точки 14–16) відхилення мають ще більші значення (до 5 ÷ 7 дБ); ці точки, на жаль, неможливо було нанести на рис. 1, б тому, що вони розміщувались на другому поверсі приміщення церкви. Більш неоднорідним, особливо в області низьких частот, є поле відбитого звуку в приміщенні Софіївського собору, де величина δ_i складає 6 ÷ 13 дБ. Таку неоднорідність можна пояснити більшою кількістю притворів з арокними прорізами невеликих розмірів. У цілому, можна припустити, що такий ступінь однорідності є характерним для приміщень складного об'ємно-планувального вирішення, до яких належать стародавні церкви та собори.

2.3. Рівні шуму

У приміщеннях соборів та церков, як і у всіх інших приміщеннях, де необхідно з достатньою

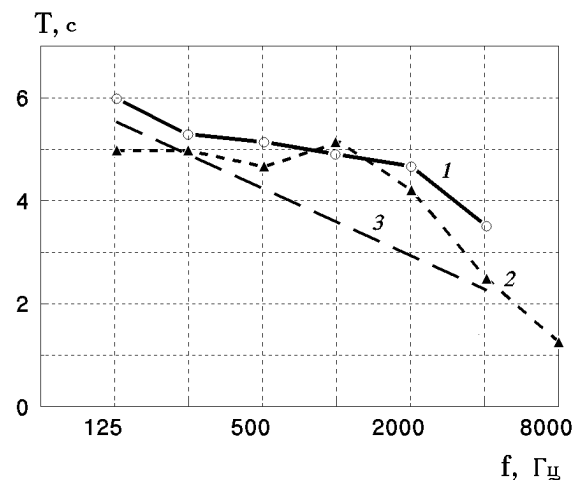


Рис. 2. Час реверберації:

1 – Софіївський собор (м. Київ),
2 – Кирилівська церква (м. Київ),
3 – Троїцький собор Іпатіївського монастиря

Таблиця. Результати вимірювання однорідності звукового поля по площі приміщення та хорів (Кирилівська церква/Софіївський собор)

Точки вимір.	Положення точки	δ_i		
		125	500	2000
1	центр. част.	0 / 0	0 / 0	0 / 0
2	—”—	-4 / -1	0 / 0	-2 / -1
3	—”—	-3 / -3	0 / 0	-3 / 2
4	—”—	-1 / -5	0 / -1	-1 / -2
5	—”—	-3 / -4	0 / 0	-2 / -1
6	—”—	-4 / -7	-2 / -2	-4 / -3
7	—”—	-1 / -6	0 / -3	0 / -4
8	—”—	0 / -9	-1 / -5	-2 / -4
9	—”—	-4 / -6	-2 / -3	-4 / -3
10	—”—	-4 / -6	-2 / -3	-5 / -4
11	—”—	-1 / -8	-1 / -4	-1 / -5
12	—”—	-1 / -11	-1 / -7	-2 / -7
13	—”—	-4 / -8	-2 / -5	-3 / -6
14	хори/галерея	-5 / -10	-6 / -7	-6 / -7
15	—”—	-6 / -12	-7 / -7	-7 / -9
16	—”—	-6 / -13	-5 / -10	-5 / -9

надійністю сприймати інформацію (мова, спів), повинен бути забезпечений вельми низький рівень шуму від зовнішніх джерел. Рівень шуму в приміщенні визначається місцем розташування будівлі та звукоізоляційними властивостями його обгороджуваних конструкцій. Основним джерелом зовнішнього шуму поблизу будівлі Кирилівської церкви та Софіївського собору є, відповідно,

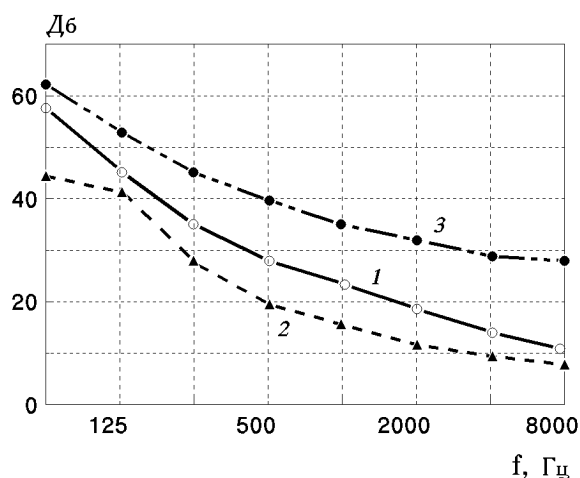


Рис. 3. Рівні шуму:
 1 – Софіївський собор (м. Київ),
 2 – Кирилівська церква (м. Київ),
 3 – припустимі рівні шуму для глядацьких залів

міська магістраль і площа з інтенсивним рухом транспорту. Відстань від будівель до джерел шуму в одному й другому випадках становить приблизно 150 м.

Вимірювання рівнів шуму в приміщеннях собору та церкви проводились у денний час, що є характерним для роботи згаданих споруд. Результати вимірювань наведені на рис. 3. Максимальні значення рівнів шуму (42 ÷ 56 дБ), як і слід було очікувати, спостерігаються в області низьких частот, що відповідає спектру транспортного шуму. З ростом частоти рівні шуму знижуються і складають 10 ÷ 14 дБ у високочастотній області. Порівнюючи вимірювані значення з рівнями, які прийняті за нормативні, можна зробити висновок про те, що шумовий режим у приміщенні Кирилівської церкви та Софіївського собору знаходиться у припустимих межах.

2.4. Структура ранніх звукових відбиттів

Структура ранніх звукових відбиттів визначалась на основі фіксації відгуку приміщення на імпульсний сигнал в різних його зонах. На рис. 4 приведені відгуки за перші 70 ÷ 100 мс в деяких точках приміщення Софіївського собору. Аналіз цих результатів показує, що ранні відбиття приходять в точки 1 і 2 із запізненням у 20 і 30 мс. У точку 10, розташовану у притворі, приходять досить слабкі відбиття із запізненням близько 40 мс. Також відзначимо, що в точках, розташованих в зоні прямого звуку, повне наростання енергії відгуку на імпульсний сигнал приходить з більшою

крутизною, ніж в точках, куди приходить тільки відбитий звук. Це вказує на те, що енергія корисних ранніх відбиттів в таких зонах храму значно менша.

На жаль нам не вдалося у повній мірі провести дослідження енергетичних параметрів імпульсних відгуків, бо деякі фрески на внутрішніх стінах соборів знаходились в аварійному стані і інтенсивні звукові сигнали могли б завдати їм подальшої шкоди.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз ряду архівних документів та літературних джерел у частині методів та конструктивних особливостей, які застосовувались будівничими Київської Русі XI–XII сторіч при створенні православних храмів. Встановлено, що для забезпечення відповідних акустичних властивостей приміщень храмів використовувались як певні архітектурно-планувальні вирішення (форма склепінь, куполів, колон та ін.), так і спеціальні акустичні пристрої та склади штукатурок.
2. Вельми вірогідно, що для впливу на акустичні якості головних приміщень храмів у певній ділянці спектру звукових частот, широко використовувались голосники (у сучасному уявленні – резонатори Гельмгольца), встановлені у парусах куполів та стінах. Зазначимо однак, що характер цього впливу потребує подальшого, більш ретельного дослідження.
3. Проведено попередні натурні вимірювання деяких акустичних характеристик Кирилівської церкви та Софіївського собору, зокрема, визначені час реверберації, однорідність звукового поля, а також рівень шуму в основних приміщеннях. Також встановлена відсутність явних акустичних дефектів, незважаючи на складне об'ємно-планувальне вирішення приміщень храмів. Дещо високим, виходячи з сучасних вимог сприйняття мови та співу, є час реверберації. Проте, очевидно це явище слід вважати типовим для споруд культового призначення.
4. Результати аналізу літературних джерел, а також експериментальні та теоретичні дані, одержані у процесі роботи, створюють певні передумови для проведення науково обгрунтованого проектування та будівництва Михай-

лівського Золотоверхого собору з урахуванням відновлення його акустичних властивостей.

ПОДЯКА

Автори висловлюють вдячність заступнику директора по науці заповідника “Софія Київська” І. Ф. Тоцькій за надану можливість провести акустичні вимірювання у Софіївському соборі та Кирилівській церкві. Авторі також вдячні співробітникам АТ “Київпроект” В. П. Спициній та М. Ф. Москаленко за допомогу при проведенні натурних вимірювань у Кирилівській церкві.

1. Асеев Ю. С. Древний Киев (X–XI вв).– К.: Госстройиздат, 1982.– 109 с.
2. Карнибіда А. А. Чернігів (архітектурно-історичний нарис).– К.: Наукова думка, 1980.– 278 с.
3. Каргер М. К. Древний Киев (в 2-х томах). Т. 2.– М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961.– 661 с.
4. Лошкарев П. А. Киевская архитектура X–XII веков.– Киев: Типография С. В. Кульженко, 1875.– 38 с.
5. Мистецтво Київської Русі.– К.: Мистецтво, 1989.– 362 с.
6. Толочко П. П. Древний Киев.– К.: Наукова думка, 1983.– 327 с.
7. Шулькевич М. М., Дмитренко Т. Д. Киев (архитектурно-исторический очерк).– К.: Будівельник, 1978.– 464 с.
8. БСЭ. Т. 11. Изд. II. 1953. С. 632.
9. Макриненко Л. И. Акустика общественных зданий.– М.: Стройиздат, 1986.– 170 с.
10. ГОСТ 23337-78*. Методи вимірювання шуму на сельбшній території та в приміщеннях житлових і громадських будинків.
11. ГОСТ 24146-89. Зрительные залы. Методы измерения времени реверберации.
12. Контюри Л. Киев (архитектурно-исторический очерк).– М.: Гос. издат. лит. по строительству и стройматериалам, 1960.– 235 с.
13. Ланэ М.Ю. Акустика Троицкого собора Ипатьевского монастыря в Костроме // Акуст. ж.– 1994.– 40, N 1.– С. 93–95.

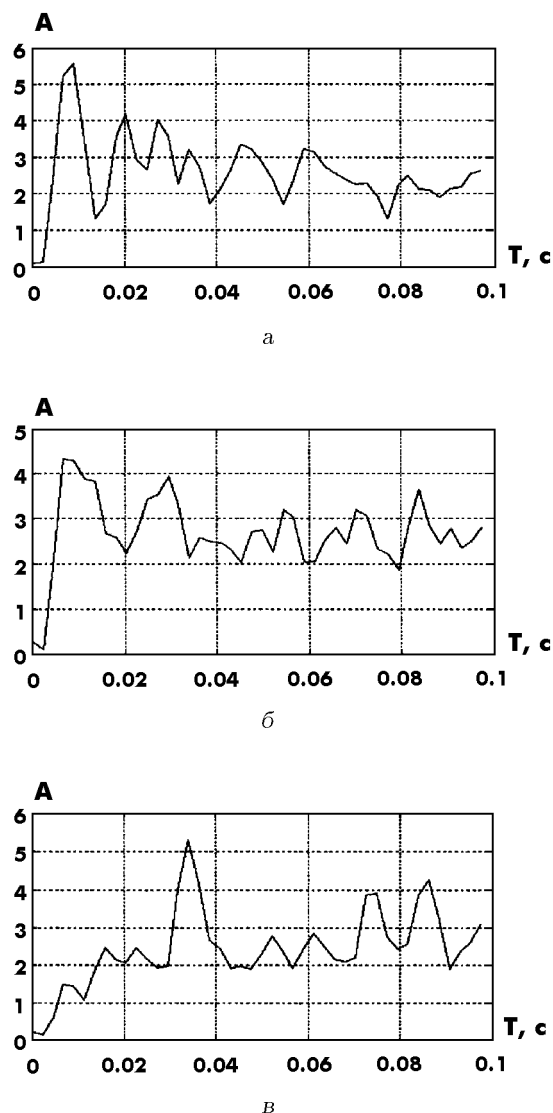


Рис. 4. Відгуки імпульсних сигналів у Софіївському соборі (A – амплітуда відгуку):

а – точка 1, б – точка 2, в – точка 10