

СУЧАСНІ АВІАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 629.735.015.4:533.6.013.42(045)

¹С.О. Іщенко, д-р техн. наук

²Р.М. Павловський, канд. техн. наук

³О.І. Жданов, канд. техн. наук

⁴В.В. Дегтярьов, канд. техн. наук

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ВИНИКНЕННЯ АЕРОПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ ПОГАНО ОБТІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ У ТРУБНОМУ ЕКСПЕРИМЕНТІ

^{1,2,3} НАУ, кафедра аеродинаміки та льотної експлуатації,

⁴НАУ, кафедра інформаційних технологій: e-mail: ischenko@nau.edu.ua; ^{2,3}aerodyn@nau.edu.ua

Наведено результати експериментальних досліджень моделі погано обтічної конструкції в аеродинамічній трубі ТАД-2 Національного авіаційного університету та їх аналіз з метою з'ясування можливого виникнення пружних коливань конструкції під дією аеродинамічних сил з боку повітряного потоку. Запропоновано й апробовано методику визначення спектральних характеристик пульсаційної складової швидкості повітряного потоку в супутньому сліді за моделлю за допомогою приймача повітряного миттєвого тиску.

Вступ

Визначення вітрових навантажень на інженерні споруди різного призначення, будь то висотні споруди, мости, антени, башти, є необхідною потребою практики їхнього будування. Наряду з цим однією з найважливіших інженерних задач є прогнозування можливості виникнення явищ аеропружної нестійкості та визначення засобів їх уникнення. Об'єктом експериментальних комплексних досліджень в аеродинамічній трубі ТАД-2 Національного авіаційного університету є модель повної конфігурації хреста дзвіниці собору Української греко-католицької церкви, виготовленої в масштабі М 1:2 відносно натурі (рис. 1). Ця модель хреста дзвіниці одночасно являється моделлю хреста центрального куполу, тому що великий хрест центрального куполу має усі розміри у 5/3 рази більшими від відповідних розмірів малого хреста куполів дзвіниць.

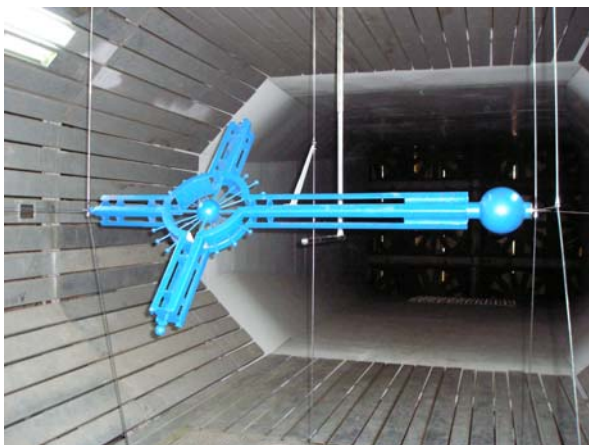


Рис. 1. Модель хреста в робочій частині ТАД-2 під час експерименту

Особливість конструктивної композиції хрестів собору полягає у суттєвій відносній прозорості металевої конструкції хреста для повітряної течії у вітряну погоду.

Велика кількість елементів хреста погано обтічної форми (кутики, пласкі та напівкруглі перетинки, циліндричні ділянки та кулі різного діаметра) при зміні напрямку вітру перебуває одночасно під різними кутами обтічності. Багато із цих елементів в діапазоні напрямку вітру $\beta = 0-360^\circ$ постійно знаходяться на закритичному режимі обтічності.

Зазначені особливості конструкції хреста визначають необхідність дослідження явищ аеропружності. Розрахунковими методами визначити точні інтегральні аеродинамічні характеристики такого об'єкта не можливо. Тому був обраний шлях фізичного моделювання обтічності моделі хреста в аеродинамічній трубі ТАД-2 Національного авіаційного університету.

Аналіз досліджень і публікацій

Протягом останніх, принаймні, десяти років наукова група кафедри аеродинаміки регулярно здійснює експериментальні дослідження вітрових навантажень, розподілу тиску на поверхні будівель, пружних коливань інженерних споруд за замовленнями сторонніх організацій. Так, у 2001 р. були виконані дослідження динамічно подібної моделі монументу незалежності України в м. Києві [1]. При цьому були визначені частоти вимушених коливань моделі під дією аеродинамічних сил і розроблені рекомендації щодо демпфірування цих коливань. У 2004 р. були виконані дренажні та вагові випробування моделі житлового комплексу [2].

Залежності аеродинамічних коефіцієнтів моделі будинку від азимуту вітру були проаналізовані для виявлення можливих зон автоколивань типу галоупування за відомим критерієм Ден-Гартога [3]. Під час експериментальних досліджень роботи вентиляційних систем будинків в умовах аеродинамічного впливу висотних споруд проводилися вимірювання пульсаційної складової коефіцієнта тиску [4].

Набутий досвід експериментальних досліджень дозволяє стверджувати, що попередній аналіз можливостей виникнення аеропружних коливань моделі можна здійснити на підставі аналізу результатів статичних вагових випробувань та аналізу частотних характеристик нестационарної аеродинамічної сили, яка збуджує вимушені коливання споруди, і співставлення її з розрахунковою частотою власних коливань споруди.

Постановка завдання

Виконати вагові експериментальні дослідження в аеродинамічній трубі ТАД-2 Національного авіаційного університету загальних аеродинамічних статичних характеристик C_x , C_y , C_z , m_x , m_y , $m_z = f(\beta)$ моделі масштабом М 1:2 повної конфігурації хреста дзвіниці і здійснити їх аналіз для виявлення областей аеропружних коливань конструкції, а також розробити інструментарій, методику та виконати дослідження спектральних характеристик пульсаційної складової швидкості повітряної течії в збуреному сліді за моделлю хреста як фактора вимушених коливань.

Результати аналізу вагового експерименту

Результати вагових досліджень моделі хреста в аеродинамічній трубі ТАД-2 Національного авіаційного університету зображено на рис. 2 у вигляді графічних залежностей визначальних щодо вітрового навантаження коефіцієнтів сил та моментів від кута азимута напрямку вітру: C_x , C_y , m_x , $m_y = f(\beta)$. Усі коефіцієнти визначені відносно точки, що знаходиться на осі обертання моделі у нижній точці кріплення моделі на підвісці. Кут $\beta = 0$ відповідає напрямку повітряного потоку паралельно горизонтальній перекладині моделі хреста.

Залежність коефіцієнта бокової аеродинамічної сили від кута напрямку повітряної течії $C_y = f(\beta)$ має такі особливості:

- коефіцієнт C_y має нульові значення при кутах $\beta = 0$; $\beta = 45^\circ$; $\beta = 90^\circ$;
- у межах кожного із секторів $\Delta\beta = 0-45^\circ$, $\Delta\beta = 45-90^\circ$ існує по два екстремуми $C_{y \max} \approx 0,12$ та $C_{y \min} \approx -0,12$, які відкориговані з причин наявної у металевій конструкції моделі хреста виробничої крутки, тому на графіках помітний зсув нульового значення $C_y = 0$ при $\beta = 45^\circ$ на величину $\Delta\beta \approx -4,5^\circ$;

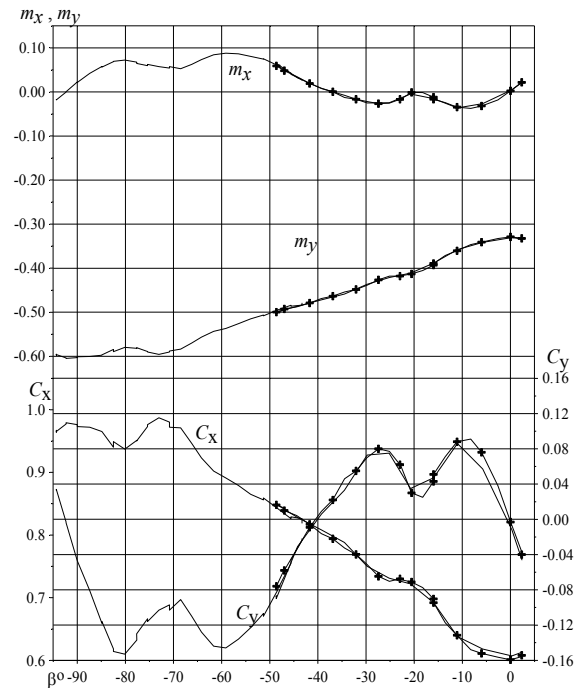


Рис. 2. Залежності аеродинамічних коефіцієнтів моделі хреста від азимуту набігаючого повітряного потоку β :

+ повторна продувка

- на ділянках $-80^\circ < \beta < -10^\circ$, $-72^\circ > \beta > -80^\circ$, $-20^\circ > \beta > -26^\circ$ похідні $C_y^\beta < 0$.

Цей факт спеціально досліджувався візуально за допомогою аеродинамічного щупа (рис. 3).

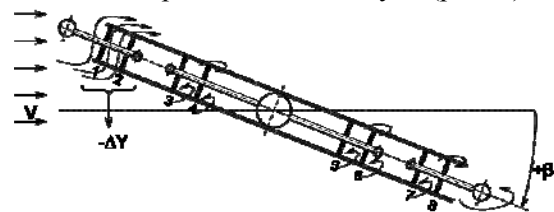


Рис. 3. Візуалізація повітряної течії на горизонтальній балці моделі хреста при малих кутах $\beta \approx 0-7^\circ$:

1-8 – діафрагми

На крайньому відсіку горизонтальної балки хреста, що направлена назустріч вітру, перед плоскими діафрагмами 1 та 2 формується сильна течія повітря за напрямком уверх. Відповідно виникає реактивна бокова сила $-\Delta Y$. Цікаво, що за іншими діафрагмами 3-8 вниз за течією спостерігається зривна мережа збуреної течії.

Знакозмінному періодичному характеру поведінки аеродинамічних статичних характеристик притаманне явище аеропружних коливань конструкції. Це можуть бути як коливання крутильні, лінійні, так і змішані. Природно, що виявлені зони галоупування при фізичному моделюванні статичних характеристик моделі хреста в аеродинамічній трубі носять попереджувальний характер і не завжди можуть бути розповсюджені на природні умови.

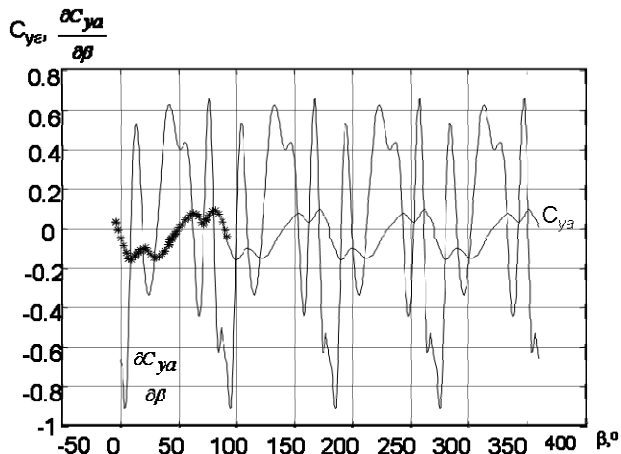


Рис. 4. Результати числового диференціювання коефіцієнта піднімальної сили за кутом набігання потоку:

* – експериментальні дані

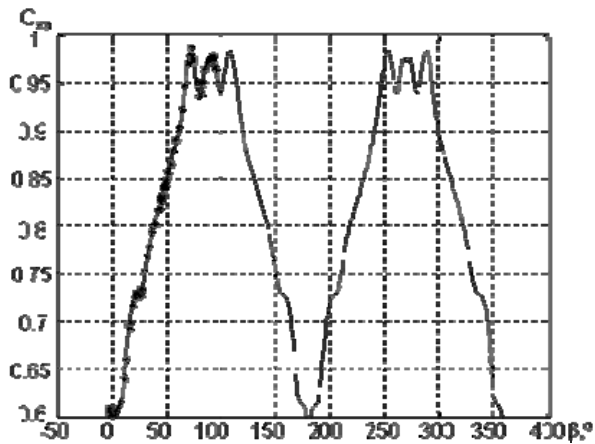


Рис. 5. Екстраполяція результатів експерименту на повний оберт моделі хреста:

* – експериментальні дані

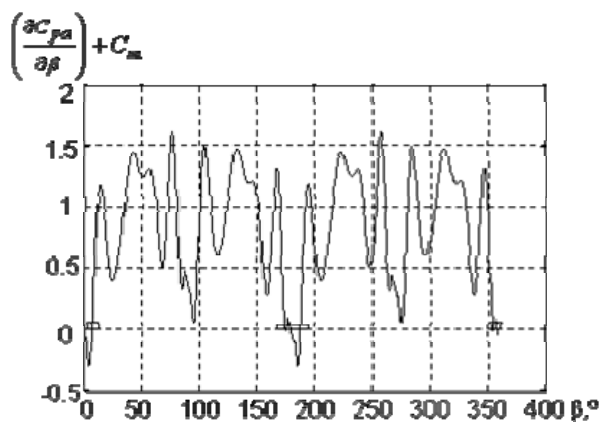


Рис. 6. Зміна значень критерію Ден-Гартога за кутом натікання повітряного потоку:

▬ – зони вірогідного галопування конструкції

Це пояснюється тим, що продувальна модель хреста проектувалася та виготовлялася виключно для вагових досліджень статичних аеродинамічних характеристик. Умовою виникнення інтенсивних аеропружних коливань тіла поперек потоку, що отримали назву галопування або аеропружної нестійкості галопуючого типу, в околі певного кута натікання потоку β є виконання нерівності Ден-Гартога, яка має вигляд

$$\left(\frac{dC_{y_a}}{d\beta} + C_{x_a} \right) < 0.$$

Статичну та динамічну стійкість до крутильних коливань можна оцінити за значеннями похідних m_Z^β та m_x^β . Але в цьому випадку момент кручення несуттєвий і похідні не аналізувалися.

Для розрахунку похідної від реалізацій $C_{y_a} = f(\beta)$ використовувався числовий метод, який проводить одночасно згладжування числових рядів поліноміальними залежностями та їх диференціювання.

Виходячи з того, що модель хреста має дві площини симетрії, ваговий експеримент достатньо здійснити в діапазоні змін кута набігання повітряного потоку від 0 до 90°. За допомогою поліноміальної моделі дані експерименту екстраполювались на кути натікання потоку від 0 до 360°. На рис. 4, 5 зображено результати апроксимації та екстраполяції експериментальних залежностей зміни коефіцієнтів бокової сили та сили аеродинамічного опору моделі хреста від кута натікання, а також визначення похідної $C_{y_a}^\beta$.

На рис. 6 зображено залежність критерію Ден-Гартога від кута натікання потоку. Як бачимо, критерій має від'ємне значення в околі кута $(0 \pm 11)^\circ$ та околі кута $(180 \pm 11)^\circ$. При обтіканні хреста під цими кутами можлива поява коливань конструкції типу галопування.

Методика досліджень спектральних характеристик пульсації повітряної течії

За відповідних умов обтічності нерухомих погано обтічних тіл за ними утворюються вихрові структури з відповідними частотами N_b .

Значення та вплив цих частот оцінюються за допомогою співвідношення:

$$Sh = \frac{N_b}{V_\infty} D,$$

де Sh – число Струхаля, яке залежить від форм тіла та числа Рейнольдса; D – характерний розмір тіла; V_∞ – середня швидкість потоку, в якому знаходиться тіло.

Вихрові структури, що утворюються при обтіканні попередніх елементів конструкції, збуджують періодичні коливання тих елементів, які знаходяться в супутньому потоці. Але ці коливання елементів конструкції будуть незначними, якщо частота N_b знаходиться на достатній відстані від власної частоти коливань конструкції. При зближенні цих частот виникають більш значні коливання, які можуть привести до виникнення резонансу та руйнування конструкції.

На значення власної частоти коливань впливає маса елементів конструкції, жорсткість конструкції, демпфівальні властивості конструкції, форма досліджуваного тіла, що знаходяться в потоці.

Було запропоновано як інструмент для визначення частотного спектру пульсацій у повітряному сліді за моделлю використовувати спеціально розроблений і створений з цією метою приймач повітряного миттєвого тиску (ППМТ). Особливість конструкції ППМТ полягає в тому, що напівпровідникові датчики тиску типу MPXV5004G (фірма Freescale Semiconductor, США) встановлені безпосередньо у приймальних отворах швидкісного напору та статички трубки приймача. Датчики вимірюють тиск по трьох координатах: P1 вимірює повний тиск повітряного потоку в носовій точці, P2 та P3 – статичні тиски відповідно в горизонтальному та вертикальному перетинах циліндричної частини ППМТ. Діапазон вимірюваних значень тиску повітря кожним датчиком в межах ± 100 мм H_2O становить ± 1 кПа, довжина повітропроводу від отвору до мембрани датчика – близько 20 мм. Завдяки такій конструкції забезпечується висока чутливість визначення пульсацій тиску. Найвища частота смуги пропускання датчика досягає 1000 Гц.

Під час експерименту ППМТ встановлювався у вільній повітряній течії або за об'єктом дослідження в певних точках, що характеризуються зміщеннями за висотою, горизонталлю та відстанню від об'єкта дослідження.

При спектральному аналізі сигналів датчиків тиску ППМТ обчислювалися спектри потужності сигналів за алгоритмом Фур'є-перетворення.

Для зменшення похибок спектрального аналізу, що спричиняється кінцевою тривалістю реалізації сигналу, при спектральному аналізі використовується вагове вікно Хеммінга, що підвищує динамічний діапазон аналізу на 20–30 дБ.

У зв'язку з необхідністю аналізу спадкових сигналів проводився спектральний аналіз декількох реалізацій з їх подальшим експоненціальним усередненням за п'ятьма реалізаціями, що дозволяє зменшити рівень шуму на 5–10 дБ.

При встановлених таким чином характеристиках спектрального аналізу рівень шуму в каналі вимірювання, який визначається шумами квантування аналого-цифрового перетворювача та датчиків тиску, не перевищував рівня мінус 85 дБ (рівня шумів при аналізі сигналів датчиків в трубі, що не працює).

За допомогою ППМТ виконувалися вимірювання статичних та динамічних характеристик повітряного потоку. За статичними характеристиками встановлювалася швидкість повітряного потоку, а за динамічними – його частотні складові.

Статистична обробка інформаційних сигналів виконувалася при обчисленні моментів першого (математичне сподівання або середнє значення) та другого порядків (для визначення середньоквадратичного відхилення або дисперсії). Статистична обробка дозволяє знизити вплив випадкової складової сигналів на результат вимірювання. Для виявлення частотного зсуву енергетичних складових спектрів сигналів при різних швидкостях повітряного потоку виконувалася додаткова обробка спектрограм. Для оптимального згладжування спектрограм за критерієм найменших квадратів використовується поліноміальна апроксимація 20-го порядку. Робота інформаційно-вимірювальної системи та обробка вимірюваної інформації виконується за управлінням програмою, що виконана в середовищі спеціалізованого інтегрованого пакета графічного програмування LabVIEW (National Instruments, США). Приклад апроксимації показано на рис. 7.

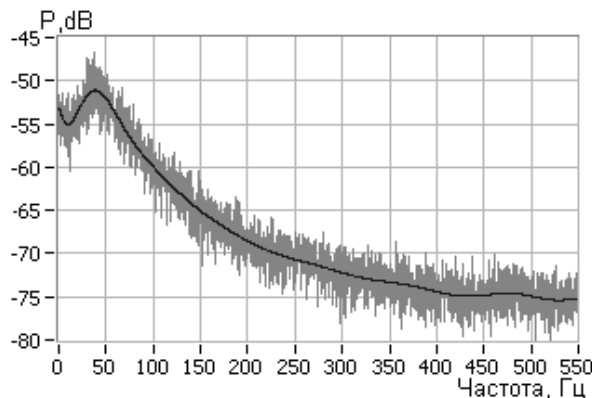


Рис. 7. Апроксимація спектру поліномом 20-го порядку

Порівняння спектрів потужності, отриманих з датчиків P1, P2, P3, показано на рис. 8. Інформативність спектрів достатньо висока за всіма датчиками, але рівень шумів сигналів датчиків статичного тиску помітно менший.

На рис. 9 показано характерне зсування піку в спектрі потужності за швидкістю при незмінному значенні числа Струхала, що є ознакою виявленої вихрової структури, яку генерує модель хреста і яка може бути джерелом вимушених коливань хреста.

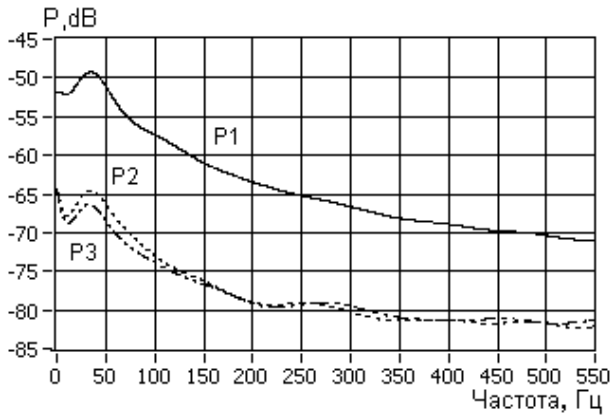


Рис. 8. Спектри потужності, отримані з датчиків P1, P2, P3 під час експерименту

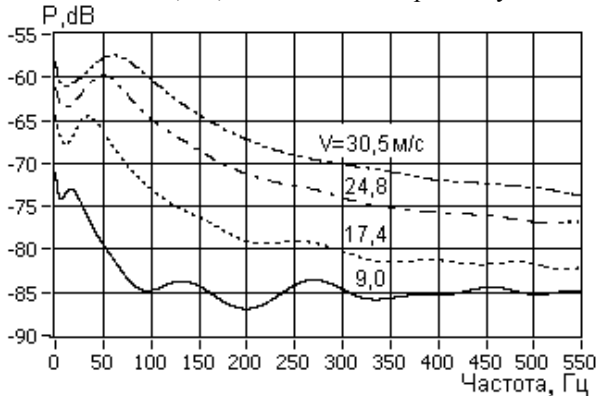


Рис. 9. Вплив швидкості потоку на спектр потужності

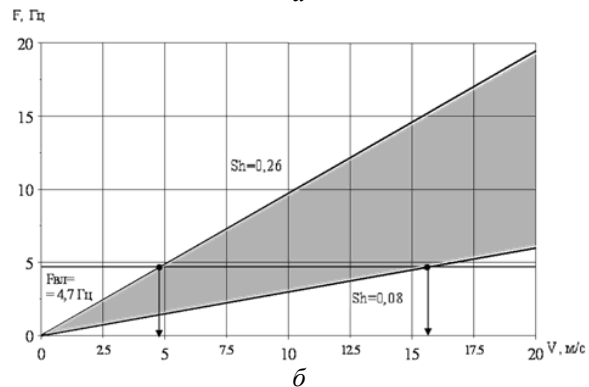
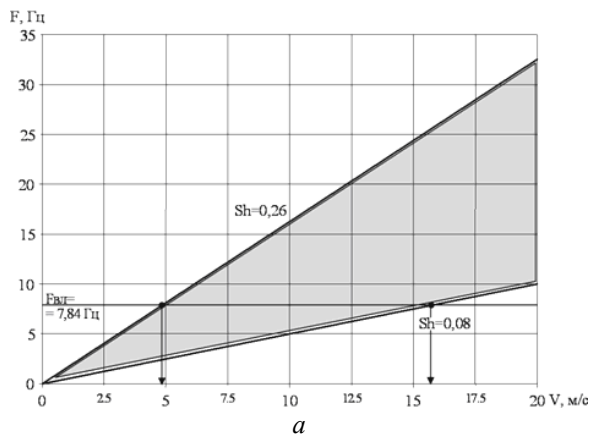


Рис. 10. Співставлення частот пульсацій повітряної течії в сліді за природними хрестами з частотами власних пружних коливань природних хрестів: а – малий хрест; б – великий хрест

Результати статистичної обробки експериментальних характеристик збуреного сліду за моделлю хреста систематизовані у вигляді таблиці.

Величини чисел Струхала Sh у супутньому сліді за моделлю хреста при різних конфігураціях

β°, град	Конфігурація моделі хреста			Sh
	y	Імітатор ожеледі	Вставка	
45	0	–	–	0,17
22	13	–	–	0,13
90	140	–	–	0,08
45	-100	–	–	0,10
90	0	–	+	0,26
45	0	–	+	0,19
45	40	+	+	0,09
90	0	+	+	0,17
				0,26
45	40	+	+	0,12
90	120	+	+	0,09

Залежно від кута азимута повітряної течії β, координати у розташування носової частини ППМТ відносно осі кістяка моделі хреста, імітації наявності ожеледі на кістяці моделі хреста (імітатор ожеледі), наявності додаткових елементів жорсткості на центральному кільці (вставок) числа Струхала пульсацій в сліді знаходяться у діапазоні Sh = 0,08–0,26.

По осі об'єкта досліджень при β = 90° і y = 0 спостерігаються більш високі частоти пульсації Sh_{max} = 0,26. Зменшення частоти пульсації до Sh_{min} = 0,08–0,10 спостерігається при виході ППМТ у бік від осі супутнього сліду (y = -100–-140 мм).

Отже, за багатoelementною конструкцією хреста, що має високий ступінь проникливості повітряної течії, формується поліфонічний супутній слід з багатьма характерними числами Sh = 0,08;0,09;0,10;0,12;0,13;0,17;0,19;0,26.

Результати розрахунку діапазону частот пульсацій повітряної збуреної течії у сліді за природними великим та малим хрестами зображені на рис. 10.

На графіках (рис. 10) показані рівні частот вільних пружних коливань природних хрестів на згинання: 7,84 Гц – для малого хреста; 4,7 Гц – для великого хреста. Із рис. 10 видно, що реально існує небезпека виникнення пружних коливань хрестів в діапазоні швидкості вітру від 4,8 до 15,7 м/с.

Висновки

1. В аеродинамічній трубі ТАД-2 Національного авіаційного університету проведені дослідження аеродинамічних характеристик

$$C_x, C_y, C_z, m_x, m_y, m_z = f(\beta)$$

моделі хреста, виконані трудомісткі дослідження спектральних характеристик збуреного супутнього сліду за моделлю хреста.

За критерієм Ден-Гартога виконані теоретичні розрахунки зон напрямків вітру, в яких можливі коливання типу галопування. Теоретично визначені максимальні величини інтегральних вітрових навантажень на природні великий та малий хрести.

2. Розроблено та відпрацьовано методику дослідження спектральних характеристик пульсації тиску в збуреній повітряній течії за допомогою створеного приймача повітряного миттєвого тиску.

3. Визначено, що в супутньому збуреному сліді за моделлю хреста формується поліфонічний пульсуючий повітряний потік з характерними частотами спектральної характеристики, що відповідають критеріям універсальності за числами Струхаля в діапазоні $Sh = 0,08-0,26$. Співставлення цього результату з частотами першого тону вільних пружних коливань хрестів показало, що існує небезпека виникнення пружних коливань природних хрестів у діапазоні швидкості вітру від 4,8 до 15,7 м/с.

4. Результати експериментальних досліджень моделі хреста в аеродинамічній трубі ТАД-2 Національного авіаційного університету та результати теоретичних розрахунків зон можливого галопування і частот вільних пружних коливань указують на необхідність виконання додаткових пошукових дослідно-конструкторських робіт щодо застосування в нижніх частинах кістяків

хрестів демпфірувальних пристроїв (або відтяжок з демпфірувальними пристроями) з метою поглинання енергії пружних коливань самозбудження при дії вітру.

Автори висловлюють щиру вдячність старшому науковому співробітнику, кандидату технічних наук Л.Г. Дмитрієву за проведені теоретичні розрахунки міцності конструкції хреста та частот власних коливань, науковому співробітнику В.В. Орлянському за допомогу під час проведення експериментальних досліджень в аеродинамічних трубах Національного авіаційного університету.

Література

1. *Comprehensive aerodynamic and dynamic study of Independence of Ukraine monument* / I.M. Lebedich, M.P. Kondra, R.M. Pavlovsk, a.o. // К.: Proc. of the NAU. – 2003. – № 2(17). – Р. 100 – 104.
2. *Ищенко С.А., Жданов А.И., Давидов А.Р. Экспериментальные исследования ветровых нагрузок на плохо обтекаемые высотные сооружения // Аэрогидродинамика: проблемы и перспективы. Сб. ст. ХАИ. – Х.: ХАИ, 2004. – С. 33 – 42.*
3. *Ден-Гартог. Механические колебания. – М.: Физматгиз, 1960. – 580 с.*
4. *Павловский Р.Н., Виноградский П.М., Кузнецов С.Г. Работа вентиляционных систем пятиэтажного здания под влиянием высотного здания // Зб. наук. пр. ЛНАУ. Технічні науки (будівництво). – 2005. – № 45(68). – С. 107 – 115.*

Стаття надійшла до редакції 08.11.05.

Приведены результаты экспериментальных исследований модели плохо обтекаемой конструкции в аэродинамической трубе ТАД-2 Национального авиационного университета и их анализ с целью выяснения возможного возникновения упругих колебаний конструкции под действием аэродинамических сил со стороны воздушного потока. Предложена и апробирована методика определения спектральных характеристик пульсационной составляющей скорости воздушного потока в спутном следе за моделью с помощью приемника воздушного мгновенного давления.

Results of experimental researches of model inconvenient streamlined constructions in wind tunnel ТАД-2 of the National Aviation University and their analysis with the purpose of clearing up possible origin of elastic oscillations of a construction under operation of aerodynamic forces from an air stream are presented. The technique of definition of spectral characteristics rippling making speed of an air stream in aircraft trail behind model by means of the receiver of air instant pressure is offered and approved.