

В. Г. ЯРЕЩЕНКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПМаш НАН Украины, Харьков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ЖЕСТКОЙ ПЛИТЫ НА УДАР ПТИЦЕЙ

Работа посвящена вопросам экспериментального исследования реакции жесткой плиты на удар птицей. Приведены данные экспериментальных исследований влияния кинематических факторов на реакцию деформируемой преграды при столкновении с птицей. Проведена серия экспериментов по определению деформаций плоской преграды при ударе тушкой птицы. Экспериментально исследовано влияние скорости и угла соударения на максимальные деформации преграды.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, тензометрия, деформация, динамика, птицестойкость.

Введение. Анализ прочности элементов конструкций самолета при столкновении с птицей является одной из важных задач, возникающих при проектировании летательных аппаратов [1-4]. Конструкции современных самолетов проектируются с учетом возможного столкновения их с птицами. Так, действующие авиационные стандарты требуют, чтобы конструкция самолета позволяла экипажу безопасно завершить полет после столкновения с одиночной птицей массой 1,81 кг [5]. Это требование зафиксировано соглашением в рамках Международной организации авиации (ИКАО) [2].

Соударение конструкции и птицы является сложным динамическим процессом. Основными методами его изучения являются натурные испытания и расчеты с использованием крупных расчетных комплексов, базирующихся на МКЭ. Сложность теоретического анализа прочности элементов конструкций самолета при ударе птицей привела к широкому применению натурального эксперимента [6 – 8].

Состояние научной проблемы. Проведение комплексных исследований по птицестойкости предполагает применение многоканальных измерительных систем, обеспечивающих получение экспериментальной информации. Исследования динамического напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций проводятся в основном методом тензометрирования [9, 10]. Этот метод в настоящее время является одним из наиболее изученных и надежных.

Нестационарные процессы деформирования вызывают в конструкциях колебания со спектром частот от 0,1 до 250 кГц и выше. Для регистрации таких колебаний необходима аппаратура, удовлетворяющая требованиям к диапазону регистрируемых частот и удовлетворяющая условиям теоремы

© В. Г. Ярещенко, 2014

Котельникова [11]. В силу сложности такой аппаратуры имеется весьма ограниченное количество работ, посвященных экспериментальным исследованиям поведения элементов конструкций при высокоскоростном деформировании.

В предлагаемой работе приводятся описание и результаты экспериментальных исследований деформаций жесткой мишени при ударе птицы. В работе приведены данные натурального эксперимента по исследованию влияния скорости и угла соударения на реакцию деформируемой преграды при ударе тушкой птицы.

Цель работы. Целью работы было экспериментальное исследование влияния скорости и угла соударения на реакцию деформируемой преграды при ударе тушкой птицы.

Постановка эксперимента. Для оценки влияния кинематических факторов на реакцию деформируемой преграды при столкновении с птицей был проведен натуральный эксперимент, в ходе которого исследовалась реакция (деформации) стальной плиты-мишени на удар тушек птиц. Механические характеристики плиты: модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность, $\rho = 7,85 \cdot 10^3$ кг/м³.

Испытательный стенд состоял из разгонного устройства для метания, тензометрического комплекса и плиты-мишени [8].

Для разгона метаемых объектов применялось пневматическое разгонное устройство АНТК им. О.К. Антонова. Пневматическое устройство (рис. 1) состоит из напорного резервуара 1, заполняемого сжатым воздухом под давлением P_0 , специального клапана быстрого выпуска воздуха 2 и ствола 3. Диаметр ствола составляет 150 мм, а базовая длина – 8,4 м. Для метания на высоких скоростях ствол наращивался до длины 14,7 м.

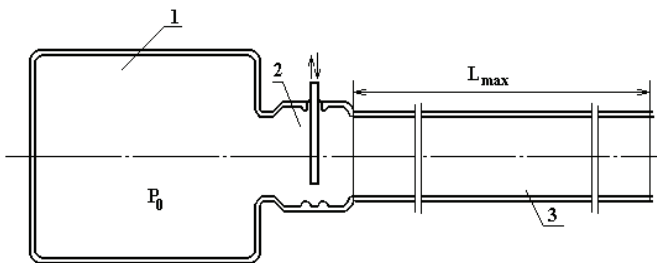


Рисунок 1 – Принципиальная схема пневматического устройства:
1 – ресивер; 2 – клапан; 3 – ствол

При зарядке ствол отделяется от клапана и откатывается вперед. Метаемый объект помещается внутрь ствола, после чего последний возвращается в исходное положение. Перед выстрелом клапан закрывается и в ресивер

нагнетается воздух до тех пор, пока давление достигнет значения P_0 , которое выбирается таким, чтобы обеспечить метаемому объекту массой M необходимую скорость V на срезе ствола.

За срезом канала ствола была установлена система измерения скорости. Метаемый объект поочередно разрывает 4 проволоки-датчика, соединенные с двумя счетными частотомерами, которые измеряют время прохождения рядом базы 0,5 м (расстояние между парами проволок).

Измерение деформаций проводилось методом динамического широкополосного тензометрирования. Для этого посередине тыльной поверхности мишени наклеивалась розетка малобазных (база измерения 1 мм) фольговых тензорезисторов. Необходимо отметить, что для качественной регистрации динамических процессов деформирования необходимо учитывать зависимость результатов измерений от соотношений между измерительной базой и длиной волны [9].

На рис. 2 представлена блок-схема применяемой аппаратуры, которая позволяет регистрировать текущие значения деформаций во времени и измерять временные интервалы с заданной точностью.

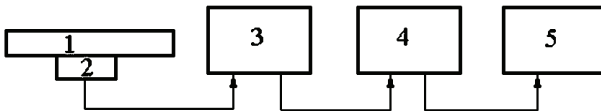


Рисунок 2 – Блок-схема экспериментальной установки

Сигналы с тензодатчиков (2), наклеенных на мишень (1), поступают на тензоусилитель (3), а затем – на измерительно-вычислительный комплекс. В качестве датчика остановки записи используется один из тензорезисторов (2). При приложении к плите нагрузки он вырабатывает сигнал, поступающий через линию связи и тензостанцию на генератор синхронных импульсов (ГСИ). ГСИ выполнен в стандарте КАМАК и используется для синхронизации остановки записи в кольцевую память всех измерительных каналов при поступлении на ГСИ сигнала с датчика запуска. Кроме того, в крейте КАМАК (4) расположены генератор тактовых импульсов, аналого-цифровые преобразователи с максимальной частотой тактирования 40 МГц, а также контроллер крейта. Генератор тактовых импульсов используется для подачи одинаковых по величине тактовых импульсов на все каналы измерения. Имеется возможность непосредственно с клавиатуры компьютера задавать режимы работы генератора тактовых импульсов, генератора синхронных импульсов и АЦП. Также задается объем информации, сохраняемый в кольцевой памяти до и после поступления сигнала остановки записи, что позволяет видеть процесс нагружения с самого начала. Адаптер, расположенный непосредственно в компьютере (5), и контроллер крейта служат для организации диалога между компьютером и блоками, расположенными в крейте КАМАК.

Тензоусилитель работает на принципе амплитудной модуляции с несущей частотой 1000 кГц, его характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики тензоусилителя

Характеристика	Значение
Число измерительных каналов	8
Несущая частота, кГц	1000
Полоса рабочих частот, кГц	0,04 – 200
Нелинейность АЧХ, дБ (не более)	$\pm 1,2$
Минимальная регистрируемая деформация, ЕОД	$30 \cdot 10^{-6}$
Динамический диапазон, дБ	80
Градуировочный диапазон, ЕОД	$30 \cdot 10^{-6} - 2,4 \cdot 10^{-3}$
Длина рабочих линий, м (не более)	20
Сопротивление используемых тензодатчиков, Ом	50 – 200

Измерение деформаций выполняется по мостовой схеме [12]. Четверть моста находится в измерительной части, четверть – в калибровочной, а оставшаяся половина – в тензоусилителе. Для минимизации тока в измерительной диагонали производится подстройка моста по активной и реактивной составляющим сопротивления. Непосредственно перед проведением испытаний, после балансировки канала усиления, производится его градуировка, то есть устанавливается зависимость деформаций $\varepsilon = \varepsilon(U)$, где U – электрическое напряжение сигнала, регистрируемого в АЦП.

Внешний вид стенда показан на рис. 3. Стенд состоит из: опорной конструкции (1); плиты для крепления (2) размером 1000x1000x100 мм, установленной вертикально на опорной конструкции (1); плиты для испытаний (3) размером 700x700x50 мм, закрепленной в плите (2). Крепление плиты (3) имитирует условия шарнирного опирания.

Удар метаемым объектом наносился в центр плиты для испытаний (3), которая отодвинута от ствола разгонного устройства на 2 м.

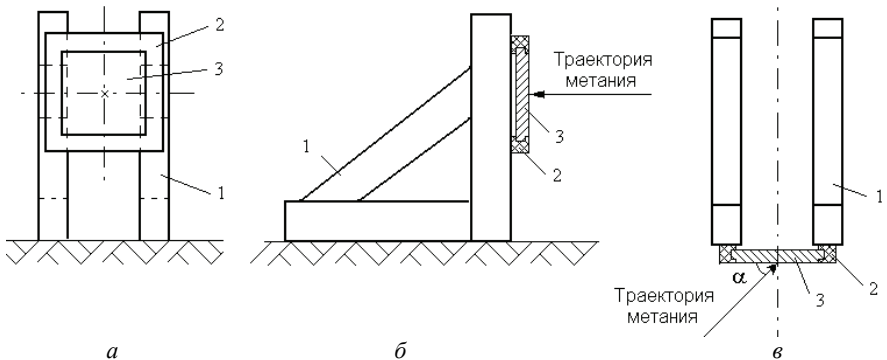


Рисунок 3 – Стенд-мишень: а – вид спереди, б – вид сбоку, в – вид сверху

Посередине тыльной поверхности плиты (рис. 4) наклеивалась четырех-компонентная розетка тензодатчиков (рис. 5). В ходе экспериментов измерялись деформации плиты ϵ_x , ϵ_y в направлениях горизонтальной и вертикальной осей. Таким образом, вся получаемая информация дублируется тензодатчиками, расположенными по два горизонтально и вертикально.

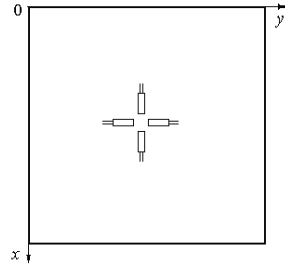
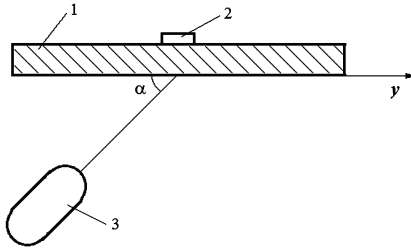


Рисунок 4 – Плита-мишень с тензодатчиками: 1 – плита, 2 – тензодатчики, 3 – птица
Рисунок 5 – Розетка тензодатчиков

Исследование деформаций жесткой плиты при ударе. В качестве птиц в натурном эксперименте использовались тушки кур. Исследовалась реакция плиты при углах соударения 25° , 30° , 35° , 40° , 45° . Скорость метания составляла от 89 м/с до 206 м/с.

На рис. 6 а, б приведены деформации плиты ϵ_x , ϵ_y , зафиксированные при ударе тушкой птицы при углах соударения 40° и 25° . Сплошной линией показаны результаты при ударе тушкой птицы массой 1,750 кг при скорости соударения 158,63 м/с и угле 40° , пунктирной – при ударе тушкой птицы массой 1,740 кг при скорости соударения 153 м/с и угле соударения 25° .

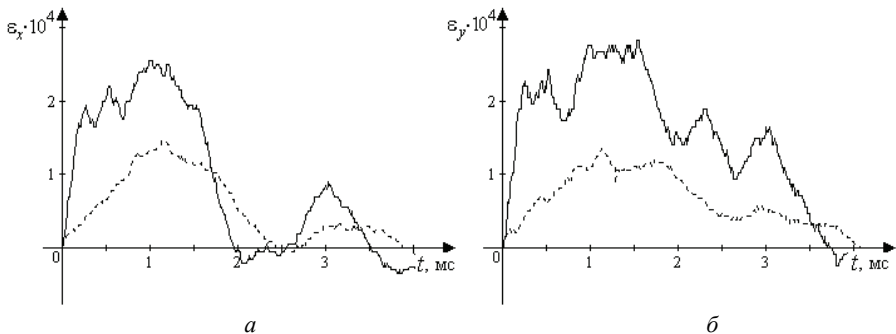


Рисунок 6 – Изменение во времени деформаций плиты:
а – деформации ϵ_x , б – деформации ϵ_y

Из рис. 6 видно, что с уменьшением угла столкновения птицы с преградой максимальные деформации плиты уменьшаются.

Проведено исследование зависимости максимальных деформаций плиты-мишени от скорости и угла соударения метаемого тела.

Исследование зависимости максимальных деформаций плиты ϵ_x и ϵ_y от скорости удара птицей при угле соударения 45° представлено на рис. 7. Здесь кружками обозначены результаты, полученные с использованием тушек птиц, сплошной линией показаны результаты аппроксимации экспериментальных данных. Результаты эксперимента аппроксимировались полиномами с использованием метода наименьших квадратов.

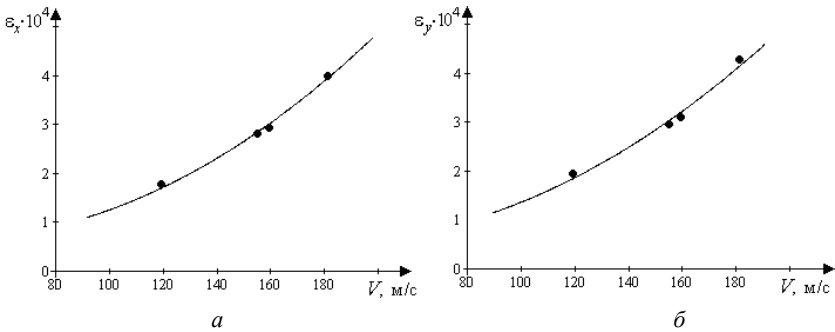


Рисунок 7 – Изменение деформаций плиты в зависимости от скорости соударения: *a* – деформации ϵ_x , *б* – деформации ϵ_y

Из рис. 7 видно, что при увеличении скорости метаемого объекта деформации плиты растут, при этом зависимость деформаций плиты от скорости близка к квадратичной.

Исследование влияния угла соударения α на максимальные значения деформаций плиты при столкновении с птицей массой 1,81 кг на скорости 155 м/с приведено на рис. 8.

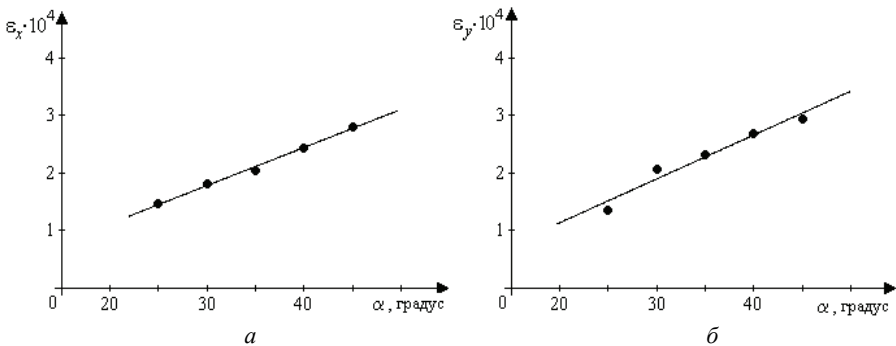


Рисунок 8 – Изменение деформаций пластины в зависимости от угла соударения: *a* – деформации ϵ_x , *б* – деформации ϵ_y

Из рис. 8 видно, что максимальные значения деформаций плиты уменьшаются с уменьшением угла соударения.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. С помощью метода широкополосного тензометрирования проведена серия экспериментов по определению деформаций испытательной плиты при ударе тушкой птицы. Исследовано влияние скорости и угла соударения на максимальные деформации. Установлено, что с уменьшением угла столкновения птицы с преградой максимальные деформации плиты уменьшаются, а при увеличении скорости метаемого объекта деформации плиты растут, при этом зависимость деформаций плиты от скорости близка к квадратичной.

Дальнейшее исследование должно быть направлено на экспериментальное исследование процесса деформирования реальных элементов конструкции самолета на удар птиц.

Список литературы: 1. *Лаврик В.С.* Летчик, внимание – птицы! / *В.С. Лаврик, И.Ф. Рубцов, Э.А. Шерер.* – М.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1970. – 104 с. 2. *Фритши О.* Безопасность полетов – задача № 1 / *О. Фритши* // Курьер ЮНЕСКО. – 1978. – С. 20–22. 3. *Анцелович Л.Л.* Надежность, безопасность и живучесть самолета / *Л.Л. Анцелович.* – М.: Машиностроение, 1985. – 296 с. 4. *Якоби В.Э.* Биологические основы предотвращения столкновений самолетов с птицами / *В.Э. Якоби.* – М.: Наука, 1974. – 169 с. 5. *Авиационные правила.* Ч. 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. – М.: МАК, 1993. – 483 с. 6. *Уилбек Дж.С.* Разработка модели птицы для ударных испытаний авиационных двигателей / *Дж.С. Уилбек, Дж.Л. Ренд* // Энергетические машины. – 1981. – Т. 103, № 4. – С. 126–133. 7. *Голощапов В.Н.* Некоторые результаты обобщения физических, геометрических и весовых характеристик птиц, необходимых для оценки динамических процессов при соударении с преградой / *В.Н. Голощапов, В.И. Лебединский, В.Э. Якоби, В.И. Янчина* // Защита материалов и технических устройств от птиц. Сер. Биологические повреждения. – М.: Наука, 1984. – С. 201–214. 8. *Shupikov A.N.* Bird dummy for investigating the bird-strike resistance of aircraft components / *A.N. Shupikov, S.V. Ugrimov, N.V. Smetankina, V.G. Yareschenko, G.G. Onhirsky, V.P. Ukolov, V.F. Samoilenko, V.L. Avramenko* // Journal of Aircraft. – 2013. – V. 50, № 3. – P. 817–826. 9. *Тензометрия в машиностроении* / под ред. *Р.А. Макарова.* – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с. 10. *Грановский В.А.* Динамические измерения: основы метрологического обеспечения / *В.А. Грановский.* – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с. 11. *Котельников В.А.* О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи / *В.А. Котельников* // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 7. – С. 762–770. 12. *Карандеев К.Б.* Мостовые методы измерений / *К.Б. Карандеев.* – К.: Гос. изд-во техн. лит. Украинской СССР, 1953. – 246 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Lavrik, V. S., I. F. Rubcov and Je. A. Sherer.* Letchik, vniianie – pticy! Moscow: Izdatel'stvo Ministerstva oborony SSSR, 1970. Print. 2. *Fritsh, O.* «Bezopasnost' poletov – zadacha № 1.» Kur'er JuNESKO. 1978. 20-22. Print. 3. *Ancelovich, L. L.* Nadezhnost', bezopasnost' i zhivuchest' samoleta. Moscow: Mashinostroenie, 1985. Print. 4. *Jakobi, V. Je.* Biologicheskie osnovy predotvrashhenija stolknovenij samoletov s pticami. Moscow: Nauka, 1974. Print. 5. *Aviacionnye pravila.* Ch. 25. Normy letnoj godnosti samoletov transportnoj kategorii. Moscow: MAK, 1993. Print. 6. *Uilbek, Dzh.S. and Dzh. L. Rend.* «Razrabotka modeli pticy dlja udarnyh ispytanij aviacionnyh dvigatelej.» Jenergeticheskie mashiny 103.4 (1981): 126–133. Print. 7. *Goloshhchapov, V. N., et al.* «Nekotorye rezul'taty obobshhenija fizicheskikh, geometricheskikh i vesovykh harakteristik ptic, neobhodimyh dlja ocenki dinamicheskikh processov pri soudarenii s pregradoj.» Zashhita materialov i tehniceskikh ustrojstv ot ptic. Ser. Biologicheskie povrezhdenija. Moscow: Nauka, 1984. 201-214. Print. 8. *Shupikov, A. N., et al.* «Bird dummy for investigating the bird-strike resistance of aircraft components.»

Journal of Aircraft 50.3 (2013): 817-826. Print. **9.** Tenzometrija v mashinostroenii. Ed. R. A. Makarova. Moscow: Mashinostroenie, 1975. Print. **10.** Granovskij, V. A. Dinamicheskie izmerenija: osnovy metrologicheskogo obespechenija. Leningrad: Jenergoatomizdat, 1984. Print. **11.** Kotel'nikov, V. A. «O propuskoj sposobnosti «jeffira» i provoloki v jelektrosvjazi.» Uspehi fizicheskikh nauk 176.7 (2006): 762-770. Print. **12.** Karandeev, K. B. Mostovye metody izmerenij. Kiev: Gos. izd-vo tehn. lit. Ukrain-skoj SSR, 1953. Print.

Поступила (received) 13.10.2014

УДК 519 : 539 : 534

С. В. КРАСНИКОВ, канд. техн. наук, ст. наук. співр., НТУ «ХП»

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ФУНДАМЕНТІВ ПАРОВИХ ТУРБІН

Розглядається працездатність фундаментів парових турбін, що мають значний час експлуатації. Запропоновані методики дослідження та прогнозування працездатності фундаментів при тривалому строку експлуатації. Вони базуються на нормативних, експериментальних та розрахункових даних з експлуатації фундаментів парових турбін електростанцій. В основі методик є оцінка поточного стану конструкції за параметрами вібрації. Розроблені методики пропонуються для використання на електростанціях для існуючих та нових фундаментів парових турбін.

Ключові слова: працездатність, вібрація, вимушені коливання, фундамент, парова турбіна.

Вступ. Фундаменти парових турбін для електростанцій у східній Європі традиційно виготовляються із залізобетону. Із середини ХХ століття застосовуються збірні залізобетонні конструкції замість монолітного виконання [1, 2], що дозволило скоротити строки будівництва й витрати залізобетону, але привело до зниження твердості нових фундаментів і збільшило ймовірність появи резонансу в робочому діапазоні. Наявні теоретичні методи на час проектування більшості енергоблоків не дозволяли обчислити необхідні вібраційні характеристики конструкцій. Було проведено значний обсяг експериментальних обстежень [3, 4]. Останні норми з вібраційної оцінки фундаментів турбоагрегатів базуються на проведенні експериментальних обстежень обмеженого ряду фундаментів. Їхнє застосування розраховано в першу чергу на нові фундаменти. Це є причиною наявності великого парку фундаментів, що не задовольняють прийнятим за останні 15 років стандартам. Такі фундаменти експлуатуються відповідно до індивідуальних норм. По суті кожний фундамент є унікальним у силу природи бетону та особливостей будівництва. Це пов'язано з тим, що при будівництві використовується, як правило, легкодосту-

© С. В. Красніков, 2014