

Анализ деформаций стальной плиты-мишени при ударе мягкого тела

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

На основе методов численного моделирования эксперимента определена деформация стальной плиты-мишени, а также ее реакция на удар мягкого тела при разных скоростях и углах соударения. Выполнено сравнение результатов расчета с результатами натурального эксперимента, получено удовлетворительное их согласование. Расчетным путем установлено, что зависимость деформации плиты-мишени от скорости удара является квадратичной, а ее максимальное значение увеличивается с ростом скорости соударения. Зависимость деформации плиты-мишени от угла соударения линейная, а зависимость силы удара от угла соударения нелинейная.

Ключевые слова: удар, мягкое тело, птицестойкость, уравнение состояния, вычислительный эксперимент, осевая деформация.

Повреждение элементов авиационной конструкции в результате столкновения самолета с птицей снижает эксплуатационную надежность и безопасность полетов. Обеспечение птицестойкости элементов конструкции представляет собой актуальную проблему, решаемую на этапе проектирования и ввода в эксплуатацию. Одним из методов обеспечения птицестойкости конструкции самолета является натуральный эксперимент. Проведение натуральных испытаний связано с использованием тушек птиц или имитаторов. В настоящее время отсутствует единый стандарт для имитаторов, применяемых в ходе испытаний. Разработка такого стандарта проводится международной группой по исследованию столкновений с птицами, а также отечественными учеными и специалистами авиационной промышленности [1, 2]. Следует отметить, что натурному эксперименту как методу оценки птицестойкости конструкции присущ ряд недостатков. Это, прежде всего, невысокая точность воспроизведения ударного импульса и отсутствие повторяемости результатов; во-вторых, достаточно сложная технология изготовления и специальные условия хранения имитаторов; кроме того, усложнение методики проведения испытаний, сложность, а в ряде случаев и невозможность измерения интересующих параметров; и наконец, в случае использования при испытаниях тушек птиц, проблемы психологического и санитарно-гигиенического характера.

Альтернативой натурному эксперименту является численный эксперимент, проведение которого предполагает разработку и последующую верификацию математической модели.

Целью работы является определение деформаций стальной плиты-мишени, а также ее реакции на удар мягкого тела при разных скоростях и углах соударения и сравнение полученного результата с результатом натурального эксперимента.

Внешний вид испытательного стенда показан на рис. 1. Стенд состоит из опорной конструкции 1; плиты для крепления 2, размером 1000×1000×100 мм, установленной вертикально на опорной конструкции; плиты-мишени 3, размером 700×700×50 мм, закрепленной в плите 2 и имитатора птицы 4. Толщина плиты-

мишени выбрана таким образом, чтобы при ударе по ней мягкого тела с заданной скоростью ее деформация была малой и упругой.

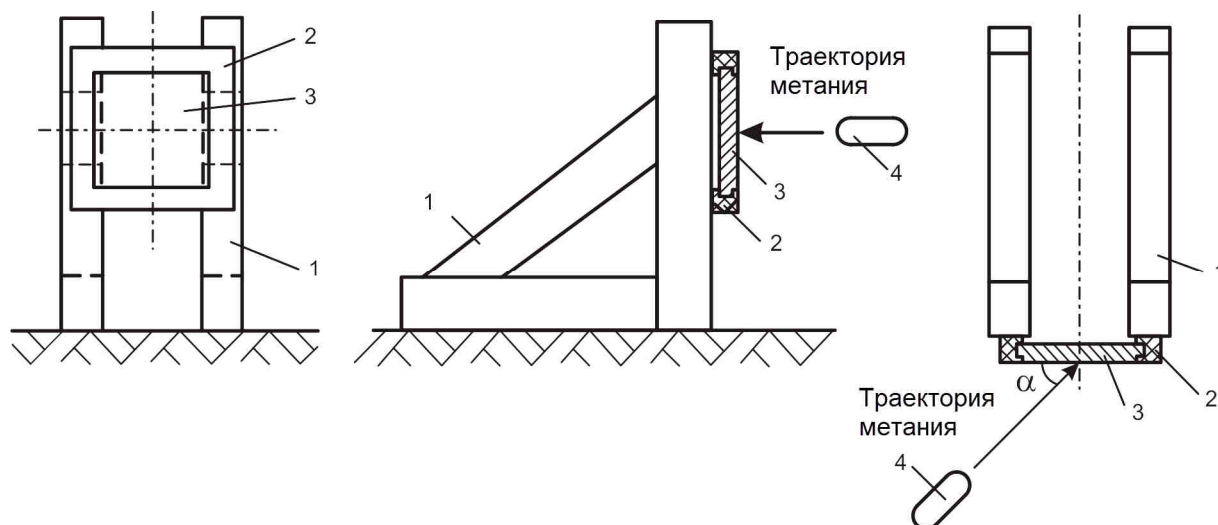


Рис. 1. Стенд-мишень

Форма мягкого тела, моделирующего тело птицы, выбрана в виде цилиндра со скругленными торцами с соотношением длины к диаметру ($A=L/D$) равным 2,2. При этом длина мягкого тела принята равной 240 мм, а его диаметр $D = 110$ мм.

Методика проведения эксперимента и аппаратура для регистрации деформаций плиты описаны в работе [2].

Материал плиты для крепления и плиты-мишени – углеродистая сталь, поведение которого описано моделью упругой изотропной среды при следующих численных значениях параметров: плотность $\rho = 7800$ кг/м³, модуль упругости $E = 2,1 \times 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Материал имитатора птицы, применяемого в эксперименте, – силикон, поведение которого при ударе описано баротропной моделью идеальной жидкости при следующих численных значениях параметров: плотность $\rho = 930$ кг/м³, модуль упругости $E = 1$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$. Связь между давлением и плотностью среды описана уравнением состояния $p = p(\rho)$ с параметрами $C_1 = 2045,1$ МПа, $C_2 = 6135,2$ МПа, $C_3 = 10225,3$ МПа. Масса мягкого тела принята равной 1,8 кг, скорость соударения – 152,9 м/с, угол соударения $\alpha = 90^\circ$, что соответствует случаю фронтального удара.

Расчетная модель представляет собой гибридную модель, состоящую из 8-узловых конечных элементов твердого деформируемого тела с односточной схемой интегрирования [3] для дискретизации плиты для крепления и плиты-мишени, а также SPH частиц с равномерным шагом для дискретизации мягкого тела. Контактное взаимодействие мягкого тела с плитой-мишенью при ударе описано моделью Automatic Node-to-Surface с применением метода штрафов для расчета контактных усилий [4]. Контактное взаимодействие плиты-мишени с плитой для крепления описано моделью Automatic Surface-to-Surface [4].

Время протекания процесса принято равным 4 мс.

В работе рассмотрены различные варианты реализации граничных условий и исследовано их влияние на изменение осевой деформации плиты-мишени.

На начальном этапе приняты следующие допущения: полагая, что жесткость опорной конструкции и плиты для крепления выше по сравнению с жесткостью плиты-мишени, пренебрегаем их деформациями. Поэтому опорную конструкцию и плиту для крепления не моделируем. В этом случае граничные условия заданы непосредственно для плиты-мишени. Моделируем шарнирное закрепление плиты-мишени. Ниже дано описание вариантов задания граничных условий.

1. Расчетный случай ВС–1 – граничные условия заданы для плиты-мишени в виде ограничений на линейное перемещение по трем направлениям X , Y , Z в узлах, расположенных по торцу мишени на срединной плоскости.

2. Расчетный случай ВС–2 – граничные условия заданы для плиты-мишени в виде ограничений на линейное перемещение по трем направлениям X , Y , Z в узлах, расположенных по нижнему торцу мишени.

Далее рассмотрены различные варианты задания граничных условий для плиты крепления и моделирование соединения плиты для крепления и плиты-мишени.

3. Расчетный случай ВС–3 – моделируют плиту для крепления мишени. Для этого использован 4-узловой элемент оболочки с формулировкой Belytschko-Tsay. Граничные условия заданы на нижней поверхности плиты в виде ограничений на линейное перемещение по трем направлениям X , Y , Z в узлах. Соединение плиты для крепления и плиты-мишени моделируют с помощью контактной модели типа Automatic Surface -to-Surface без учета сил трения.

4. Расчетный случай ВС–4 – условия такие же, как и в случае ВС–3. Дополнительно учтено трение между контактными поверхностями. Коэффициент сухого трения $f_s = 0,6$.

5. Расчетный случай ВС–5 – моделируют плиту для крепления мишени. Для этого применен 8-узловой элемент твердого деформируемого тела с одноточечной схемой интегрирования. Граничные условия заданы на нижней поверхности плиты на участке, где расположены балки опорной конструкции, в виде ограничений на линейное перемещение по трем направлениям X , Y , Z в узлах. На лицевой поверхности плиты мишени по периметру выполнен паз прямоугольной формы размерами 20×20 мм. Соединение плиты для крепления и плиты-мишени моделируют с помощью контактной модели типа Automatic Surface -to-Surface с учетом сил трения. Коэффициент сухого трения $f_s = 0,6$; коэффициент вязкого демпфирования $VDC = 20\%$.

6. Расчетный случай ВС–6 – условия такие же, как и в случае ВС–5. На лицевой поверхности плиты мишени по периметру выполнен паз прямоугольной формы размерами 20×5 мм.

Определена осевая деформация плиты-мишени при фронтальном ударе мягкого тела. Деформацию рассчитывали в центральной точке, расположенной на тыльной поверхности плиты.

На рис. 2,б сплошной линией показана деформация плиты при ударе тушкой птицы массой $1,75$ кг при скорости соударения $152,5$ м/с, а пунктирной линией – при ударе имитатором массой $1,8$ кг при скорости соударения $152,9$ м/с.

Анализируя результат, показанный на рис. 2, отметим следующее: результаты расчета удовлетворительно согласуются с результатами натурального

эксперимента. Частота колебаний расчетной модели выше, чем частота плиты-мишени в натурном эксперименте.

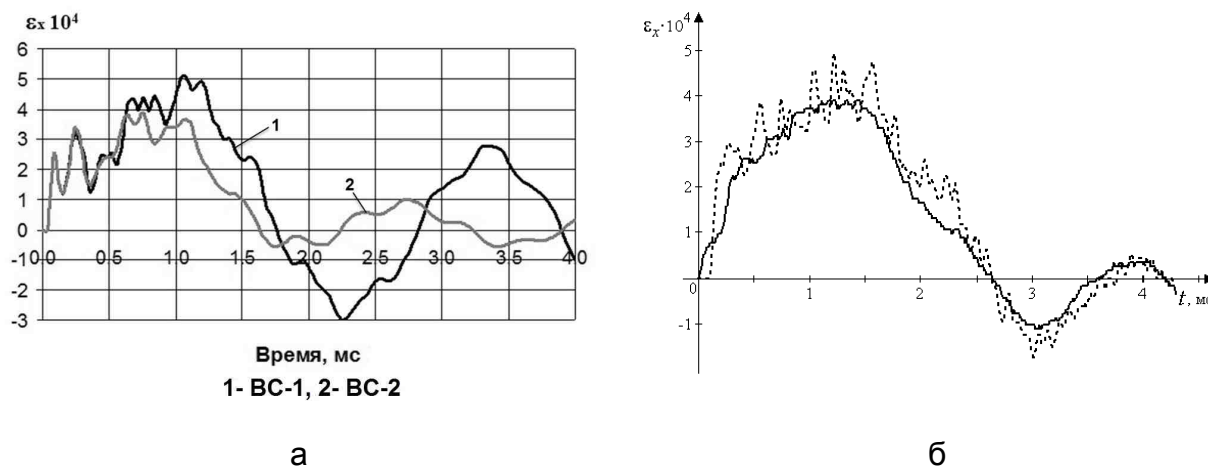


Рис. 2. Деформация плиты-мишени при фронтальном ударе ($\alpha=90^\circ$): а – расчет, метод SPH; б – натурный эксперимент [2]

На рис. 2,а видно, как на основную частоту изгибных колебаний накладываются колебания с более высокими частотами. Аналогичная тенденция прослеживается и для результатов натурального эксперимента в случае применения имитатора (см. рис. 2,б). На временном интервале от 0 до 2,0 мс амплитуда деформаций для расчетного случая BC–1 близка к амплитуде деформаций, определенной в ходе натурального эксперимента для случая использования имитатора. Амплитуда деформаций для расчетного случая BC-2 близка к амплитуде деформаций, полученной в ходе натурального эксперимента для случая использования тушки птицы.

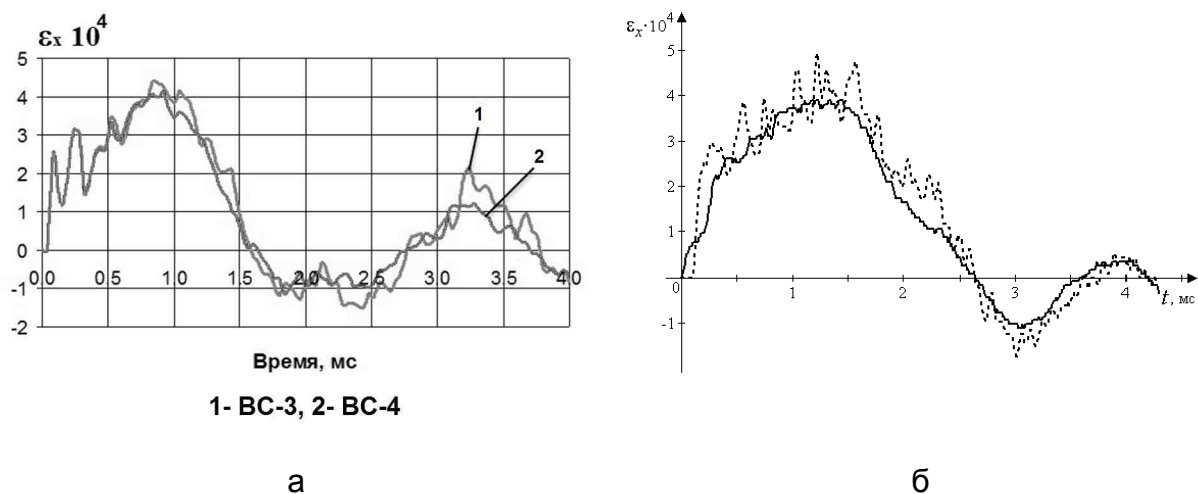


Рис. 3. Деформация плиты-мишени при фронтальном ударе ($\alpha=90^\circ$): а – расчет, метод SPH; б – натурный эксперимент

Кроме того, для расчетного случая BC–1 на временном интервале 2,0...4,0 мс амплитуды колебаний расчетной модели и натурной плиты-мишени различны, что

указывает на различные демпфирующие свойства расчетной модели и плиты-мишени в натурном эксперименте.

Для расчетного случая ВС–2 на временном интервале 2,0...4,0 мс виден сдвиг по фазе, а именно колебания модели и плиты-мишени в эксперименте находятся в противофазе.

Для расчетных случаев ВС–3 и ВС–4 получено удовлетворительное согласование амплитуд колебаний для расчетной и экспериментальной моделей. По-прежнему наблюдается несовпадение частот колебаний.

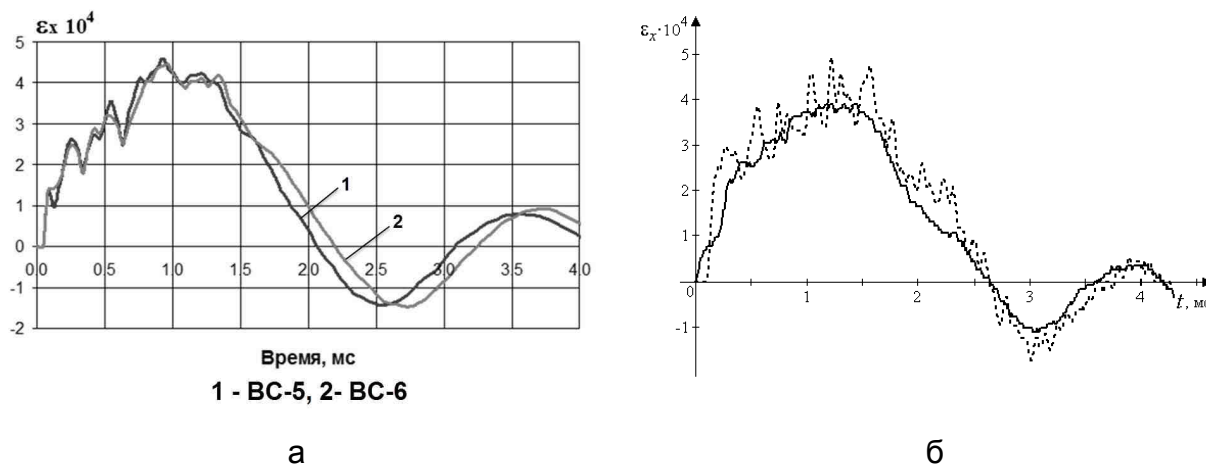


Рис. 4. Деформация плиты-мишени при фронтальном ударе ($\alpha=90^\circ$):
а – расчет, метод SPH; б – натурный эксперимент

Учет вязкого демпфирования в контактном алгоритме способствует сглаживанию осцилляций на временном интервале от 2,0 до 4,0 мс.

Для расчетного случая ВС–6 получено наилучшее совпадение результата расчета с результатом натурального эксперимента.

Исследован характер распределения деформаций в центре плиты-мишени при разных углах соударения, а также реакция плиты для случая косоугольного удара. Исследования проводили при следующих углах соударения – 25°, 30, 35, 40, 45, 60 и 75°.

На рис. 5 показаны осевые деформации ϵ_x плиты-мишени при $\alpha=25^\circ$. Выполнено сравнение результата, полученного расчетным путем с помощью метода SPH, с результатом натурального эксперимента.

На рис. 5,б сплошной линией показана деформация плиты при ударе тушкой птицы массой 1,74 кг при скорости соударения 153 м/с, а пунктирной линией – при ударе имитатором массой 1,805 кг при скорости соударения 152,88 м/с.

Следует отметить удовлетворительное согласование результатов расчета с результатами натурального эксперимента.

Исследовано изменение деформации плиты-мишени в зависимости от скорости соударения при угле соударения $\alpha=45^\circ$.

Выполнено сравнение полученного результата с результатом натурального эксперимента (см. рис. 6).

Результаты расчета аппроксимировали полиномом второй степени с использованием метода наименьших квадратов. На рис. 6 параметр R^2 – достоверность аппроксимации. Получено аналитическое выражение,

позволяющее определить величину деформации при косом ударе ($\alpha=45^\circ$) в зависимости от скорости соударения.

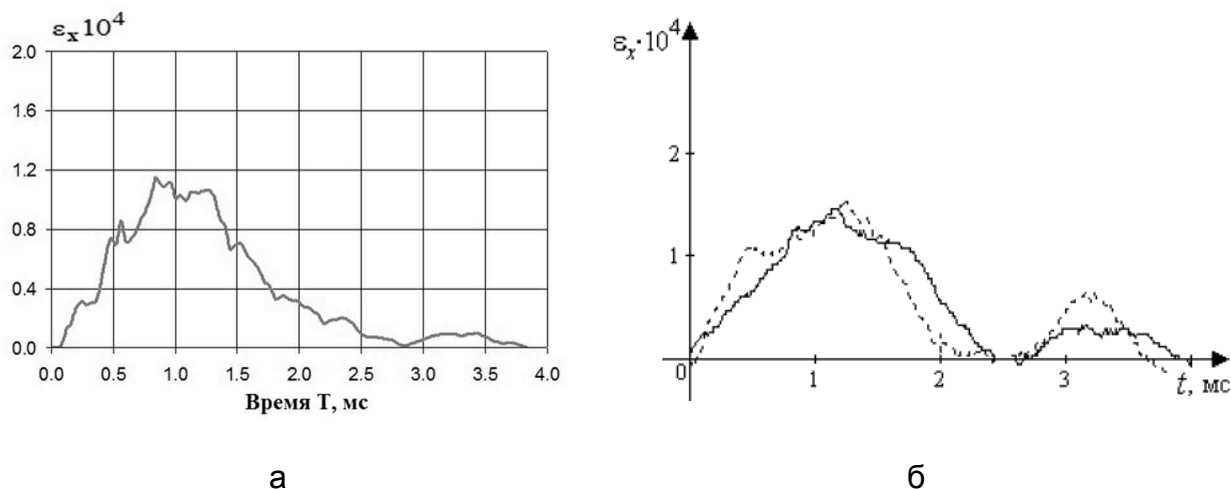


Рис. 5. Деформация плиты-мишени при $\alpha=25^\circ$:
а – расчет, метод SPH; б – натуральный эксперимент

На рис. 6,б кружками обозначены результаты, полученные с использованием тушек птиц, квадратами – имитаторов.

Из рис. 6 видно, что зависимость деформации плиты-мишени от скорости удара является квадратичной, а ее максимальное значение увеличивается с увеличением скорости соударения. Следует отметить удовлетворительное согласование результата расчета с результатом натурального эксперимента. Максимальная погрешность определения деформации не превышает 12...14 %.

Исследовано влияние скорости соударения на изменение усилия при косом ударе ($\alpha=45^\circ$) (рис. 7).

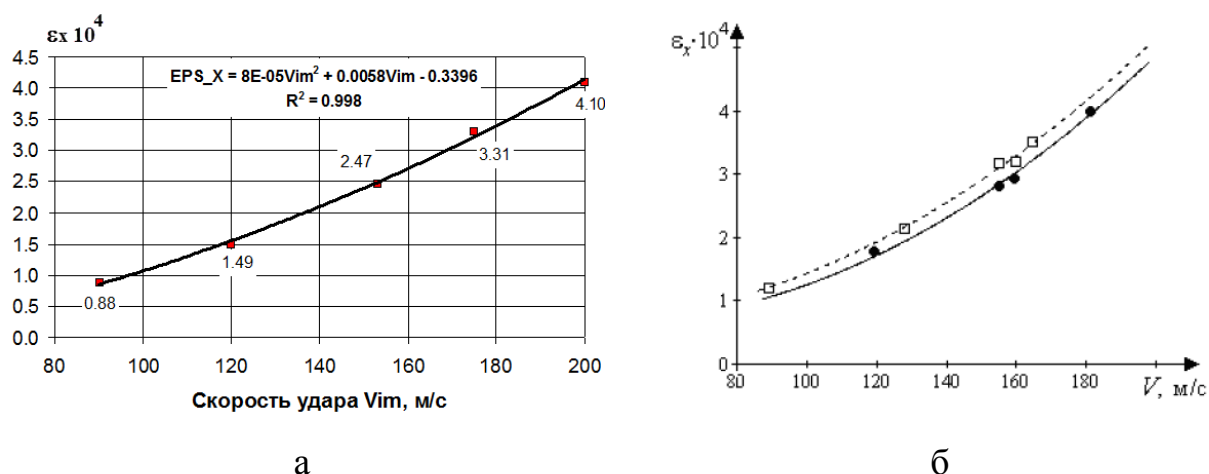


Рис. 6. Влияние скорости соударения на изменение деформаций плиты-мишени при косом ударе ($\alpha=45^\circ$):
а – расчет, метод SPH; б – натуральный эксперимент

Полученный результат аппроксимировали полиномом второй степени с использованием метода наименьших квадратов. Получено аналитическое

выражение, позволяющее определить величину усилия удара при $\alpha=45^\circ$ в зависимости от скорости соударения.

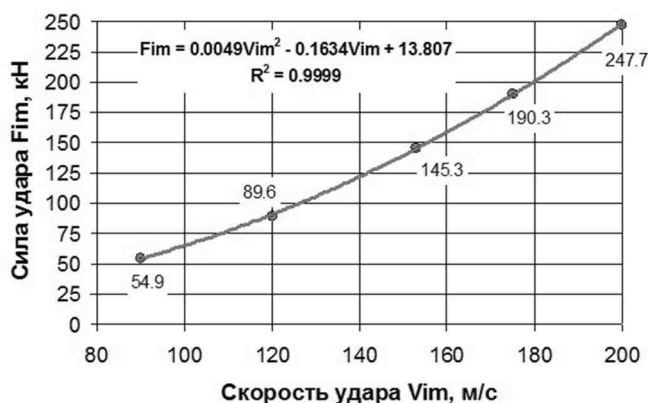


Рис. 7. Влияние скорости соударения на изменение усилия удара при $\alpha=45^\circ$

Из рис. 7 видно, что зависимость усилия удара от скорости удара является квадратичной, а его максимальное значение увеличивается с увеличением скорости соударения.

Исследовано влияние угла соударения на величину осевой деформации (рис. 8) и усилия удара (рис. 9). Из рис. 8 и 9 видно, что с увеличением угла соударения значения деформации и силы удара возрастают.

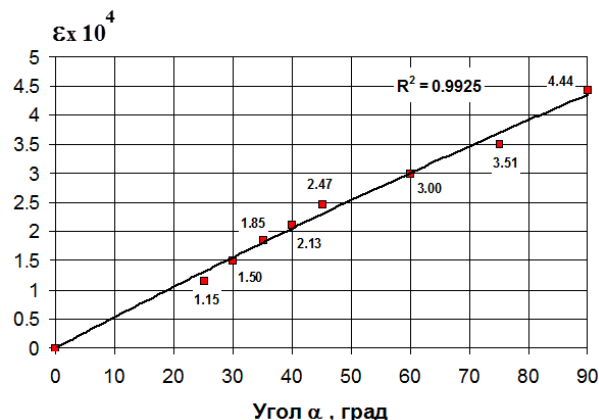


Рис. 8. Изменение деформации плиты-мишени в зависимости от угла соударения

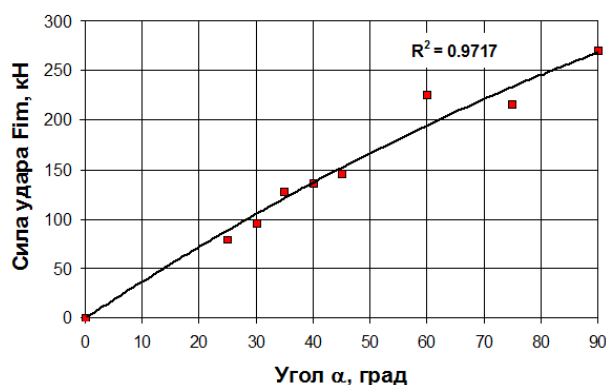


Рис. 9. Изменение силы удара в зависимости от угла соударения

При этом зависимость деформации плиты-мишени от угла соударения линейная, а зависимость силы удара от угла соударения нелинейная.

Выводы

1. Исследовано влияние угла соударения и скорости удара на изменение величины осевых деформаций и реакции плиты-мишени при ударе мягкого тела.
2. Исследовано влияние граничных условий на характер распределения осевой деформации при ударе. Выполнено сравнение результатов расчета

с результатами натурального эксперимента с использованием тушек птиц и имитатора. Получено удовлетворительное согласование результатов.

3. Получены аналитические зависимости для расчета осевой деформации и усилия удара для разных скоростей при косом ударе для $\alpha=45^\circ$.

Список литературы

1. Budgey, R. The development of a substitute artificial bird by the International Birdstrike Research Group for use in aircraft component testing // Conference of International Bird Strike Committee 25/WP-IE3. – Amsterdam, 2000. – P. 543–550.

2. Онгирский, Г. Г. Экспериментальное исследование птицестойкости элементов конструкций самолета [Текст] / Г. Г. Онгирский, А. Н. Шупиков, С. В. Угримов и др. // Сб. научн. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2011. – Вып. 2. – С. 49-59.

3. LS-DYNA. Theory Manual. Version 971. – Livermore: LSTC, 2006. – P. 3.1–3.6.

4. LS-DYNA. Keyword user's manual. Version 971. – Livermore: LSTC, 2006. – P. 7.7–7.18.

Поступила в редакцию 00.00.2017

Аналіз деформацій сталевій плити-мішені при ударі м'якого тіла

На основі методів числового моделювання експерименту визначено деформацію сталевій плити-мішені, а також її реакцію на удар м'якого тіла при різних швидкостях і кутах зіткнення. Виконано порівняння результатів розрахунку з результатами натурального експерименту, отримано їх задовільне узгодження. Розрахунковим шляхом встановлено, що залежність деформації плити-мішені від швидкості удару є квадратичною, а її максимальне значення збільшується зі збільшенням швидкості співударяння. Залежність деформації плити-мішені від кута співударяння лінійна, а залежність сили удару від кута співударяння нелінійна.

Ключові слова: удар, м'яке тіло, птахостійкість, рівняння стану, обчислювальний експеримент, осьова деформація.

Analysis of Deformations of Steel Plate in Case of Soft Body Impact

Using the methods of numerical simulation of experiment deformation of steel plate and its reaction to soft body impact at different velocities and incident angles is calculated. The results of the calculation are compared with the results of the full-scale experiment. A satisfactory agreement of the results was obtained. It has been determined by calculation that the dependence of the plate deformation on the impact velocity is quadratic, and its maximum value increases with increasing impact velocity. The dependence of the plate deformation on the incident angle is linear, and the dependence of the impact force on the incident angle is nonlinear.

Keywords: impact, soft body, bird strike resistance, equation of state, numerical simulation, axial deformation.

Светличный Сергей Петрович – старший преподаватель каф. 202, «теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем» Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.