

ВНУТРЕННЯЯ И ВНЕШНЯЯ БАЛЛИСТИКА

УДК 531.554

В.И. БИМАТОВ, Н.В. САВКИНА*, Е.В. ЖАЛНИН*, Ю.Ф. ХРИСТЕНКО*****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШАРА В ПЛОТНЫХ НЕПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ¹**

Предлагается схема эксперимента, дается описание экспериментального стенда, приводится методика идентификации параметров. Рассмотрены приемы оценивания аэродинамических характеристик с использованием траекторных данных тел, свободно летящих в различных средах. Для построения алгоритма расчета проведен анализ задачи как обратной для дифференциальных уравнений. Приведены результаты оценивания коэффициента лобового сопротивления шара при до- и сверхзвуковых скоростях движения.

Ключевые слова: *аэробаллистический эксперимент, аэродинамические характеристики, лобовое сопротивление, некорректные задачи.*

Одной из проблем динамики летательных аппаратов является эффективное оценивание аэродинамических характеристик. Создание надежных методик их расчета представляет интерес как в плане развития нестационарной сверхзвуковой аэродинамики, так и для решения ряда практических задач.

В настоящем сообщении дается расчет коэффициента лобового сопротивления шара по данным испытаний на баллистическом стенде. На рис. 1 приведен общий вид экспериментальной установки. В состав стенда входит метательная баллистическая установка с электромагнитным датчиком дульной скорости [1–3], резервуар с исследуемой средой, в которую помещена металлическая преграда. На лицевой стороне преграды крепится контактный датчик, регистрирующий момент удара модели о преграду.

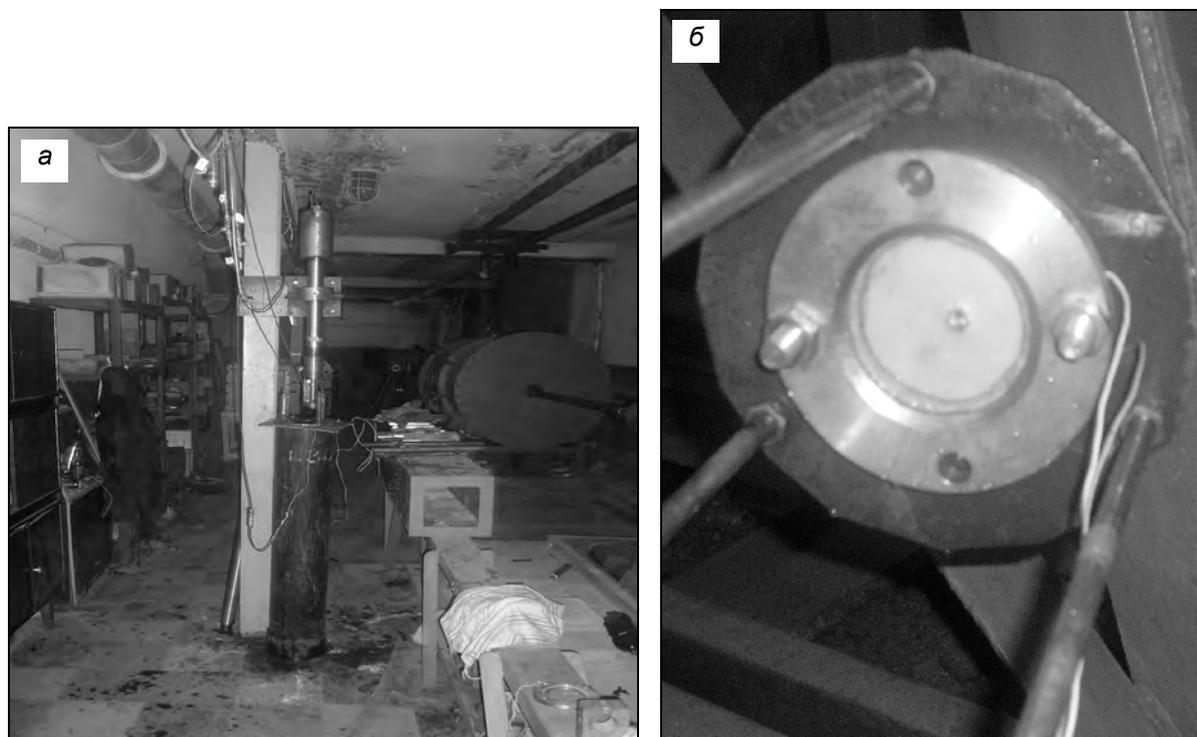


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки (а) и контактного датчика соударения (б)

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00297.

По дульной скорости определяется момент входа модели в исследуемую среду, а по измеренному времени соударения о преграду рассчитывается время прохождения моделью расстояния от поверхности до преграды. Изменяя дульную скорость, а также толщину слоя исследуемого материала, можно определить функцию сопротивления $C_f(M)$ в широком диапазоне изменения параметра $M = V / C_{3B}$.

Методика расчета строится на основе подхода к решению некорректных задач [4, 5]. Система уравнений, описывающая изменение параметров движения шара по баллистической трассе с учетом особенностей баллистического эксперимента, имеет вид

$$\frac{dt}{dx} = V^{-1}; \quad \frac{dV}{dx} = -\frac{\rho s}{2m} V C_f + g; \quad t(0) = t_0; \quad V(0) = V_0. \quad (1)$$

Исходной информацией для оценки неизвестной функции C_f является система измеренных в опыте дискретных значений кинематических параметров движения тела. При таких посылках математическая постановка задачи определения C_f представляет собой задачу оценивания коэффициентов C_i правой части системы (1) и является примером классической обратной задачи для дифференциальных уравнений [2].

Наиболее употребительные методы решения обратных задач по своей природе являются вариационными. Для задач вида (1) в качестве решения принимают вектор $\bar{C}\{c_i\}$, доставляющий минимум функционалу:

$$\rho(\bar{p}_H, \bar{p}_P) = \min_{\bar{C}, \bar{p}_0} \|\bar{p}_H(t) - \bar{p}_P(t)\|, \quad (2)$$

где \bar{p}_H – совокупность экспериментальных данных о параметрах движения; \bar{p}_P – рассчитанные значения параметров движения.

Специфической особенностью экспериментов на баллистических установках является относительно малый объем измерительной информации о параметрах движения тела.

Предлагаемая методика расчета аэродинамических характеристик основана на использовании системы дифференциальных уравнений (1) движения твердого тела. Для поиска минимума функционала (2) используется вещественный генетический алгоритм [2], позволяющий находить глобальный экстремумы для мультимодальных функций. Будучи вероятностным, генетический алгоритм тем не менее не является просто еще одним вариантом случайного поиска, поскольку при отборе новых точек с ожидаемыми более хорошими возможностями он эффективно использует предыдущую информацию. Применяемый в данной работе вещественный генетический алгоритм (ВГА) совмещает в себе детерминистический и вероятностный подходы и основан на механизмах природной селекции и генетики. Важным свойством генетического алгоритма является также его сравнительно легкая адаптация к параллельным компьютерам, дающая возможность эффективно использования современных вычислительных ресурсов.

Если параметры исследуемой среды определены с некоторой погрешностью, например скорость звука в насыщенной газом суспензии, то возникает необходимость определять ее непосредственно в процессе эксперимента. С этой целью на тыльной стороне преграды крепятся два датчика, которые регистрируют момент подхода ударной волны, возникающей при входе модели в исследуемую среду. Основой таких датчиков являются измерительные модули электромагнитных датчиков дульной скорости [1], в которых специально увеличена магнестрикционная составляющая полезного сигнала. Эксперименты на модельной жидкости подтвердили работоспособность такого метода определения скорости звука.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициентов сопротивления шара для трех материалов: льда, песка и полиэтилена. Плотность и скорость звука для этих материалов имеют следующие значения.

лед:	$\rho = 917 \text{ кг/м}^3$,	$C = 2800 \text{ м/с}$;
песок:	$\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$,	$C = 2000 \text{ м/с}$;
полиэтилен:	$\rho = 960 \text{ кг/м}^3$,	$C = 2200 \text{ м/с}$.

Коэффициенты сопротивления представлены экспоненциальными зависимостями от чисел Маха: $C_f = a_1 + a_2 \cdot \exp[-a_3(M - a_4)^2]$.

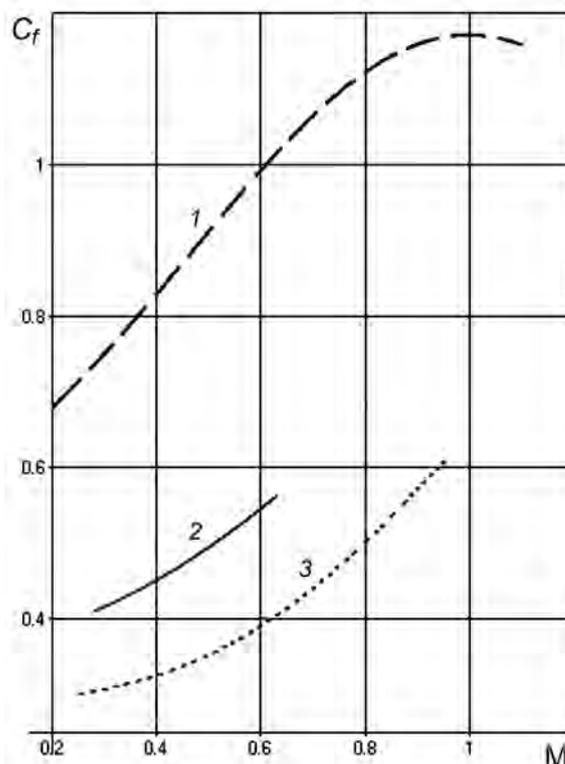


Рис. 2. Зависимость лобового сопротивления шара от чисел Маха в различных материалах: кр. 1 – песок; кр. 2 – лед; кр. 3 – полиэтилен

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кульпин В.И., Синяев С.В., Христенко Ю.Ф. Датчик положения и скорости перемещения быстро движущихся тел // Патент РФ № 219 3207. Бюлл. № 32, 2002.
2. Христенко Ю.Ф., Жалнин Е.В., Герасимов А.В., Жаровцев В.В. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 10/2. – С. 198-202.
3. Биматов В.И., Жалнин Е.В., Жаровцев В.В., Погорелов Е.В., Христенко Ю.Ф. Трехступенчатая легкогазовая установка / Заявка на изобретение № 2012118139. Приоритет от 03.05.2012.
4. Биматов В.И. // Изв. вузов. Физика. – 2005. – Т. 48. – № 11. – С. 30-36.
5. Биматов В.И., Христенко Ю.Ф. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 12/2. – С. 46-48.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 27.05.13.

*НИИ прикладной математики и механики Национального исследовательского
Томского государственного университета, г. Томск, Россия
E-mail: vbimatov@mail.ru

Биматов Владимир Исмагилович, д.ф.-м.н., зав. кафедрой;
Савкина Надежда Валерьевна, аспирантка;
Жалнин Евгений Викторович, техник;
Христенко Юрий Федорович, д.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.