

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барашков В.Н. Численный анализ деформирования метаемого поддона // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. II научн. конф. Волжского регион. центра РАН, г. Саров, 29 мая–01 июня 2001 г. — Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. — С. 71–78.
2. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин: Учеб. пособие. — М.: Машиностроение, 1973. — 456 с.
3. Гриффин Д.С., Келлог Р.Б. Численное решение осесимметричных и плоских задач упругости // Механика: Сб. переводов. — М., 1968. — № 2 (108). — С. 111–125.
4. Барашков В.Н. Алгоритм реализации задачи теории упругости и пластичности вариационно-разностным методом. Ч. I // Известия Томского политехнического университета. — 2003. — Т. 306. — № 3. — С. 23–28.
5. Барашков В.Н. Алгоритм реализации задачи теории упругости и пластичности вариационно-разностным методом. Ч. II // Известия Томского политехнического университета. — 2003. — Т. 306. — № 4. — С. 23–27.
6. Барашков В.Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния метаемых сборок // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 1. — С. 29–33.
7. Башуров В.В., Бухарев Ю.Н., Терешин А.И., Тверсков А.В. Численное моделирование по программе SPH процессов соударения сферических ударников с преградами со скоростями 1–6 км/с // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. II научн. конф. Волжского регион. центра РАН, г. Саров, 29 мая–01 июня 2001 г. — Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. — С. 23–33.

УДК 533.6

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ГРУППОВОГО ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СИЛЫ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ НА БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ТРАССЕ

В.К. Якушев

Томский государственный университет
E-mail: ntn@ftf.tsu.ru

Рассматривается новый способ определения коэффициента силы лобового сопротивления, основанный на регистрации в одном опыте параметров движения двух тел — исследуемого и контрольного. Излагается методика баллистического эксперимента. Для определения искомых коэффициентов приводятся расчетные уравнения, вид которых зависит от выбора аэродинамической формы контрольного тела.

При исследовании тел с новыми аэродинамическими формами возникает важный класс внешнебаллистических задач. В нем движение тела задано и требуется определить силы и моменты, под действием которых это движение совершается. Параметры движения в этом случае определяются экспериментально на баллистической трассе. Успех решения данных задач зависит от выбранной модели движения, методики проведения эксперимента и обработки полученных экспериментальных данных.

Одной из составляющих результирующей аэродинамической силы, действующей на тело в полете, является сила лобового сопротивления, которая определяется значением безразмерного коэффициента C_x . Традиционные способы нахождения этого коэффициента на баллистической трассе предполагают определение координат характерных точек тела в заданных сечениях траектории и временных интервалов между моментами регистрации координат [1]. Дополнительно до опыта определяются параметры среды и массово-геометрические характеристики исследуемого тела. Вид расчетных формул для нахождения C_x определяется той математической моделью и теми ограничениями на физическую картину рассматриваемого явления, которые принимаются для описания процесса движения тела на траектории [1, 2]. Недостатки такого

подхода известны и связаны с необходимостью нахождения значений скорости тела на блокируемом участке траектории, которые не измеряются в опыте, а определяются расчетом по полученным перемещениям характерных точек тела в дискретные моменты времени [3]. Нахождение скорости тела является операцией дифференцирования, которая приводит к более существенным ошибкам, чем ошибки исходных данных. В общем случае скорость тела является нелинейной функцией времени. Поэтому возникают дополнительные ошибки при осреднении скорости. Следует заметить, что часто определяется не коэффициент C_x в какой-то конкретной точке, а его среднее значение на некотором участке траектории [1]. Кроме того, число пространственно-временных измерений в одном опыте зависит от вида зависимости коэффициента C_x от массово-геометрических характеристик тела. Поэтому для каждого класса исследуемых тел необходимо разрабатывать свою методику проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных. Это всегда ведет к усложнению экспериментальных исследований, увеличению стоимости применяемого оборудования и удлинению сроков проведения экспериментов.

Ниже предлагается новый способ определения коэффициента C_x , основанный на регистрации в

одном опыте параметров движения группы тел (двух или более) [4]. Сущность способа поясняется на рис. 1, где дана схема его реализации на измерительном участке траектории. Способ в общем виде реализуется следующим образом [5]. Производят параллельное и прямолинейное метание двух тел различной формы, размеров и массы (исследуемого "и" и контрольного "к") таким образом, чтобы в момент времени $t_0=0$ оба тела с одинаковой скоростью пролетели начальное сечение регистрации "0". На измерительном участке траектории осуществляют одновременно регистрацию координат этих тел в начальном "0", первом "1" и втором "2" сечениях регистрации относительно неподвижной системы координат ОХУ и определяют величины перемещения характерных точек исследуемого и контрольных тел x_{u1}, x_{k1} за время t_1 , x_{u2}, x_{k2} за время t_2 . Коэффициенты лобового сопротивления C_{xu} исследуемого и C_{xk} контрольного тел предполагают постоянными на измерительном участке траектории. Это предположение является общепринятым и выполняется достаточно точно, так как измерения производятся на участке трассы небольшой протяженности.

Прямолинейное движение центров масс двух тел при отсутствии взаимодействия их обтекания можно описать известной системой дифференциальных уравнений [3]:

$$\begin{aligned} m_u \frac{d^2 x}{dt^2} &= -C_{xu} \frac{\rho S_u}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2, \\ m_k \frac{d^2 x}{dt^2} &= -C_{xk} \frac{\rho S_k}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_u и m_k – массы; S_u и S_k – площади миделевого сечения исследуемого и контрольного тел; ρ – плотность газовой среды.

Дважды интегрируя (1) при начальных условиях $t_0=0, x_0=0, V=V_0$ получают зависимости для перемещений тел за промежуток времени t_1 между начальным "0" и "1" сечениями регистрации

$$\begin{aligned} x_{u1} b_u C_{xu} &= \ln(b_u C_{xu} V_0 t_1 + 1); \\ x_{k1} b_k C_{xk} &= \ln(b_k C_{xk} V_0 t_1 + 1), \end{aligned} \quad (2)$$

где $b_u = \frac{\rho S_u}{2m_u}, b_k = \frac{\rho S_k}{2m_k}$ коэффициенты, включающие постоянные параметры соответственно исследуемого и контрольного тел.

Потенцируя (2) и исключая множитель $V_0 t_1$, получают уравнение

$$\frac{e^{x_{u1} b_u C_{xu}} - 1}{b_u C_{xu}} = \frac{e^{x_{k1} b_k C_{xk}} - 1}{b_k C_{xk}}. \quad (3)$$

Аналогично (2) составляют систему уравнений для перемещений исследуемого и контрольного тел за время t_2 между начальным "0" и "2" сечениями регистрации, которая после преобразований имеет вид

$$\frac{e^{x_{u2} b_u C_{xu}} - 1}{b_u C_{xu}} = \frac{e^{x_{k2} b_k C_{xk}} - 1}{b_k C_{xk}}. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) образуют систему двух уравнений с двумя неизвестными коэффициентами лобового сопротивления исследуемого C_{xu} и контрольного C_{xk} тел.

Величины ρ, m_u, m_k, S_u, S_k определяются до опыта. Перемещения $x_{u1}, x_{u2}, x_{k1}, x_{k2}$ за промежуток вре-

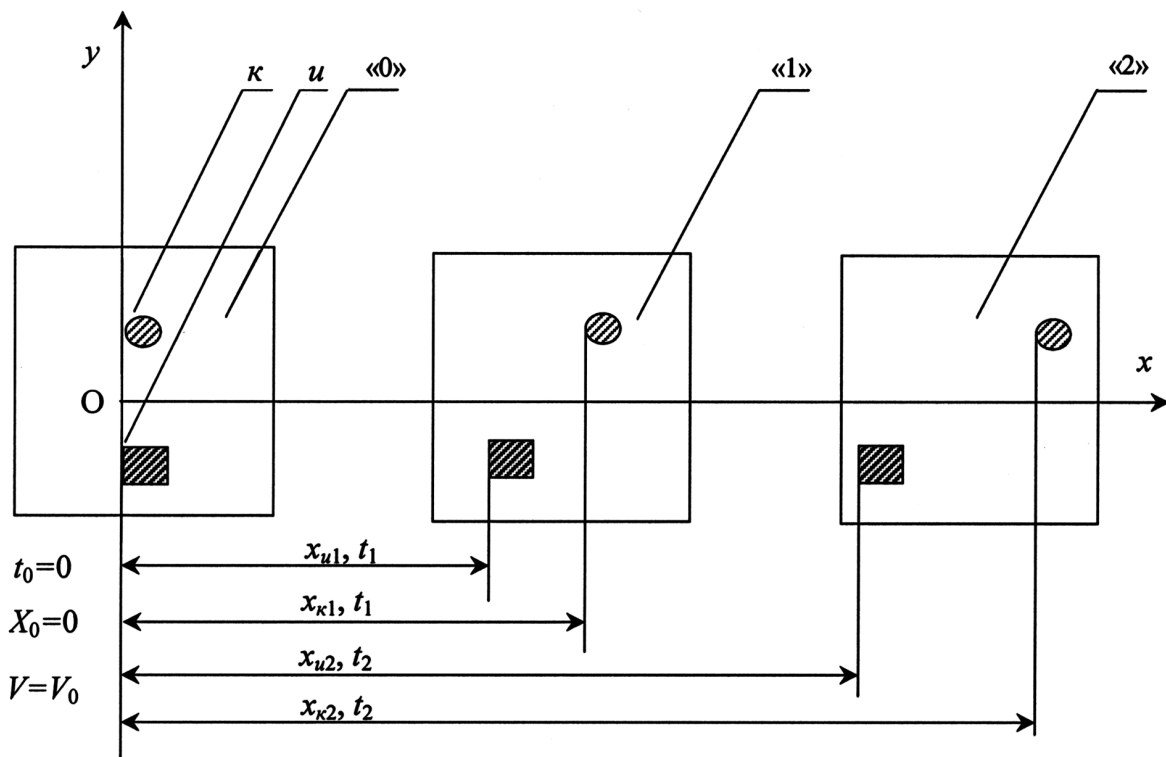


Рис. 1. Схема реализации способа на измерительном участке траектории

мени t_1 и t_2 получают с точностью, определяемой разрешающей способностью фотоматериалов, юстировкой баллистической трассы и выбранной оптической схемой системы фотографирования [6]. При этом методическая ошибка предлагаемого способа обусловлена предположением равенства начальных скоростей V_0 исследуемого и контрольного тел в нулевом сечении регистрации "0" и предположением о постоянстве коэффициентов C_{xu} и C_{xk} на измерительном участке траектории. Следует заметить, что в (3) и (4) не входят значения скорости V_0 и времен t_1 и t_2 . Значение t_1 необходимо только для расчета скорости V_0 , соответствующей искомым значениям коэффициентов C_{xu} и C_{xk} :

$$V_0 = \frac{1}{t_1} \frac{e^{x_{u1} b_u C_{xu}} - e^{x_{k1} b_k C_{xk}}}{b_u C_{xu} - b_k C_{xk}}$$

и не требуется для расчета самих коэффициентов, а время t_2 в опыте можно не определять.

При реализации предлагаемого способа в качестве контрольного тела может быть выбрано тело произвольной аэродинамической формы с неизвестным до опыта коэффициентом лобового сопротивления; тело, имеющее ту же аэродинамическую форму, что и исследуемое и отличающееся от него значениями S_x и m_k ; тело с заранее известным с большой точностью значением C_{xk} . В случае, когда контрольное тело имеет ту же аэродинамическую форму, что и исследуемое тело, уменьшается число сечений регистрации до двух, отпадает необходимость в определении величины перемещений x_{u2} и x_{k2} . При этом система ур. (3) и (4) преобразуется в соотношение

$$\frac{e^{x_{u1} b_u C_{xu}} - 1}{b_u} = \frac{e^{x_{k1} b_k C_{xk}} - 1}{b_k}. \quad (5)$$

Уменьшается число измеряемых кинематических параметров и в случае, когда в качестве контрольного тела выбирают тело с заранее известным с большой точностью значением коэффициента лобового сопротивления C_{xk} . Искомый коэффициент C_{xu} находят из соотношения (3). Перечисленный выбор контрольного тела зависит от условия, накладываемого, в конечном счете, на аэродинамические и массово-геометрические параметры метаемых тел. Это условие мы назвали "условием аэродинамической совместимости" и оно может иметь следующий вид:

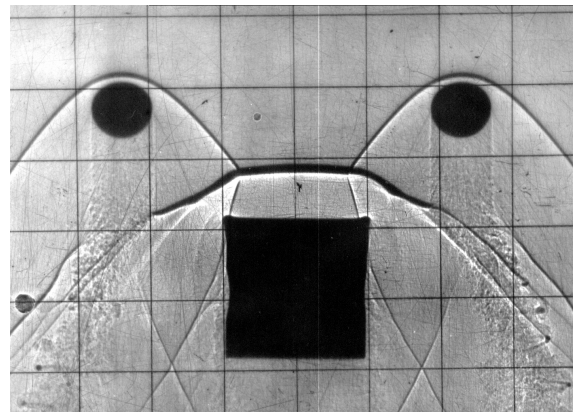
$$x_{u1} < \frac{1}{C_{xk} b_k} \left[e^{x_{k1} b_k C_{xk}} - 1 \right] < x_{u1} e^{2 x_{u1} b_u}.$$

Физически это условие означает, что определяемые координаты метаемых тел в фиксированный момент времени t_1 должны располагаться в расчетной зоне выбранного сечения регистрации. Данное условие может быть использовано еще на стадии подготовки эксперимента.

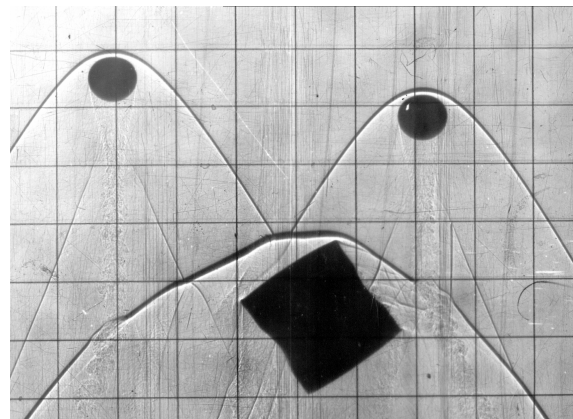
Принципы предлагаемого способа допускают множество вариантов применения его на практике. Так, если коэффициент лобового сопротивления считать зависящим от скорости, то эту зависимость можно записать в виде, как это предлагается в [1]

$$\frac{C_x}{C_{x0}} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha, \quad (6)$$

где C_{x0} – коэффициент силы лобового сопротивления, соответствующий величине начальной скорости V_0 ; α – показатель степени, характеризующий влияние скорости на коэффициент силы лобового сопротивления. Подставляя (6) в уравнения движения (1), после двукратного их интегрирования получим выражения для изменения координат исследуемого и контрольного тел, в которые будет входить величина α . Полагая в (6) $\alpha=0$, мы получаем зависимость (2), для которых коэффициенты C_{xu} исследуемого и C_{xk} контрольного тел считаются постоянными на измерительном участке траектории.



а)



б)

Рис. 2. Теневые снимки движения двух аэродинамически подобных тел для сечений регистрации: а) "0"; б) "1"

Экспериментальные исследования проводились на баллистической трассе НИИ ПММ при ТГУ. Метательная установка имела диаметр 23 мм. Измерительный участок баллистической трассы равнялся 25 м. На нем последовательно располагались оптические станции регистрации, представляющие собой измерительные комплексы, использующие для визуализации обтекания движущихся тел и определения их координат метод "светящейся точки" [6], а для измерения скорости тел – бесконтактные блокирующие барьеры. Исследования проводились в диапазоне начальных скоростей $V_0=680...1200$ м/с.

Для получения равных начальных скоростей V_0 исследуемого и контрольного тел в нулевом сечении регистрации "0" они помещались в контейнер. Последний представлял собой цилиндр, со стороны головной части которого выполнялся осевой канал, разветвляющийся на два радиальных канала. Каналы соединялись с полостями, в которые помещались исследуемое и контрольное тела. Процесс выброса тел происходил через боковую поверхность контейнера под действием аэродинамических сил, создаваемых набегающим потоком газа [4].

На рис. 2 приведены теневые снимки движения в "0" и "1" сечениях регистрации двух аэродинамически подобных тел с одинаковыми C_x .

Видно, что в "0" сечении тела имеют одно и то же начальное положение, что свидетельствует о равенстве их начальных скоростей V_0 . Благодаря тому, что их коэффициенты b_u и b_k имеют разное значение, одно из тел начало заметно опережать другое в "1" сечении (рис. 2). Устройство для выброса тел из контейнера исключает возникновение аэродинамических интерференционных явлений, обусловленных взаимовлиянием их обтекания.

Поэтому, определяя взаимное расположение тел на траектории в рассматриваемом случае, можно найти значение для их общего коэффициента лобового сопротивления, используя соотношение (5). Способ позволяет также определять неизвестные C_x одновременно для нескольких тел.

И, наконец, возможно использование эффекта группового движения тел и в случае проведения экспериментов, в которых определяются не перемещения исследуемого и контрольного тел на траектории, а промежутки времени, за которые они пролетают блокирующие барьеры.

Таким образом, теоретический анализ и проведенные экспериментальные исследования показали, что при соответствующем подборе параметров исследуемого и контрольного тел относительная ошибка определения неизвестного коэффициента C_x может быть не более 2...3 %. При этом сокращается количество станций регистрации и снижаются материальные затраты на проведение эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях // Под ред. Н.А. Златина и Г.И. Мишина. — М.: Наука, 1974. — 344 с.
2. Костров А.В., Шатило А.М. Модельно-экспериментальные методы определения аэромеханических характеристик летательных аппаратов на баллистических трассах. — М.: МО СССР, 1982. — 196 с.
3. Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика. — М.: Машиностроение, 1972. — 584 с.
4. Якушев В.К. Способ определения коэффициента лобового сопротивления тел на основе эффекта группового движения // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. II научной конф. Волжского регионального центра РАН. — Саров: РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2003. — С. 199–202.
5. Пат. 2145067 Россия. МПК G01M 9/00. Баллистический способ определения коэффициента лобового сопротивления тела / В.К. Якушев, В.И. Биматов, Р.Г. Николаев. Заявлено 8.05.1998; Опубл. 27.01.2000, Бюл. № 3. — 16 с: ил.
6. Оптические методы исследования в баллистическом эксперименте / Под ред. Г.И. Мишина. — М.: Наука, 1979. — 230 с.

УДК 553.06

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ФОРМАЦИОННОГО МЕТОДА В РУДНОЙ ГЕОЛОГИИ. Часть 1

И.В. Кучеренко

Томский политехнический университет
E-mail: lev@tpu.ru

Приведена оценка состояния формационного метода в рудной геологии. Рассмотрены теоретические основания формационного метода и следующие из них подходы к оценке содержания рудных формаций. Даны формулировки рудных формаций в рамках моно- и поликомпонентного направлений рудноформационных исследований, показано вещественное и геологическое содержание рудных формаций в трудах ведущих специалистов. Сделан вывод о необходимости корректировки диагностических признаков рудных формаций как условия совершенствования формационного метода.

Введение

Формационный метод в современном понимании его назначения и содержания применяется в практике металлогенических исследований в течение последних пятидесяти лет. В рамках метода оформилось два направления, которые можно

обозначить как моно- и поликомпонентное. Первое, предполагающее группировку в одну совокупность месторождений одного вида полезного ископаемого, наследует идеи академика С.С. Смирнова, реализованные им на примере месторождений олова [1, 2], второе — предложения чл.-корр. АН СССР Ю.А. Билибина [3, 4], согласно которым месторож-