

ЯЦЫНА С. К.,  
кандидат технических наук

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕЛ И КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВОЗДУХОПРОВОДОВ ОТНОСИТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Для расчета пневмотранспортных установок, аспирационных каналов зерноочистительных машин, времени и траектории полета тел в воздушной среде и в других случаях, когда взаимодействием тела с воздушной средой пренебречь нельзя, необходимо знать аэродинамические свойства тел и коэффициенты местных сопротивлений воздухопроводов.

Одной из основных аэродинамических характеристик тел является скорость витания, т. е. такая скорость воздуха в вертикальной трубе, при которой данные тела находятся в трубе во взвешенном состоянии, витают, совершая незначительные колебательные движения по высоте. Для этого случая имеет место равенство:  $Q=R$ , где  $Q$  — вес тела;  $R$  — сила сопротивления воздушного потока. Но сила  $R = k \frac{\gamma}{2g} \cdot Fv_{кр}^2$  и, следовательно,

$$Q = k \frac{\gamma}{2g} Fv_{кр}^2, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент лобового сопротивления тела;

$\gamma$  — удельный вес воздуха;

$F$  — Миделево сечение тела (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную к потоку);

$v_{кр}$  — скорость потока воздуха относительно тела, которая для данного случая является критической (скоростью витания);

$g$  — ускорение силы тяжести.

Уменьшение или увеличение  $v_{кр}$  приводит к нарушению условия равновесия: в первом случае тело падает в воздушном потоке, а во втором — поднимается.

Критическую скорость тела можно определить из равенства (1)

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{2gQ}{k\gamma F}}.$$

Однако по этому уравнению  $v_{кр}$  можно определить только в том случае, если известен коэффициент лобового сопротивления  $k$ , который зависит не только от формы, состояния поверхности и удельного веса тела, но и от состояния среды (барометрического давления, температуры и влажности воздуха). Когда коэффициент  $k$  неизвестен, то сначала опытным путем определяют критическую скорость, а затем вычисляют коэффициент  $k$  и другие аэродинамические характеристики (коэффициент парусности  $k_{п}$  и число Рейнольдса).

Критические скорости тел в настоящее время определяются экспериментально методом свободного падения в воздушной среде шахты (вертикальный, изолированный от окружающей среды канал) или в вертикальных аэродинамических трубах.

Как первый, так и второй методы очень громоздки и сложны. Достаточно указать, что для достижения критической скорости при свободном падении семян пшеницы необходимо иметь шахту высотой 18—30 м, а для семян гороха — 58—75 м [1; 2]. Естественно, что сооружение таких шахт практически неосуществимо. Поэтому тела сбрасываются в шахтах высотой 9—10 м и в конце падения не достигают критических скоростей. Определение же критических скоростей в этом случае производится аналитическим способом, который не обеспечивает удовлетворительных результатов [1].

Определение критических скоростей в аэродинамических трубах производится путем помещения тел в воздушный поток вертикальной слегка расширяющейся кверху (на 1—3°) трубы. При условии равновесия, когда тело находится во взвешенном состоянии, замеряется среднее динамическое давление потока  $H_1$  в поперечном сечении трубы, где установилось равновесие, и затем определяется критическая скорость  $v_{кр}$ , которая является средней скоростью потока в данном сечении

$$H_1 = \frac{\gamma}{2g} v_{кр}^2; \quad v_{кр} = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} H_1}.$$

Эта формула определения  $v_{кр}$  с учетом тарировки аэродинамической трубы, погрешностей проведения опыта и измерительных приборов будет иметь вид:

$$v_{кр} = \alpha k_1 k_2 k_3 \sqrt{\frac{2g}{k_5 k_6 k_7 \gamma} H_1}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент аэродинамического поля, получаемый при тарировке аэродинамической трубы и связывающий среднюю скорость потока  $v_{кр}$  с максимальной скоростью потока по центру трубы  $v_{макс}$  (в точке замера  $H_1$ ) равенством  $v_{кр} = \alpha v_{макс}$ ;

- $k_1$  — коэффициент, учитывающий конструктивные несовершенства пневмометрической трубки;
- $k_2$  — коэффициент, учитывающий погрешности в показаниях микроманометра;
- $k_3$  — поправочный коэффициент на правильность установки пневмометрической трубки по направлению потока;
- $k_6, k_7, k_8$  — соответственно поправочные коэффициенты на показания приборов барометрического давления, температуры и влажности окружающей среды.

Определение коэффициента  $\alpha$  достаточно сложно. Необходимо в различных по высоте сечениях трубы определить динамические давления во многих точках (до 45) каждого сечения, находить в каждой точке скорость, определять среднюю и максимальную скорости для данного сечения. Однако и при этих условиях действительную среднюю скорость можем получить с точностью до  $\pm 6\%$  [1, 3].

Для определения коэффициентов  $k_1, k_2, k_3, k_6, k_7$  и  $k_8$  необходимо иметь в наличии эталонные измерительные приборы. В связи с этим и с большим количеством поправочных коэффициентов на практике в большинстве случаев при определении критических скоростей коэффициентами  $k_3, k_6, k_7$  и  $k_8$  пренебрегают [5], принимая при этом стандартные атмосферные условия (давление — 1 атм; температура воздуха — 21°C; относительная влажность — 50%; удельный вес воздуха — 1,2 кг/м<sup>3</sup>). К чему приводят эти пренебрежения, можно показать на следующем примере. При одном и том же атмосферном давлении, например 730 мм рт. ст., изменение температуры от 0 до 18°C изменяет удельный вес воздуха с 1,24 до 1,16 кг/м<sup>3</sup>, а изменение давления с 730 до 770 мм рт. ст. при постоянной температуре, например 18°C, изменяет удельный вес его с 1,16 до 1,22 кг/м<sup>3</sup>.

В связи с громоздкостью, сложностью и относительной неточностью вышеуказанных методов результаты исследований имеют большие погрешности, что подтверждается противоречивостью данных литературных источников.

Так, например, критические скорости по Безручкину И. П. [1] отличаются от критических скоростей по Биланскому У. К. [2] для пшеницы — в 0,99–1,26; ячменя — в 1,2–1,54; кукурузы — в 1,18–1,32; овса — в 1,37–1,54 раза.

Между тем громоздкость, сложность и неточность в определении аэродинамических свойств тел может быть сведена до минимума, если при исследованиях применять относительный метод.

Для определения критической скорости тела (а затем и остальных аэродинамических характеристик) относительным методом в наличии необходимо иметь тело (эталон) с заранее точно определенной, согласно формуле (2) критической ско-

ростью  $v_{кр3}$  (лучше всего пластмассовый или стальной шарик). Помещая эталон в аэродинамическую трубу, замеряем динамическое давление  $H_{д3}$ , при котором эталон находится во взвешенном состоянии. Затем, помещая в эту трубу тело с неизвестной  $v_{крx}$ , замеряем при условии равновесия динамическое давление  $H_{дx}$ .

Как известно, динамическое давление выражается через скорость воздушного потока по формуле

$$H_{д} = \frac{\gamma}{2g} v^2.$$

Тогда в нашем случае для эталонного и исследуемого тела соответственно будем иметь

$$H_{д3} = \frac{\gamma}{2g} v_{кр3}^2; \quad H_{дx} = \frac{\gamma}{2g} v_{крx}^2. \quad (3)$$

Поделив правые и левые части уравнений (3) и решая относительно  $v_{крx}$ , получаем

$$v_{крx} = \frac{v_{кр3}}{\sqrt{\frac{2g}{\gamma} H_{д3}}} = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} H_{дx}}; \quad (4)$$

$$v_{крx} = \frac{v_{кр3}}{\sqrt{H_{д3}}} = \sqrt{H_{дx}}. \quad (4a)$$

Отношение  $\frac{v_{кр3}}{\sqrt{H_{д3}}}$  для каждого конкретного случая является величиной постоянной (изменяется только с изменением атмосферных условий и конструкции аэродинамической трубы). Обозначив его через постоянную  $C$ , имеем

$$v_{крx} = C \sqrt{H_{дx}}. \quad (5)$$

Таким образом, определив предварительно для данных условий постоянную  $C$  и замеряя в последующем при условии равновесия  $H_{дx}$  для исследуемых тел, легко и просто определяем критические скорости.

Простота и точность относительного метода определения аэродинамических свойств тел при наличии эталона с заранее точно известной критической скоростью заключается в следующем:

1. Отпадает необходимость в тарировке аэродинамической

трубы (в определении коэффициента аэродинамического поля  $\alpha$ ), так как при соизмеримых значениях  $v_{кр_3}$  и  $v_{кр_x}$  структура воздушного потока по поперечному сечению трубы практически не изменяется.

2. В результате постоянства структуры воздушного потока замер динамического давления необходимо производить в одной точке поперечного сечения трубы.

3. При линейном законе изменения поправочных коэффициентов, входящих в уравнение (2), отпадает необходимость в тарировке пневмометрической трубки, микроманометра и в наличии приборов, измеряющих барометрическое давление, температуру и влажность воздуха, так как все погрешности в проведении опыта и измерении входят в значение постоянной  $C$  и определяемое  $H_{дх}$  и взаимно друг друга уничтожают.

4. Определение критических скоростей и других аэродинамических характеристик тел относительным методом приводит их к одним и тем же атмосферным условиям, именно к тем, при которых была определена критическая скорость эталона  $v_{кр_3}$ .

Действительно, выразив в уравнении (4, а)  $v_{кр_3}$  через ее значение и подведя под один знак радикала  $H_{дх}$  и  $H_{д_3}$ , получаем

$$v_{кр_x} = \sqrt{\frac{2g}{\gamma_3^0} \Pi_{д_3}^0} \sqrt{\frac{H_{дх}}{H_{д_3}}}$$

Нетрудно видеть, что подрадикальное отношение динамических давлений является безразмерной величиной и поэтому значение  $v_{кр_x}$  приводится к условиям, при которых определялась критическая скорость  $v_{кр_3}$  (при удельном весе воздуха  $\gamma_3^0$  и динамическом давлении  $H_{д_3}^0$ ).

Это очень важное преимущество относительного метода, так как в настоящее время аэродинамические характеристики тел в литературных источниках приводятся без всякой связи с атмосферными условиями.

Можно возразить, что определение критических скоростей эталонных образцов включает всю громоздкость и сложность существующего метода определения критических скоростей тел в аэродинамической трубе. Но вся сущность относительного метода в том и заключается, что такое определение производится только для эталонных образцов и только один раз для каждого образца.

При централизованном изготовлении набора таких эталонных образцов определение аэродинамических свойств тел на местах сводится к простой технической работе.

Коэффициенты местных сопротивлений (к. м. с.) воздухопроводов определяются по формуле

$$\xi = \frac{2gH}{\gamma v^2} - 1, \quad (6)$$

где  $H$  — статическое давление в данном сечении воздухопровода;

$v$  — средняя скорость воздушного потока в этом же сечении;

$\gamma$  — удельный вес воздуха.

Как видим, в формулу (6) входит средняя скорость воздушного потока, определение которой, как это было показано выше, громоздко и сложно. Особенно большая громоздкость и сложность возникают при определении к. м. с. коллекторов и насадков, когда при замене одного другим необходимо в каждом отдельном случае находить среднее динамическое давление путем многократных замеров по поперечному сечению воздухопровода на различных скоростных режимах потока.

Однако такой сложности можно избежать, используя относительный метод определения коэффициентов местных сопротивлений воздухопроводов, который базируется на использовании критических скоростей тел.

Теоретическое обоснование этого метода следующее. Зависимость между статическим давлением  $H$  в данном сечении, скоростью потока  $v$  и к. м. с.  $\xi$  выражается уравнением Бернулли

$$H = \frac{\gamma}{2g} v^2 (1 + \xi). \quad (7)$$

Для поддержания тела в воздухопроводе во взвешенном состоянии скорость воздушного потока в любом воздухопроводе должна быть всегда постоянной и равной критической скорости, т. е. должно быть выполнено условие:  $v = v_{кр} = \text{const}$ .

Следовательно, для данного случая переменными величинами в уравнении (6) являются к. м. с.  $\xi$  (аргумент) и статическое давление  $H$  (функция).

Поэтому для условия равновесия одного и того же тела в воздухопроводах с к. м. с.  $\xi_1$  и к. м. с.  $\xi_2$  получаем

$$H_1 = \frac{\gamma}{2g} v_{кр}^2 (1 + \xi_1); \quad H_2 = \frac{\gamma}{2g} v_{кр}^2 (1 + \xi_2).$$

Путем совместного решения этих уравнений и несложных преобразований приходим к выражению

$$\xi_2 = \frac{H_2}{H_1} (1 + \xi_1) - 1, \quad (8)$$

в котором отношение статических давлений может быть заменено равнозначным ему отношением динамических давлений.

Методика определения к. м. с.  $\xi$  воздухопроводов относительным методом заключается в том, что в воздухопровод с известным  $\xi_1$  помещается произвольно выбранное тело (могут быть использованы эталоны, предназначенные для определения аэродинамических свойств тел) и при условии равновесия замеряется статическое  $H_1$  (или динамическое  $H_{d_1}$ ) давление. Затем в таком же порядке определяется  $H_2$  ( $H_{d_2}$ ) при помещении этого же тела в исследуемый воздухопровод. На основании известного  $\xi_1$  и найденных  $H_1(H_{d_1})$  и  $H_2(H_{d_2})$  по формуле (8) определяется искомый  $\xi_2$ .

При выборе воздухопровода, наиболее отвечающего данным условиям, наличие воздухопровода с известным  $\xi_1$  не обязательно. Приняв к. м. с.  $\xi$  одного из воздухопроводов за единицу и найдя к. м. с. остальных в долях от принятого за исходный, можно решить поставленную задачу.

При данном методе достаточно производить замер давления в одной точке поперечного сечения воздухопровода; нет необходимости в пересчете динамических давлений в скорость; погрешности измерительных приборов (пневмометрической трубки и микроманометра) взаимно уничтожаются при замере давлений в первом и последующих воздухопроводах; нет необходимости в замерах барометрического давления, температуры и влажности воздуха.

На основании всего вышесказанного можно заключить, что использование относительного метода определения аэродинамических свойств тел и к. м. с. воздухопроводов намного упростит эти громоздкие и сложные исследования, приведет аэродинамические свойства тел к единому показателю окружающей среды и повысит точность результатов исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Безручкин И. П. Исследование аэродинамических свойств семян методом свободного падения в воздушной среде. «Сельскохозяйственные машины», 1936, № 1.
2. Биланский У. К., Коллинз С. Х., Чу П. Аэродинамические свойства зерна. „Agricultural Engineering“, 1962, № 4, vol. 43.
3. Рудашевский Д. Ш. Определение критических скоростей хлопкового вороха. «Сельскохозяйственные машины», 1936, № 3.
4. Безручкин И. П. Исследование аэродинамических свойств зерен в вертикальном воздушном потоке. «Сельскохозяйственные машины», 1936, № 3.
5. Квакенбуш Х. Э., Стаут Б. А., Райс С. К. Пневматические способы сбора плодов. „Agricultural Engineering“, 1962, № 7, vol. 43.