

эффективная толщина слоя вовлеченного в движение. По измеренной массе всей воды рассчитывалась высота  $h$  воды в цилиндре, затем по известным  $I_x$ , плотности воды  $\rho$ , решая алгебраическое уравнение:  $\frac{\pi\rho}{2}(h-d)(2Rd-d^2)(R^2-(R-d)^2+R^4d) = I_x$ , определялась эффективная толщина слоя  $d$ , вовлекаемая в движение.

#### Литература

1. Сивухин Д.В. Механика: учеб. пособие для вузов: в 5 т. / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1989. – 576 с.

УДК 531

### ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Студент гр. 10301221 Давыдкин Н.П.

Кандидат физ.-мат. наук, доцент Бобученко Д.С.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Вязкость (коэффициент вязкости) – одна из важных характеристик воздуха, определяющая протекание в нем процессов переноса. Существуют несколько методов измерения вязкости воздуха: капиллярный, вибрационный, метод падающего шарика, ротационный метод вискозиметрии, ультразвуковой метод вискозиметрии [1]. Чаще всего используется капиллярный метод, опирающийся на закон Пуазейля о вязкой жидкости, описывающий закономерности движения жидкости в капилляре. Прибор этого метода – газовый капиллярный вискозиметр. Он состоит из емкости для измерения количества протекающей через капилляр жидкости,  $U$ -образной трубки, калиброванного капилляра диаметром  $0,3$ – $0,7$  мм, устройства для определения скорости течения жидкости. Вязкость определяется по времени протекания исследуемого газа через капилляр. Метод падающего шарика основан на законе Стокса, по которому вязкость измеряется по скорости, с которой шарик двигается в вязкой среде. Методы падающего шарика и ультразвуковой метод применимы для жидкостей. Ротационный метод (соосных цилиндров) заключается в том, что исследуемая вязкая среда помещается зазор между цилиндрами, внутренний цилиндр вращается с постоянной скоростью, внешний цилиндр неподвижный. По измерению момента вращения, передаваемого через исследуемую среду неподвижному цилиндру, рассчитывается вязкость. В данной работе предлагается метод измерения вязкости воздуха на основе измерения периода затухающие колебаний математического маятника.

Математический маятник – это небольшое тело на невесомой нерастяжимой нити (рис. 1).

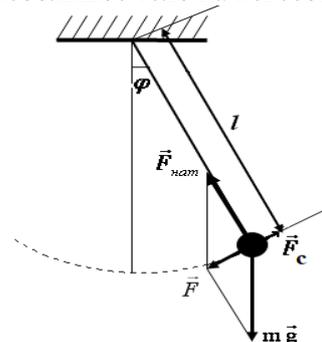


Рис. 1. Математический маятник

Уравнение движения математического маятника с учетом моментов силы тяжести, силы сопротивления:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -mgl \sin \varphi - F_c l$$

где  $J$  – момент инерции маятника. Тело в данном случае представляет собой шарик радиусом  $r$ , и для силы сопротивления применима формула Стокса:  $F_c = 6\pi\eta r v$ ,  $v$  – линейная скорость шарика. Далее, стандартным способом, для малых колебаний  $\sin \varphi \approx \varphi$ ,  $J = ml^2$ ,  $v = l \frac{d\varphi}{dt}$  получим уравнение

затухающих колебаний:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\beta \frac{d\varphi}{dt} + w_0^2 \varphi = 0,$$

в котором  $w_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$ ,  $\beta = \frac{3\pi\eta r}{2ml}$ . Период затухающих колебаний:  $T = \frac{2\pi}{\sqrt{w_0^2 - \beta^2}}$ . Выразив отсюда вязкость,

получим:  $\eta = \frac{2m}{3\pi} \sqrt{\frac{g}{l} - \frac{4\pi^2}{T^2}}$ . Погрешность рассчитывалась по формуле:  $\varepsilon_\eta = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{1}{2} \frac{\frac{\Delta l}{l} + 8\pi \frac{\Delta T}{T^3}}{(\frac{g}{l} - \frac{4\pi^2}{T^2})}$ ,  $\Delta\eta = \eta\varepsilon_\eta$ .

Проведенные измерения и полученные результаты показали, что данный метод может быть использован для измерения вязкости. Но он имеет низкую точность. Вязкость воздуха при нормальных условиях, измеренная различными методами равна  $(1,7-1,8) \cdot 10^{-5}$  кг/(м·с). Предложенным методом вязкость получается в несколько раз больше. И для получения приемлемых результатов сравнимых с результатами, полученными с помощью газового капиллярного вискозиметра, необходимо измерять период колебаний с точностью до десятитысячных долей секунда, а длину маятника до сотых долей миллиметров.

#### Литература

1. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия – СПб.: НПО «Профессионал», 2007. – 838 с.

УДК 681.2.083; 681.2.088

### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПЕЙТНБОЛЬНОГО ШАРА

Студенты гр. 120401 Дулуб Я.В., Хряпин Д.В.

Кандидат техн. наук, доцент Лихошерст В.В.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Россия

Пейнтбол как командная игра имеет в мире большое количество поклонников как профессионалов так и любителей. Различают две основных разновидности: тактический и спортивный [1]. В независимости от разновидности обязательным требованием является обеспечение скорости полета шара из маркера (пневматической пушки) не более 91 м/с. Большая скорость может привести к травмам игроков. Измерение скорости производится регулярно и вопрос точности ее определения является актуальным. Наибольший интерес вызывают устройства позволяющие измерять (вычислять) скорость в полевых условиях (перед входом на игровое поле) и не требующие стационарного размещения – компактные, переносные. Этим требованиям максимально соответствуют устройства, состоящие из оптических датчиков и вычислителя с экраном отображения рассчитанной скорости. Датчики в количестве двух штук располагаются на некотором точно известном расстоянии друг от друга, а срез ствола маркера размещается в непосредственной близости от первого датчика. Вычислитель осуществляет подсчет дискретных интервалов между двумя сигналами, формируемыми датчиками при пролете шара. Скорость шара вычисляется как частное известного расстояния  $S$  и времени полета. Последнее есть произведение числа дискретных интервалов  $n$  (всегда целое число) на длительность в секундах одного интервала  $\Delta t$ . При этом, расстояние между датчиками должно быть достаточно малым для исключения существенного падения скорости движения шара и существенной погрешности измерения при неперпендикулярности траектории шара и плоскостей срабатывания датчиков. Принимая допущения о постоянстве скорости и перпендикулярности траектории получаем, что точность измерения будет зависеть от временного интервала ( $n \Delta t$ ) и времени собственной работы контроллера. Расчет погрешности проводился по выражению:

$$\Delta V = S \left( \frac{n \cdot \Delta t + t_{mcu} - t_{ucm}}{t_{ucm} (n \cdot \Delta t + t_{mcu})} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta V$  – погрешность измерения, м/с;  $t_{ucm}$  – истинное время полета, с;  $t_{mcu}$  – время собственной работы контроллера (вход в прерывание, запуск таймера и т.д.), с.