

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Асылкаев Артур Марселевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Тензометрические измерения аэродинамического сопротивления,
действующего на цилиндр в потоке**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20306

Научный руководитель:

к.т.н., доцент Токарев Михаил
Петрович

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. Солдаткина Елена
Ивановна

Оценка преподавателя
практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин Виталий
Тимофеевич

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Аннотация

Целью работы являлось определение аэродинамического сопротивления цилиндра, помещенного в поток воздуха, с помощью тензометрических преобразователей. Для этой цели была собрана схема для измерения аэродинамического сопротивления. Была разработана схема калибровки тензометрических преобразователей. Выполнено измерение аэродинамического сопротивления, действующего на цилиндр в потоке. На основании полученных данных построены зависимости аэродинамического сопротивления от скорости потока воздуха. Проведено сравнение силы с расчетным значением. Выбрана оптимальная методика, оценены погрешности полученных величин. Результаты хорошо согласуются с расчетными данными. Работа выполнена в Институте Теплофизики СО РАН.

Ключевые слова: аэродинамическое сопротивление, тензометрический преобразователь, мост Уитстона, поток, термоанемометр.

Оглавление	
1	Введение 4
2	Теоретическая часть 4
2.1	Аэродинамическое сопротивление 5
2.2	Принцип действия тензометрических преобразователей 6
3	Практическая часть..... 8
3.1	Описание установки 8
3.2	Методика измерений 9
3.3	Результаты измерений..... 10
4	Заключение 13
5	Библиографический список 13

1 Введение

Жидкости и газы состоят из множества частиц, обладающих огромной подвижностью. Даже небольшое передвижение тела в жидкой или газообразной среде вызывает значительное передвижение частиц в разных направлениях: завихрение и перемешивание масс. Подвижность частиц жидкости или газа приводит к тому, что их траектории оказываются сложными и запутанными, они могут многократно пересекаться друг с другом и сами с собой. Вследствие чего на тело, помещенное в жидкость или газ, действует сила, препятствующая его движению в данной среде.

Знание аэродинамического сопротивления нужно для аэродинамического расчета наземного и воздушного транспорта, потому что от него зависит скорость движения при заданных характеристиках двигательной установки. Также подобные данные требуются при учете прочностных характеристик, строительных и энергетических объектов, например, таких как мосты, башни, различные высотные сооружения и ветровые турбины. Решение такой задачи требует более глубокого исследования движения газа, чем это необходимо для определения суммарного аэродинамического воздействия.

Как известно, опытное исследование взаимодействия между телом и обтекающим его газовым потоком осуществляется при помощи различных технических средств – аэродинамических труб и других установок, имитирующих обтекание тел.

Одним из эффективных способов измерения аэродинамического сопротивления тела в потоке служит устройство, преобразующее измеряемую упругую деформацию в электрический сигнал. Такое устройство носит название тензодатчик. Считывание показаний деформации с линейки механического типа тензодатчика является наиболее простым методом получения необходимой информации. Зная степень и показатель деформации, которые пропорциональны силе,

действующей на тело в потоке жидкости или газа, можно вычислить лобовое сопротивление.

2 Теоретическая часть

2.1 Аэродинамическое сопротивление

Силы от нормального и касательного напряжений, непрерывно распределенные по поверхности обтекаемого тела, могут быть приведены к одному главному вектору \vec{F} аэродинамических сил и главному вектору \vec{M} момента этих сил (Рис. 1) относительно какой-либо точки приведения, называемой центром моментов.



Рис. 1. Составляющие аэродинамических сил и моментов для тела произвольной формы

На практике имеют дело не с векторами \vec{F} и \vec{M} , а с их проекциями на оси какой-либо системы координат. Проекции вектора \vec{F} на оси скоростной системы координат называются соответственно силой лобового (аэродинамического) сопротивления X , подъемной силой Y и боковой силой Z .

Аэродинамическое сопротивление – это сила, с которой газ действует на тело, движущееся в нем. Она всегда направлена в сторону, противоположную скорости. Аэродинамическое сопротивление зависит от размеров тела, от его формы, значения скорости и ориентации тела относительно направления этой скорости. Сила также зависит и от свойств среды, где происходит движение тела.

Аэродинамическое сопротивление определяется следующим выражением:

$$F_x = \frac{1}{2} c_x \rho v^2 S, \quad (1)$$

где c_x – безразмерная величина, называемая аэродинамическим коэффициентом силы лобового сопротивления; ρ – плотность среды, v – скорость движения тела относительно среды, S – площадь фронтальной проекции тела.

Численные значения c_x определяются экспериментально, делают это, как правило, в аэродинамических трубах. Но для некоторых тел значение c_x известно. Например, для цилиндра $c_x = 1,2$.

2.2 Принцип действия тензометрических преобразователей

Тензометрический преобразователь – датчик, который преобразует величину деформации в удобный для измерения сигнал, чаще всего в электрический. Устройство типового проволочного тензодатчика изображено на рисунке 2. На прочную бумагу укладывается зигзагообразная тонкая проволока, к концам которой пайкой присоединяются выводные проводки из фольги (обычно медной). Выводы необходимы для включения датчика в измерительную цепь.

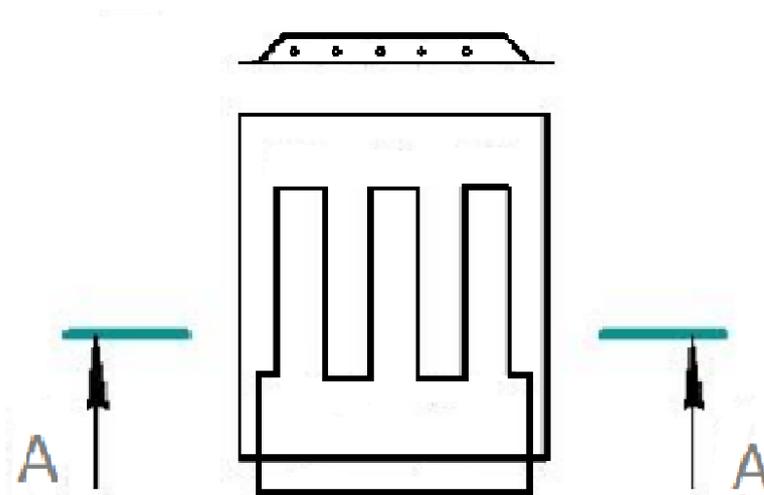


Рис. 2. Типовой проволочный тензометрический преобразователь

Тщательно производится наклеивание тензодатчиков на исследуемую поверхность. Используются специальные сорта клея, обеспечивающие точную передачу данных на тензодатчик, фиксирующий все возможные изменения деформации.

Рассмотрим принцип работы тензодатчиков. Действие тензометрического преобразователя основано на свойстве проволоки, изготовленной из металла изменять электрическое сопротивление по отношению к исходному положению элемента пропорционально его сжатию или удлинению. Изменение сопротивления тензодатчика определяется следующим образом:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} - \frac{\Delta S}{S},$$

где R – сопротивление тензодатчика, l – длина проволоки датчика, S – сечение проволоки, ρ – удельное сопротивление материала.

При удлинении тензодатчика длина проводящих дорожек увеличивается, а поперечное сечение уменьшается, то есть сопротивление будет расти. При сжатии же все произойдет наоборот – длина проводящего элемента уменьшится, а поперечное сечение возрастет, следовательно, сопротивление тензодатчика уменьшится.

Определим чувствительность тензодатчика к деформации:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}},$$

где K – коэффициент чувствительности тензодатчика, μ – коэффициент Пуассона для материала проволоки. Коэффициент чувствительности зависит от свойств материала тензодатчика, от технологии его изготовления, от того, какой сорт клея был использован и как качественно его наклеили.

Рассмотрим схему подключения тензодатчика. Обычно такие датчики включают в одно или два плеча сбалансированного моста Уитстона (Рис. 3), питаемого от источника постоянного тока – диагональ

моста AD. С помощью переменного резистора R_2 производится балансировка моста так, чтобы в отсутствие приложенной силы напряжение диагонали сделалось равным нулю. С диагонали моста BC снимается сигнал, далее подаваемый на измерительный прибор, дифференциальный усилитель или АЦП. При выполнении соотношения: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3}$ напряжение диагонали моста равно нулю. При деформации изменяется сопротивление R_x , например, увеличивается при растяжении материала тензодатчика. Это вызывает снижение потенциала точки соединения резисторов R_x и R_3 , то есть точки В и изменение напряжения диагонали BC моста (Рис. 3).

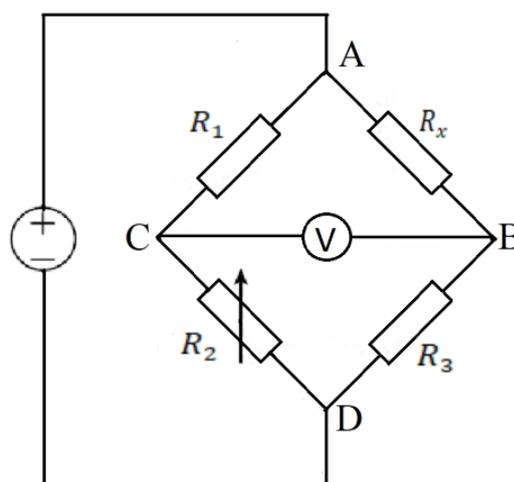


Рис. 3. Электрическая схема моста Уитстона

Таким образом, основная задача тензодатчиков – преобразовывать механическое воздействие в электрический сигнал.

3 Практическая часть.

3.1 Описание установки

Измерительная установка состоит из приводимого во вращение вентилятора, создающего поток воздуха в трубе, причем частоту вращения лопастей можно контролировать (Рис. 4). Поток воздуха, проходя спрямляющую решетку (хонейкоб), становится плоскопараллельным и входит в зону, где помещен испытуемый цилиндр, к концам которого

подключены тензодатчики. Скорость потока воздуха в трубе измеряется термоанемометром. После рабочей части воздух выбрасывается в окружающую часть.

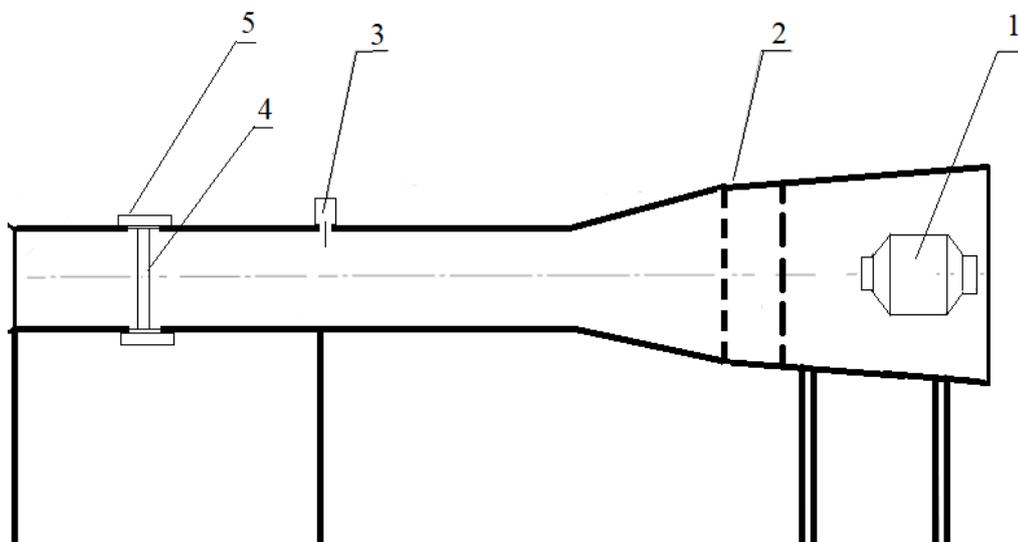


Рис. 4. Схема установки для измерения аэродинамического сопротивления.
1 - вентилятор; 2 - хонейкомб; 3 - термоанемометр; 4 - цилиндр; 5 - тензодатчик

3.2 Методика измерений

Набегающий на цилиндр плоскопараллельный воздушный поток не останавливается полностью, но обтекает его со всех сторон и, тем самым, все-таки сохраняет часть своего импульса. При этом поток срывается с края цилиндра, и за цилиндром возникает вихревая зона. Цилиндр под действием потока будет отклоняться на малое расстояние (Рис. 5).

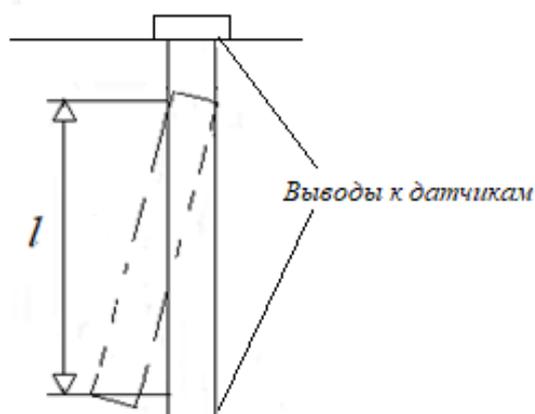


Рис. 5. Схема деформированного цилиндра с наклеенными тензодатчиками

Следовательно, металлическая проволока датчика деформируется, вследствие чего величина деформации преобразуется в электрический сигнал. Компьютер, оснащенный программным обеспечением, считывает показание веса с микроконтроллера Arduino Uno, к которому подключены два мостовых модуля АЦП HX711, используемые для преобразования сигнала с тензодатчика в цифровой 24 битный код и передачи его по интерфейсу I2C в микроконтроллер. В качестве измерителей используются два миниатюрных тензодатчика, рассчитанных на максимальный измеряемый вес в 100г каждый.

Калибровка тензодатчиков осуществлялась без потока по двум точкам: без нагрузки и с подвешенным через блок на подшипнике грузом. В качестве груза использовался разновес из калиброванных гирек, помещенных в корзинку. Вес груза контролировался на цифровых весах с точностью 0,01 г. После записи двух точек по ним вычисляются коэффициенты линейной функции, которые используются для преобразования кода в граммы.

Зная размеры цилиндра, плотность воздуха в трубе и скорость потока, вычисляется аэродинамическое сопротивление. Найдя его, по формуле (1) можно сравнить полученный результат с показаниями тензодатчика.

С помощью штангенциркуля находятся размеры цилиндра (диаметр, высота). Плотность воздуха можно определить, зная атмосферное давление и температуру воздуха, а скорость потока измерить цифровым термоанемометром SEM DT-8880 с точностью 5%.

3.3 Результаты измерений

Используя формулу (1), было посчитано аэродинамическое сопротивление при разных скоростях (измерены термоанемометром).

Измерив диаметр цилиндра ($d = 0,01500 \pm 0,00005$ м) и его высоту ($h = 0,12500 \pm 0,00005$ м), нашли площадь фронтальной проекции тела: $S = dh = 0,001875 \pm 0,000100$ м².

Из табличных значений, выяснили, что аэродинамический коэффициент сопротивления $c_x = 1,2$.

Таблица 1. Расчетное сопротивление цилиндра при разных скоростях

c_x	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$T, ^\circ\text{C}$	$S, \text{м}^2$	$\vartheta, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$F_x, \text{Н}$
1,2	1,1912	$23,6 \pm 0,5$	$0,001875$	$6,97 \pm 0,35$	$0,065 \pm 0,007$
	1,1908	$23,7 \pm 0,5$	$\pm 0,000100$	$10,95 \pm 0,33$	$0,1606 \pm 0,0167$
	1,1888	$24,2 \pm 0,5$		$14,28 \pm 0,71$	$0,273 \pm 0,028$
	1,1884	$24,3 \pm 0,5$		$19,51 \pm 0,98$	$0,51 \pm 0,05$

Вычислив значения аэродинамического сопротивления, была получена его зависимость от скорости.

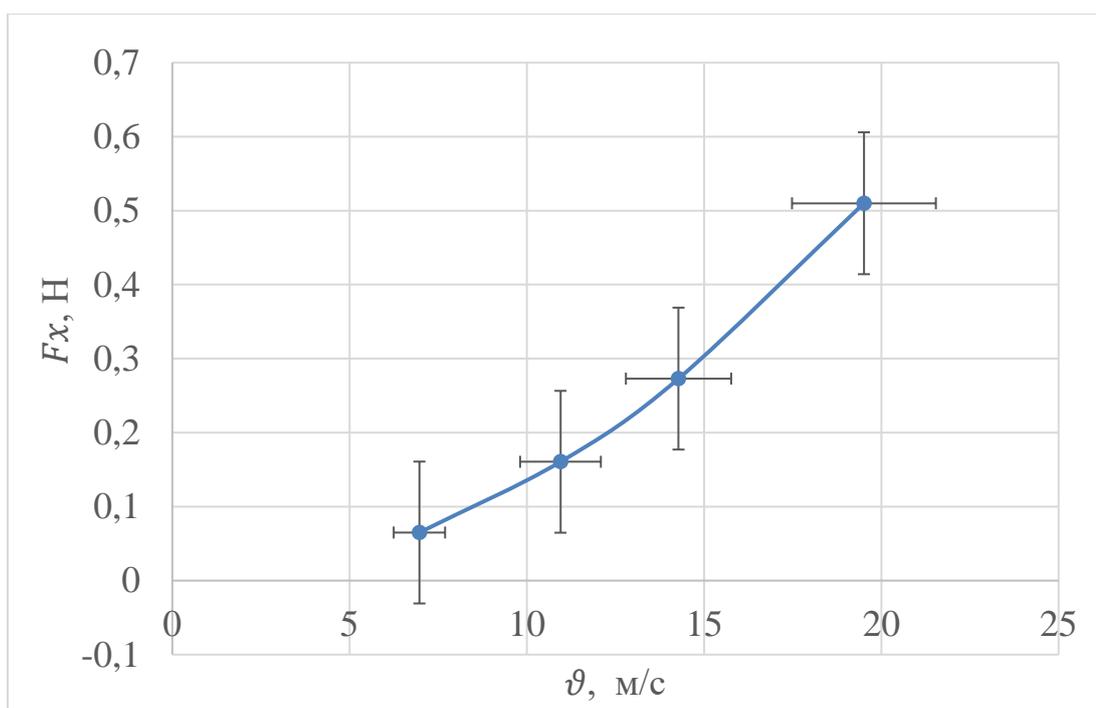


Рис. 6. График зависимости лобового сопротивления от скорости

При тех же значениях скоростей и параметрах системы были измерены значения силы аэродинамического сопротивления, полученные тензометрическими преобразователями:

Таблица 2. Измеренное тензодатчиками аэродинамическое сопротивление при разных скоростях

$\vartheta, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$F_x, \text{Н}$
$6,97 \pm 0,35$	$0,070 \pm 0,001$
$10,95 \pm 0,33$	$0,160 \pm 0,001$
$14,28 \pm 0,71$	$0,240 \pm 0,001$
$19,51 \pm 0,98$	$0,420 \pm 0,001$

Полученная зависимость лобового сопротивления от скорости представлена на рис.7.

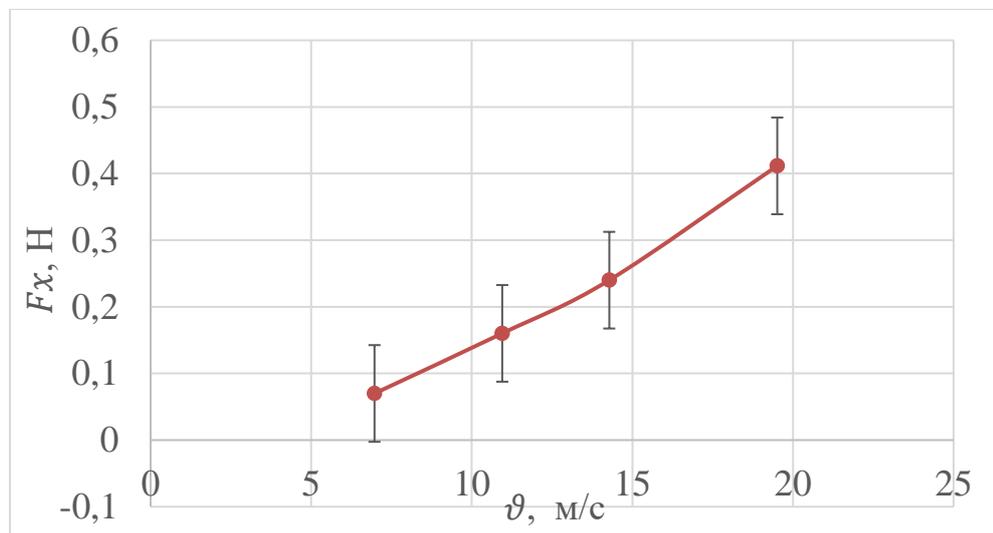


Рис. 7. График зависимости лобового сопротивления от скорости

Для сравнения показаний тензодатчиков с расчетными значениями привел обе зависимости на одном графике (рис. 8).

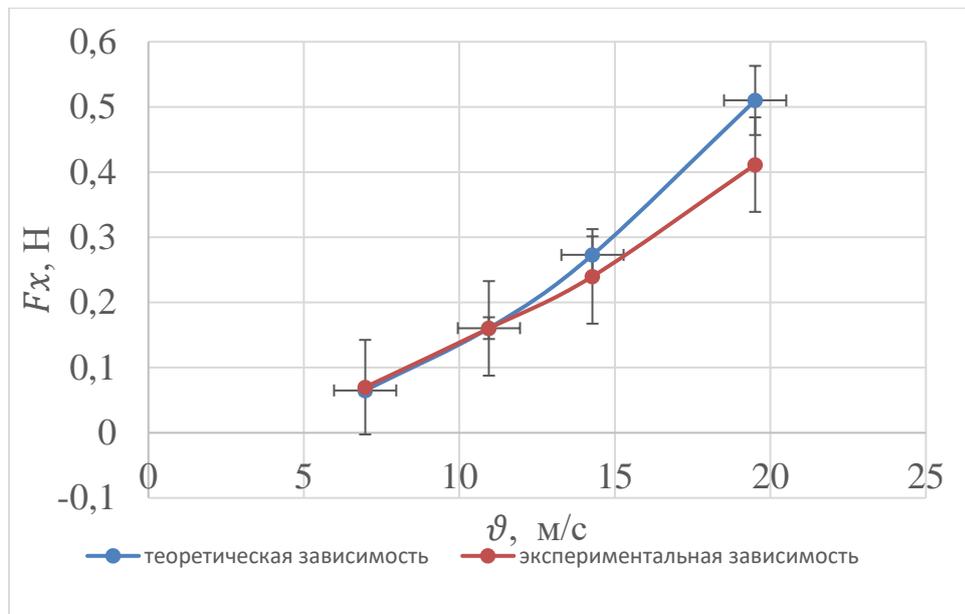


Рис. 8. Графики зависимости аэродинамического сопротивления от скорости

4 Заключение

Изучены принципы измерения механических сил и моментов с помощью тензодатчиков. Изучено влияние набегающего потока на аэродинамическое сопротивление тел, помещенных в поток. Собрана схема для тензометрического измерения силы аэродинамического сопротивления, действующего на гладкий цилиндр. Разработана схема калибровки тензодатчиков. Проведены измерения силы аэродинамического сопротивления и выполнено сравнение силы с расчетным значением. Погрешность измерения силы составила 0,001 Н. Отличие между расчетным и измеренным значением связана с неоднородностью потока вблизи стенок канала, в который помещен цилиндр.

5 Библиографический список

1. Аэродинамика. / Н. Ф. Краснов. Москва: «Высшая школа», 1976. – 6, 28-29с.
2. <https://www.asutpp.ru/tenzodatchik.html>
3. <https://samelectrik.ru/chto-takoe-tenzodatchik.html>

4. <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/085/591.htm>