

УДК 533.6.08

Экспериментальное исследование приемника полного давления для измерения скоростей в потоке

*Шуев Г.Ю., студент
кафедра «Ядерные реакторы и установки»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана*

*Научный руководитель: Гетя С.И., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана
bauman@bmstu.ru*

1. Введение

Измерения скоростей и давлений в потоке являются одними из наиболее важных и широко применяемых в технике. Среди различных методов большое распространение в экспериментальных исследованиях имеет способ, основанный на измерении давления внесенными в поток измерительными приборами.

В данной работе рассматривается приемник полного давления для измерения скоростей в потоке. Приемник состоит из зонда, имеющего форму цилиндра с отверстием на боковой поверхности, и гибкой импульсной трубки, соединяющей внутреннюю полость зонда с датчиком давления. Принимающим и передающим элементом является некоторый объем воздуха, а значение скорости вычисляется по величине измеренного давления. Данный приемник используется для измерения скорости потока в каналах сложной формы, когда использование других измерительных приборов затруднительно, например, в устройстве формирования и подачи воздуха к модели тепловыделяющей сборки (ТВС), в пучке тепловыделяющих элементов ТВС, и т.д.

2. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1, а ее внешний вид на рисунке 2.

Зонд 2, закрепленный в координатно-поворотном устройстве 1, находится в потоке воздуха, который подается к соплу 3 из воздухозаборника 5 воздуходувкой 4.

Скорость воздуха на выходе из сопла устанавливается регулятором расхода 6 с помощью трубки Пито.

Импульсная трубка 7 соединяет внутреннюю полость зонда с пьезорезистивным датчиком давления Honeywell 24PC05SMT (рабочий диапазон: ± 3500 мм вод. ст.; точность датчика: $\pm 3,5$ мм вод. ст.; время реакции: 1 мс). Сигнал с датчика регистрируется устройством сбора данных NI USB-6212, соединенным с ПК.

Измерения проводились с частотой 1 кГц в течение 1 с, по ним вычислялось среднее значение давления. Запись и первичная обработка данных осуществлялась с помощью ПО, разработанного в среде LabVIEW.

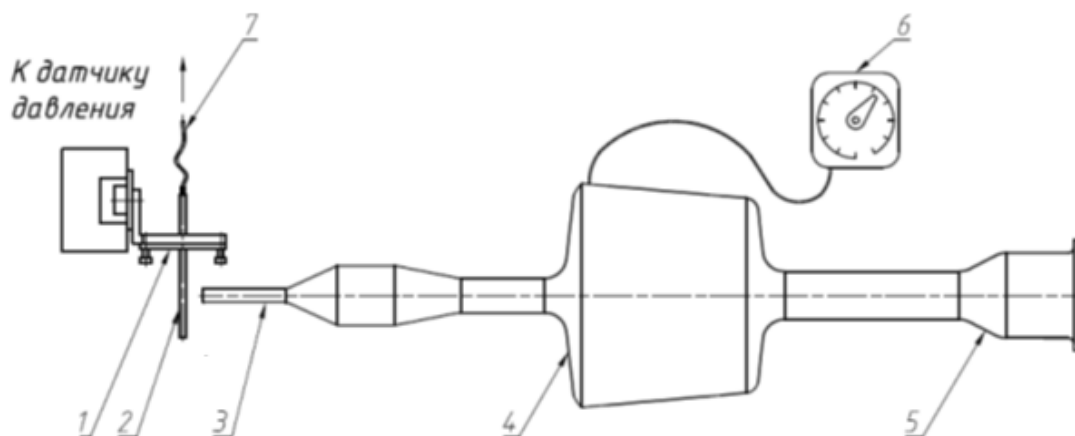


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1– координатно-поворотное устройство; 2– зонд; 3– выходное сопло; 4– воздуходувка; 5– воздухозаборник; 6– регулятор расхода; 7– импульсная трубка



Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки

3. Подходы к измерению скорости цилиндрическим зондом

Для определения подходов к измерению скорости, в каждой точке поверхности зонда измеряется не абсолютная величина давления, а разность его с атмосферным давлением или со статическим давлением. Для того, чтобы кривую давления по поверхности тела сделать независимой от величины скорости, указанную разность давлений относят к величине заданного (с помощью регулятора расхода) скоростного напора невозмущенного потока:

$$\bar{p} = \frac{P - P_{\text{ст}}}{\rho V^2 / 2}.$$

Эта безразмерная величина называется коэффициентом давления.

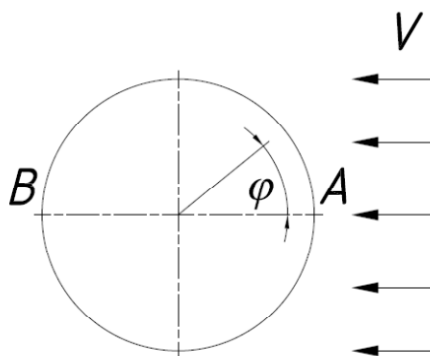


Рис. 3. Схема натекания потока на зонд

В лобовой критической точке A величина давления равна полному напору, коэффициент давления $\bar{p} = 1$. В точках, где $\bar{p} = 0$, величина давления на поверхности цилиндра равна давлению в невозмущенном потоке. В точках с отрицательным значением $\bar{p}$ давление на поверхности цилиндра меньше, чем в невозмущенном потоке.

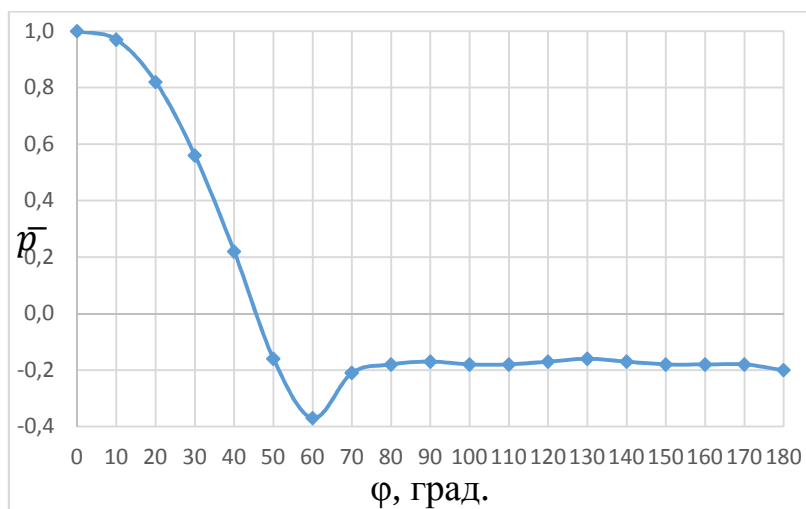


Рис. 4. Распределение коэффициента давления по поверхности цилиндра

Анализ приведенной кривой показывает, что цилиндрическим зондом можно пользоваться для измерения статического давления и полного напора набегающего потока. Действительно, при измерении давления в точках поверхности зонда, в которых $\bar{p} = 0$, будем получать давление невозмущенного потока, а при измерении давления в лобовой критической точке A – полный напор. Однако, для измерения статического давления требуется точная установка зонда на требуемый угол, который зависит не только от размера зонда, диаметра измерительного отверстия, но также от скорости потока и уровня турбулентности.

Необходимо отметить, что давление в кормовой критической точке B удобно измерять и использовать для определения скоростей, так как коэффициент давления незначительно изменяется в кормовой части цилиндра. Также он слабо зависит от диаметра измерительного отверстия.

При рассмотрении экспериментальных кривых, представленных на рисунках 5 и 6, видно, что в лобовой критической точке A коэффициент давления больше 1. Это вызвано частичным перекрытием зондом потока. Также видно, что диаметр измерительного отверстия существенно влияет на распределение коэффициента в лобовой части зонда, в кормовой части его влияние существенно слабее. Значение коэффициента давления в точке минимума зависит от скорости потока и уровня турбулентности. Согласно [2], при докритических значениях числа Рейнольдса ($Re < 2 \cdot 10^5$) распределение коэффициента давления имеет минимум при $\varphi \approx 70^\circ$, положение которого не изменяется при изменении турбулентности. Смещение минимума на рисунках 5 и 6 объясняется тем, что при изменении диаметра измерительного отверстия изменяется характер обтекания зонда.

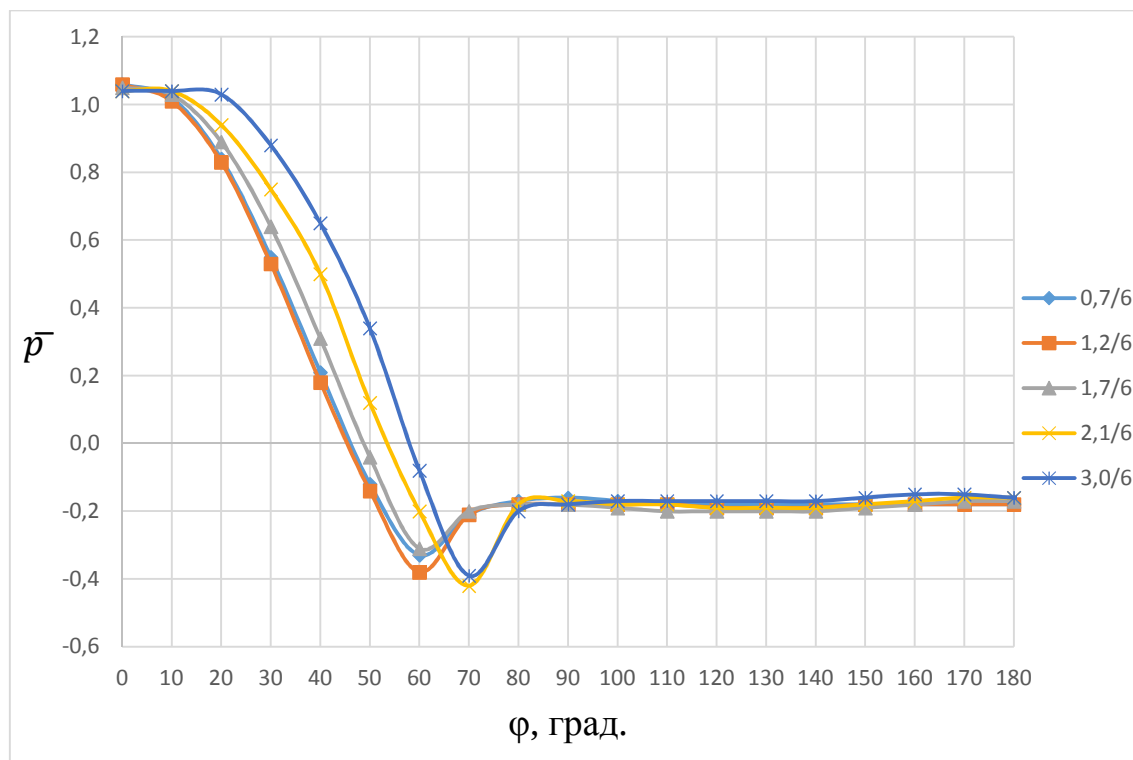


Рис. 5. Распределения коэффициентов давления для измерительных отверстий зонда диаметром 6 мм (скорость $V = 50$ м/с)

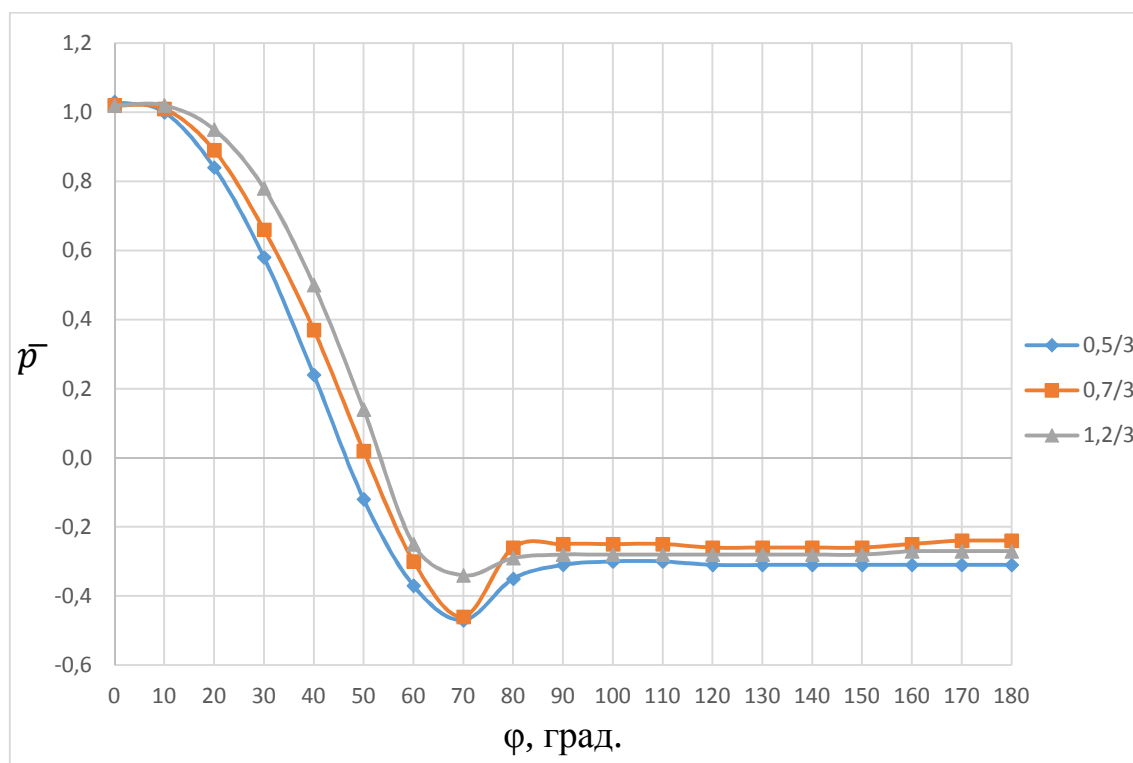


Рис. 6. Распределения коэффициентов давления для измерительных отверстий зонда диаметром 3 мм (скорость $V = 50$ м/с)

При проведении измерений требуется учитывать влияние различных факторов, поэтому удобнее использовать давления в лобовой и кормовой критических точках, представленные следующим образом:

$$P_{\text{лоб}} = P_{\text{ст}} + k_1 \rho V^2 / 2,$$

$$P_{\text{кор}} = P_{\text{ст}} - k_2 \rho V^2 / 2,$$

где k_1, k_2 – поправочные коэффициенты.

Тогда скорость определяется из выражения:

$$P_{\text{лоб}} - P_{\text{кор}} = (k_1 + k_2) \rho V^2 / 2,$$

$$V = \sqrt{\frac{2(P_{\text{лоб}} - P_{\text{кор}})}{\rho \varepsilon}},$$

где $\varepsilon = k_1 + k_2$.

4. Исследование характеристик зонда

Одной из наиболее важных характеристик зонда является его чувствительность к отклонению оси измерительного отверстия от направления скорости.

Для оценки влияния угла между осью измерительного отверстия и скоростью используется коэффициент

$$\bar{p}_\alpha = \frac{P - P_\alpha}{\rho V^2 / 2},$$

где P – давление, измеренное в лобовой точке, P_α – давление, измеренное при отклонении измерительного отверстия на угол α .

Из кривых, показанных на рисунках 7 и 8 видно, что в пределах 5° коэффициент $\bar{p}_\alpha$ практически не изменяется. При увеличении отношения d/D , где d – диаметр измерительного отверстия, D – наружный диаметр зонда, приемник становится менее чувствительным к углу поворота. В пределах 10° показания приемника изменяются слабо – это является преимуществом зонда, однако не позволяет использовать его для определения направления вектора скорости.

Из анализа кривых, показанных на рисунке 9, следует, что при близкой величине относительного диаметра измерительного отверстия, зонды разных диаметров имеют практически одинаковую чувствительность.

Таблица 1

Значения относительного диаметра измерительного отверстия

d/D , мм/мм	0,7/6	1,2/6	1,7/6	2,1/6	3,0/6	0,5/3	0,7/3	1,2/3	0,4/1,8
d/D	0,12	0,20	0,28	0,35	0,50	0,17	0,23	0,40	0,22

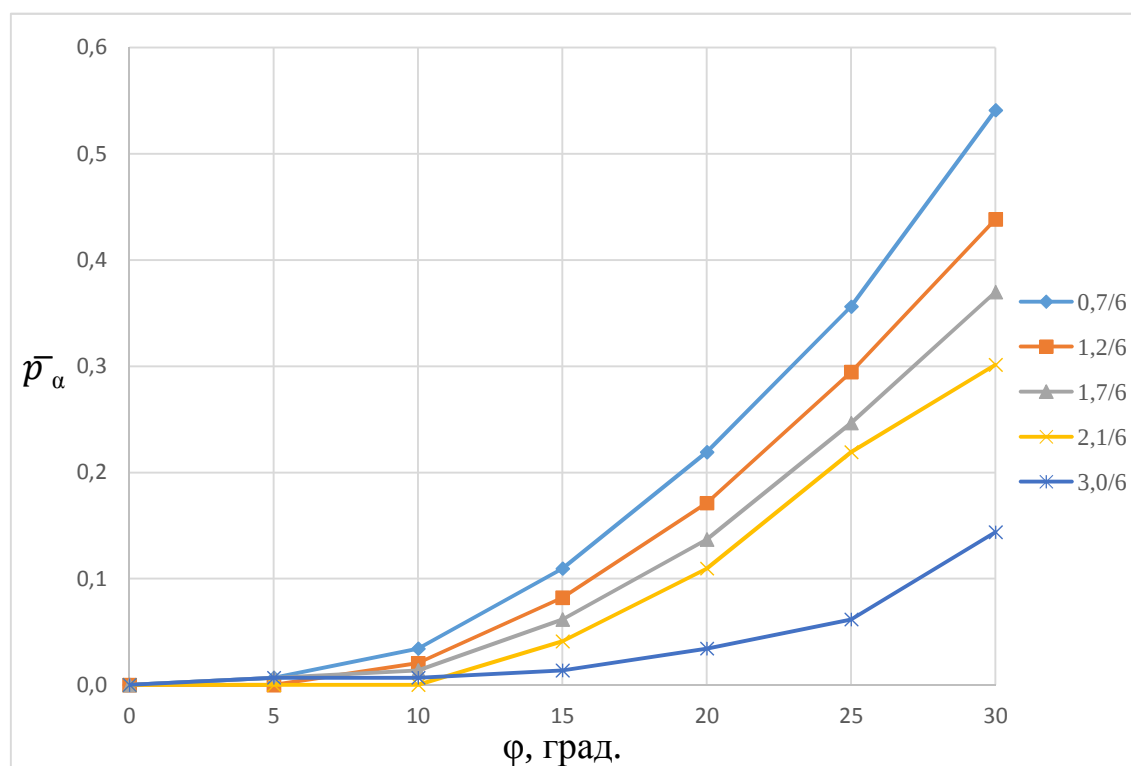


Рис. 7. Зависимость коэффициента $\bar{p}_\alpha$ от угла между осью измерительного отверстия и скоростью для зонда диаметром 6 мм

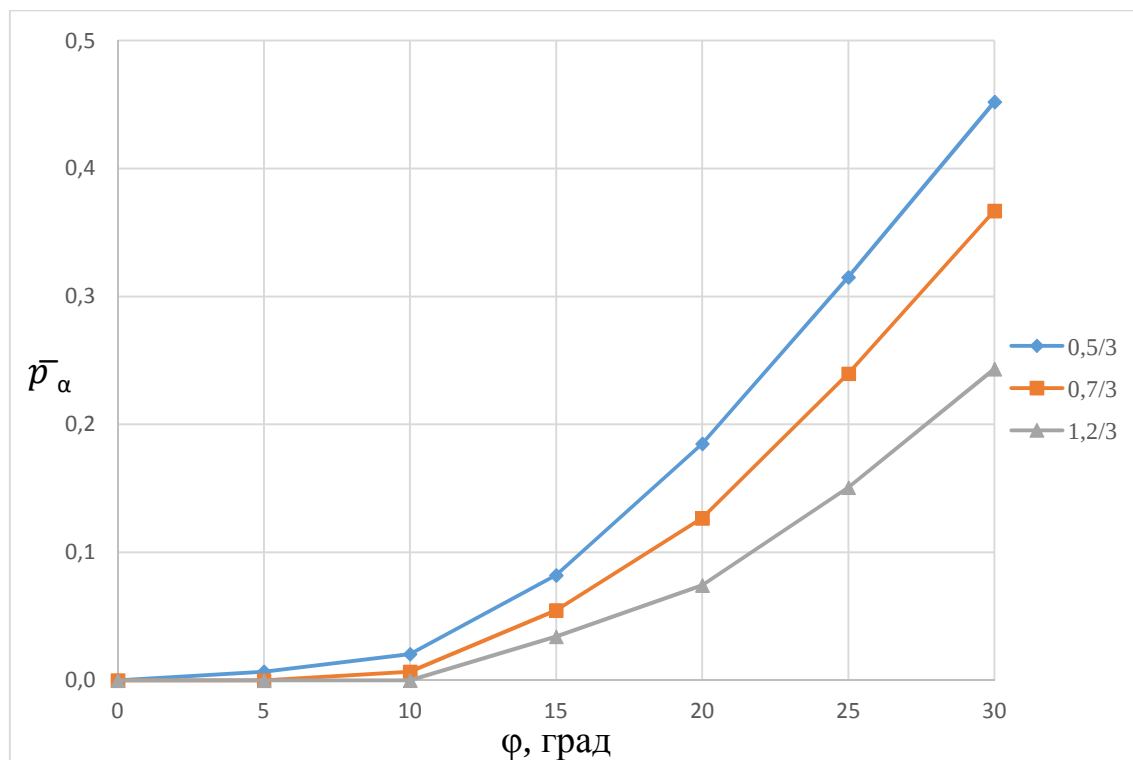


Рис. 8. Зависимость коэффициента $\bar{p}_\alpha$ от угла между осью измерительного отверстия и скоростью для зонда диаметром 3 мм

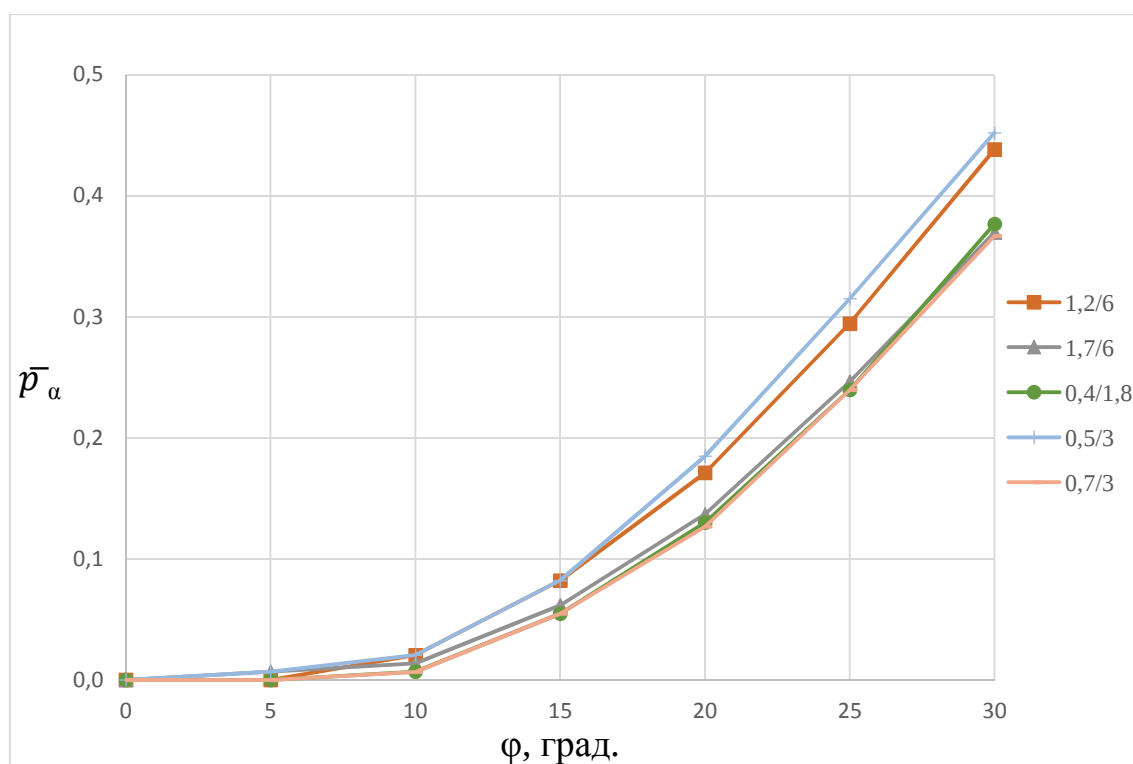


Рис. 9. Зависимость коэффициента $\bar{p}_\alpha$ от угла между осью измерительного отверстия и скоростью для зондов с близкими относительными диаметрами измерительных отверстий

Длительность переходного процесса в измерительной системе имеет значение, когда измеряются скорости, быстро изменяющиеся во времени, а также в случае, когда проводится серия измерений с перемещением зонда, так как необходимо выждать время до выхода показаний прибора на установившееся значение перед следующим перемещением.

При сравнении данных, представленных на рисунке 10, видно, что увеличение длины импульсной трубки приводит к росту времени переходного процесса. Также увеличение длины трубки приводит к подавлению высокочастотных пульсаций, зависимость становится близкой к зависимости вида $P(t) = k(1 - \exp^{-t/T})$, где k – амплитуда возмущения, T – постоянная времени.

В [1] указано, что увеличение диаметра импульсной трубки может привести как к увеличению длительности переходного процесса, так и к уменьшению. Это связано с тем, что объем воздуха в трубке увеличивается, что приводит к увеличению длительности переходного процесса, вместе с тем происходит уменьшение сопротивления, которое приводит к уменьшению длительности переходного процесса.

Существенное влияние на время переходного процесса оказывает диаметр измерительного отверстия. Однако, на рисунке 11 видно, что при относительном диаметре больше 0,2 постоянная времени остается практически неизменной и ее значение определяется длиной импульсной трубки.

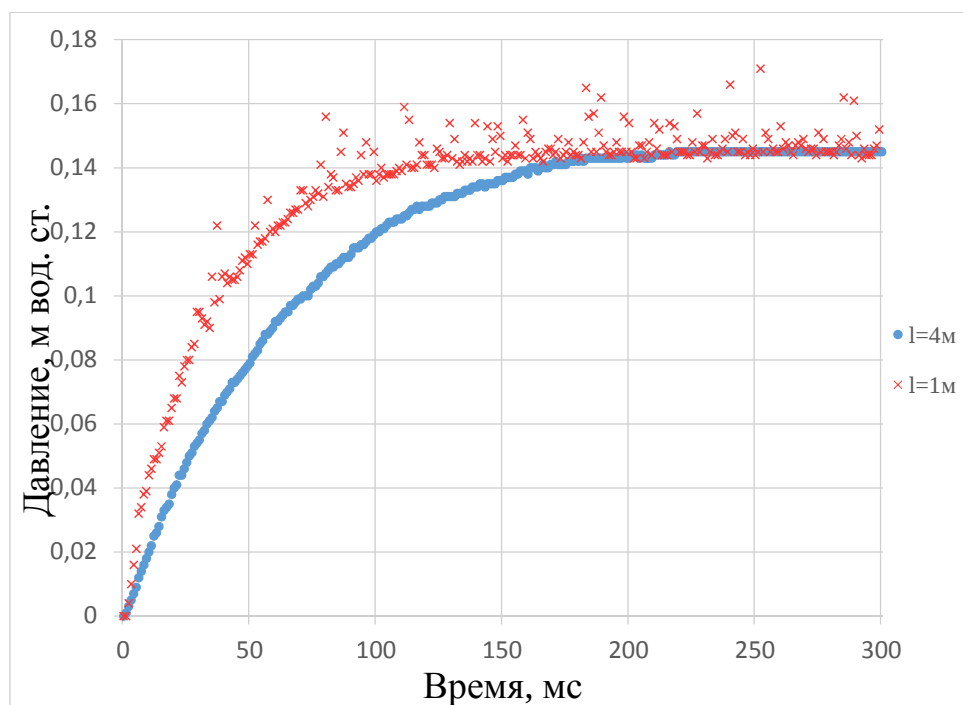


Рис. 10. Переходные процессы в измерительной системе для длинной ($l = 4\text{м}$) и короткой ($l = 1\text{м}$) импульсной трубки ($V = 50\text{ м/с}$, $d/D = 0,7/6$)

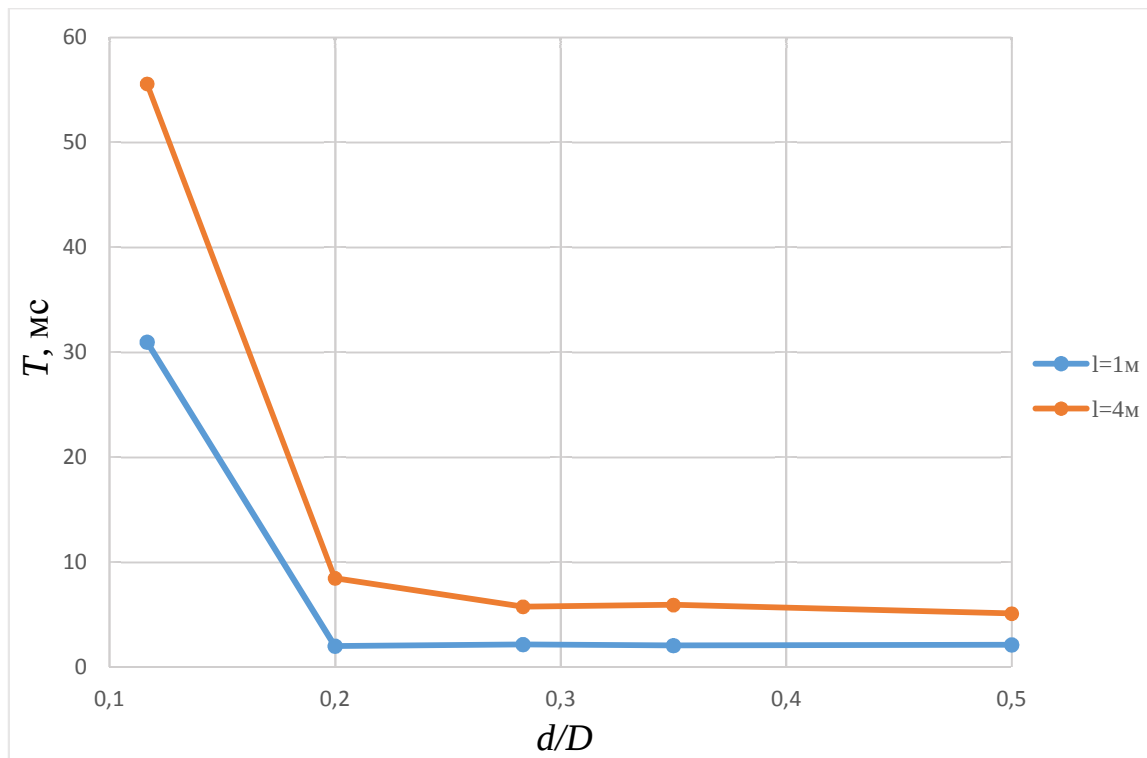


Рис. 11. Влияние относительного диаметра измерительного отверстия на постоянную времени зонда диаметром 6 мм для длинной и короткой импульсной трубки ($V = 50 \text{ м/с}$)

Согласно [1], приближение значения измеряемого давления к давлению в приемнике (уменьшение скорости потока) приводит к уменьшению постоянной времени, однако из рисунка 12 видно, что при относительном диаметре измерительного отверстия больше 0,2, постоянная времени практически не меняется.

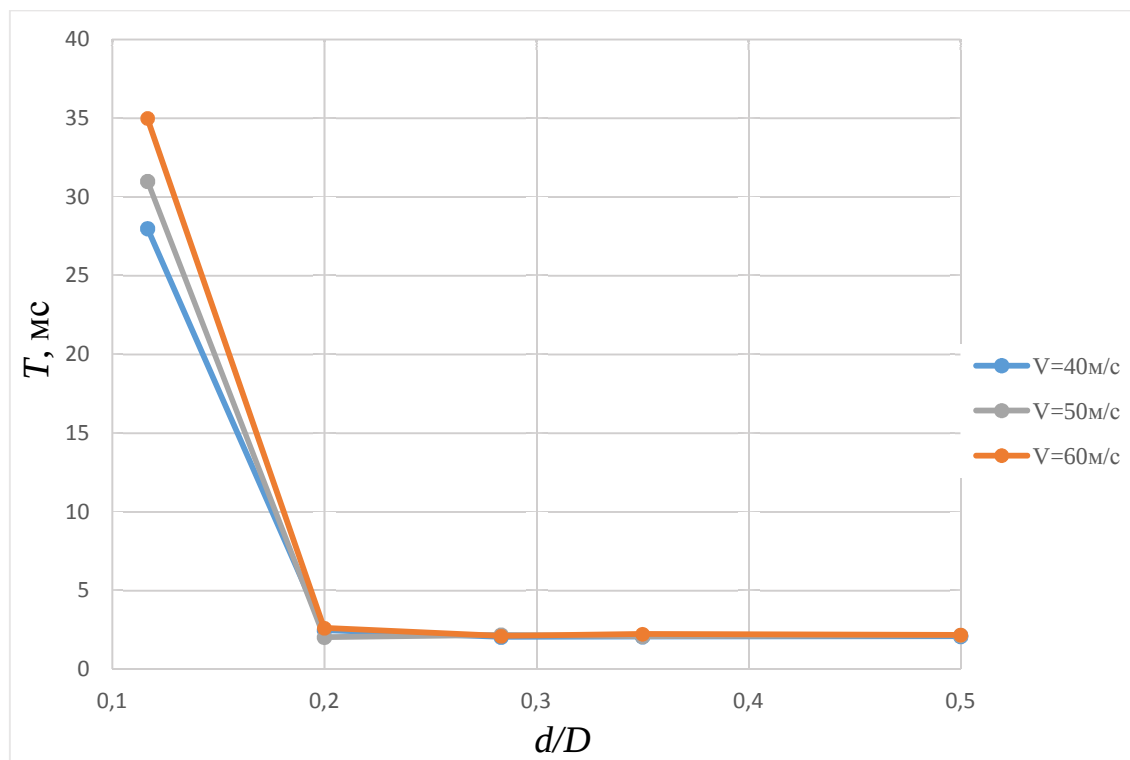


Рис. 12. Влияние скорости потока на постоянную времени зонда диаметром 6 мм

5. Поправочные коэффициенты k_1 , k_2 , ε

Изучение влияния скорости потока, диаметра измерительного отверстия, диаметра зонда на распределение коэффициента давления необходимо для определения величин поправочных коэффициентов k_1 , k_2 .

Определение величин коэффициентов k_1 , k_2 требуется при использовании зонда для измерения скоростей в потоке в каналах сложной формы. Коэффициенты k_1 , k_2 могут изменяться в зависимости от условий измерений.

Основным фактором, влияющим на k_1 , является перекрытие зондом потока, поэтому при малых размерах зонда $k_1 = 1$ во всем диапазоне скоростей. Уменьшение коэффициента с увеличением диаметра измерительного отверстия объясняется тем, что среднее давление, действующее на большое отверстие, меньше, чем среднее давление, действующее на маленькое отверстие.

Замедление роста коэффициента k_2 с увеличением скорости можно объяснить турбулизацией потока в кормовой части цилиндра, которая приводит к уменьшению разрежения.

На рисунках 13, 14, 15 представлены зависимости коэффициентов от скорости, полученные на экспериментальной установке.

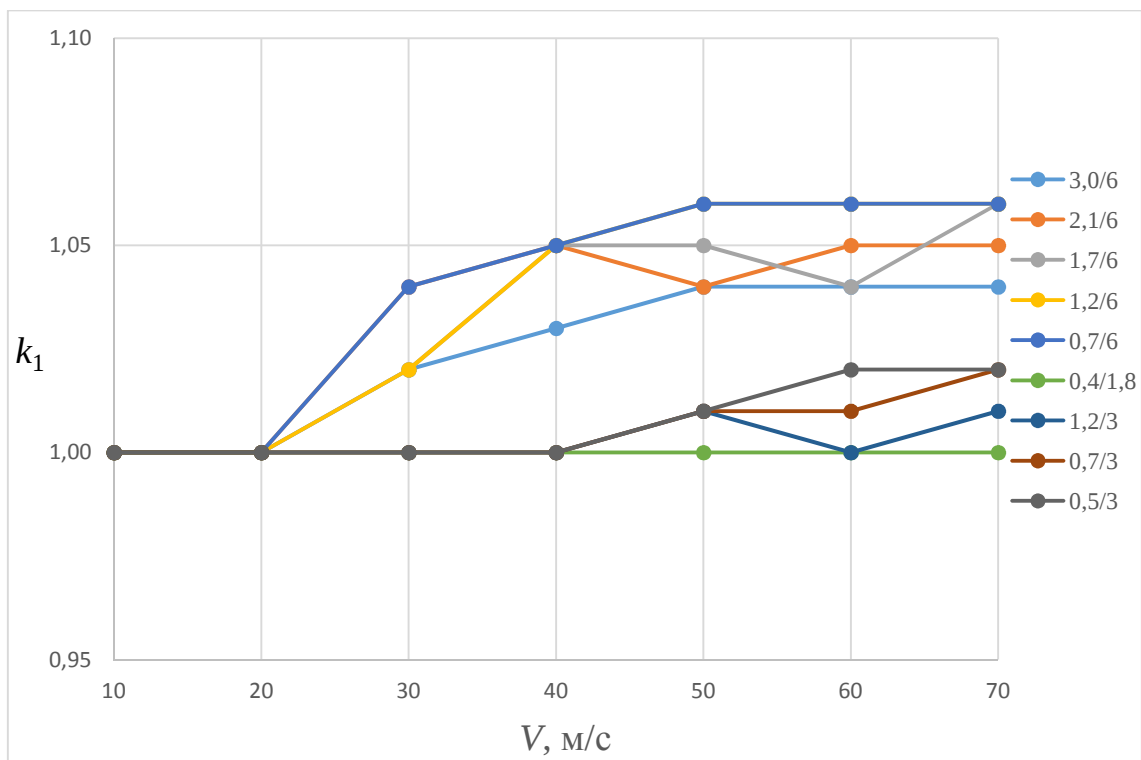


Рис. 13. Распределения коэффициента k_1

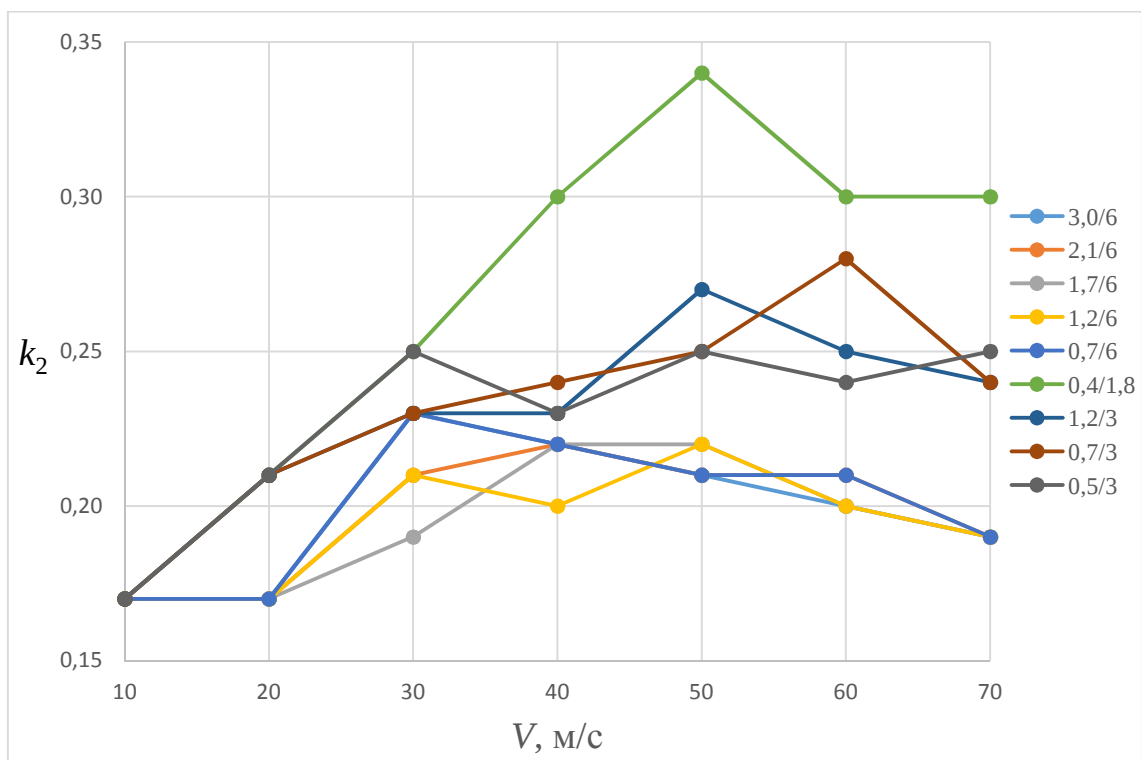


Рис. 14. Распределения коэффициента k_2

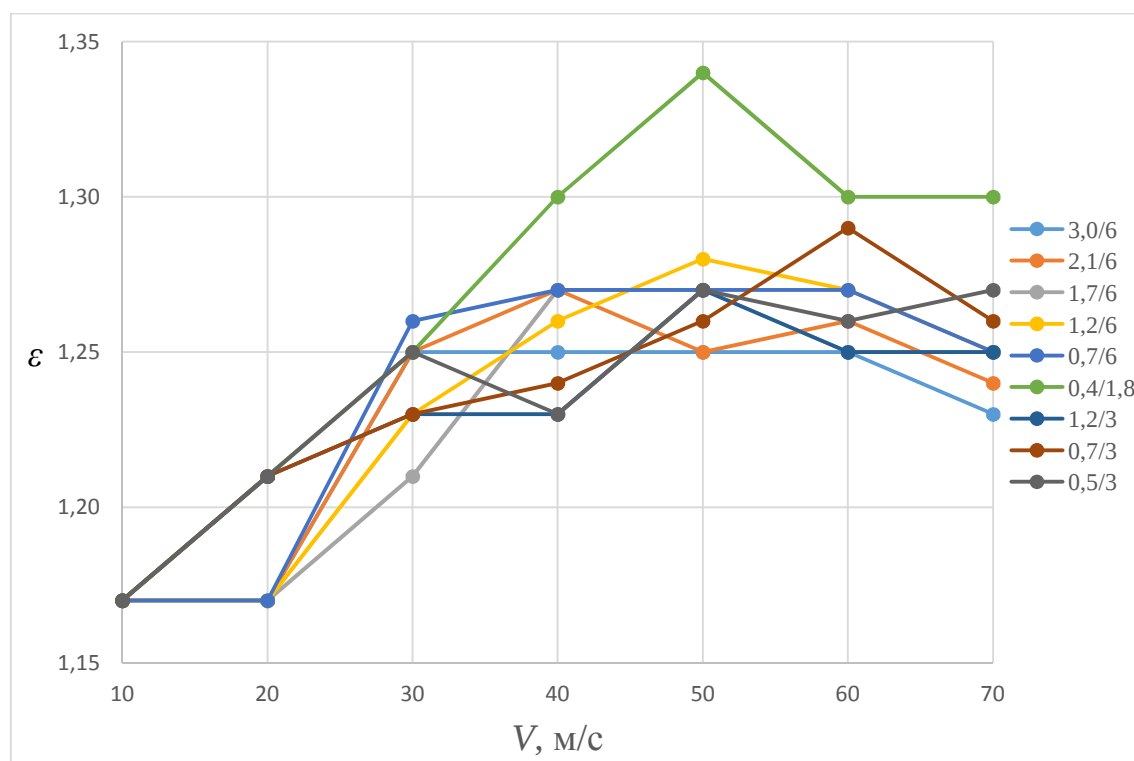


Рис. 15. Распределения коэффициента ε

6. Заключение

Выводы о применимости коэффициентов k_1 , k_2 , ε для измерения скорости в потоке.

1. Коэффициент k_1 изменяется менее чем на 10% во всем диапазоне измеренных скоростей. Основное влияние на него оказывает соотношение между поперечным размером канала и диаметром зонда, поэтому применять $k_1 \neq 1$ следует в случае, если зонд перекрывает значительную часть канала и скорость потока выше 20 м/с.

2. Коэффициент k_2 значительно изменяется с увеличением скорости. Это связано со сложным характером течения и турбулизацией потока в кормовой части цилиндра, поэтому его следует применять, если нет возможности измерить статическое давление в потоке другими, более простыми способами.

3. Коэффициент $\varepsilon = k_1 + k_2$ изменяется менее чем на 15% во всем диапазоне измеренных скоростей. Коэффициент ε для всех зондов не изменяется более чем на 7%, начиная со скорости 30 м/с, поэтому его можно принять постоянным при определении скорости. Его использование позволяет проводить измерения скоростей в диапазоне 30-70 м/с без применения дополнительных способов определения статического давления в каналах.

Основные факторы, влияющие на результаты измерений:

1. соотношение между поперечным размером канала и размерами зонда;
2. уровень турбулентности;
3. близость стенки канала;
4. неоднородность потока;
5. угол между осью зонда и скоростью потока.

Рекомендации по выбору зонда и элементов измерительной системы:

1. малые возмущения, вносимые зондом в исследуемую область потока;
2. постоянство коэффициента ε в диапазоне измеряемых скоростей;
3. кромки измерительного отверстия не должны иметь выступов и заусенцев;
4. ось измерительного отверстия должна быть нормальна к поверхности зонда;
5. относительный диаметр измерительного отверстия не менее 0,2;
6. минимально возможная длина импульсной трубки.

Список литературы

1. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. 3-е изд., доп. и испр. Л.: Машиностроение, 1974. 478 с.
2. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 471 с.
3. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизм и теория / под ред. Г.Н. Абрамовича. М.: Физматгиз, 1963. 680 с.
4. Мартынов А.К. Экспериментальная аэродинамика. М.: Оборонгиз, 1950. 348 с.