

УДК 621.391.161:621.317.36:535.6

В.В. Никулин¹, В.С. Соболев², Е.Н. Уткин², А.М. Щербаченко², Г.А. Кашеева²

¹ Учреждение Российской академии наук

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15, E-mail: nikulin@hydro.nsc.ru

² Учреждение Российской академии наук

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1, E-mail: sobolev@iae.nsk.su

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРНАДОПОДОБНОГО ВИХРЯ С ПОМОЩЬЮ ПРЕЦИЗИОННОГО ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО АНЕМОМЕТРА

Методами лазерной доплеровской анемометрии исследована структура и динамические характеристики (профили вертикальной и азимутальной компонент вектора скорости, их статистические характеристики, а также скорости массопереноса) торнадоподобного вихря.

ТОРНАДО, ВИХРЕВЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ДОПЛЕРОВСКАЯ АНЕМОМЕТРИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Вихри торнадо являются опасным природным явлением, приводящим к человеческим жертвам, разрушениям жилищ и даже крупных сооружений [1]. Вблизи своего основания они захватывают воздух, пыль и даже крупные предметы и переносят их внутри ядра вверх вдоль всей своей высоты. Это грозное явление, однако, может иметь практическое применение, например, для быстрого отсасывания газообразных и мелкодисперсных аэрозольных загрязнений из помещений [2]. В то же время структура вихрей торнадо недостаточно изучена, а закономерности динамики переноса аэрозолей таким вихрем до сих пор не исследованы. Предметом настоящего доклада являются результаты исследований структуры торнадоподобного вихря, созданного искусственно в замкнутом объеме, и динамики переноса им модельной примеси (дыма) от локализованного источника, расположенного вблизи основания вихря. Результаты получены с помощью созданного авторами высокоразрешающего и высокоточного лазерного доплеровского анемометра (ЛДА).

ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка представляет собой замкнутую камеру в форме параллелепипеда с прозрачными стенками из оргстекла (рис. 1). Размеры основания камеры в горизонтальной плоскости $0,43 \times 0,51 \text{ м}^2$, ее высота может варьироваться путем установки горизонтальной перегородки. Высота камеры без перегородки $H = 0,35 \text{ м}$. Внутри камеры к ее верхней крышке прикреплена снизу с зазором $0,01 \text{ м}$ прямоугольная пластина с отверстием в центре диаметром $0,05 \text{ м}$. Размеры пластины меньше размеров крышки камеры, а расстояния от ее внешних кромок до боковых стенок камеры составляют $0,045 \text{ м}$. Таким образом, объем камеры без перегородки за вычетом области отделяемой пластиной равен $V = 75,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Над отверстием пластины в зазоре между пластиной и крышкой камеры

установлена крыльчатка центробежного вентилятора, приводимая во вращение электродвигателем. При вращении крыльчатки воздух из камеры отсасывается через центральное отверстие в пластине и выбрасывается через зазор между пластиной и крышкой камеры снова в камеру к ее боковым стенкам. При выходе из зазора воздух проходит через систему направляющих лопаток длиной $5 \cdot 10^{-2}$ м, которые отклоняют поток в горизонтальной плоскости под некоторым углом φ к радиусу, благодаря чему вытекающий из зазора поток получает вращательное движение вокруг вертикальной оси камеры. Лопатки расположены симметрично на четырех сторонах прямоугольной пластины, между ними образовано по четыре канала, шириной $1,5 \cdot 10^{-2}$ м с каждой стороны. Степень закрутки вытекающего из зазора потока регулируется изменением угла наклона лопаток (φ). Таким образом, данная экспериментальная установка обеспечивает закрутку воздуха вокруг вертикальной оси камеры, отсос закрученного воздуха из камеры через центральное отверстие и повторное введение закрученного потока в камеру по ее периферии. В опытах скорость потока воздуха между направляющими лопатками определялась с помощью формулы Бернулли по измерению перепада давлений между отверстиями, одно из которых расположено в точке, где скорость потока практически равна нулю, а другое — между направляющими лопатками. В экспериментах угол φ равнялся 30° , перепад давления $\Delta P = 16, 20$ и 24 Па, что соответствовало скоростям потока воздуха между лопатками $5,2, 5,8, 6,3$ м/с и расходам воздуха через них $10,4; 11,6; 12,6$ л/с. Для визуализации вихря в камеру подается дым через отверстие ($\varnothing = 5,6$ мм), расположенное в центре ее дна. Сразу после входа дым рассеивается горизонтальной пластинкой диаметром 20 мм, расположенной на высоте 10 мм над дном. Дым, поступающий в камеру, практически полностью захватывается в ядро вихря и переносится в нем к выходному отверстию, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Фотография торнадоподобного вихря, визуализированного дымом, поступающим в центре нижней поверхности

Заметим, что данная картина не стационарна – вихрь прецессирует, и, кроме того, регулярно, но не строго периодически, происходит выброс дыма из ядра (в основном из внешней его части) в окружающее пространство в виде спиралевидных образований.

ОПИСАНИЕ ЛДА

Оптическая часть

Структурная оптическая схема ЛДА показана на рис. 2.

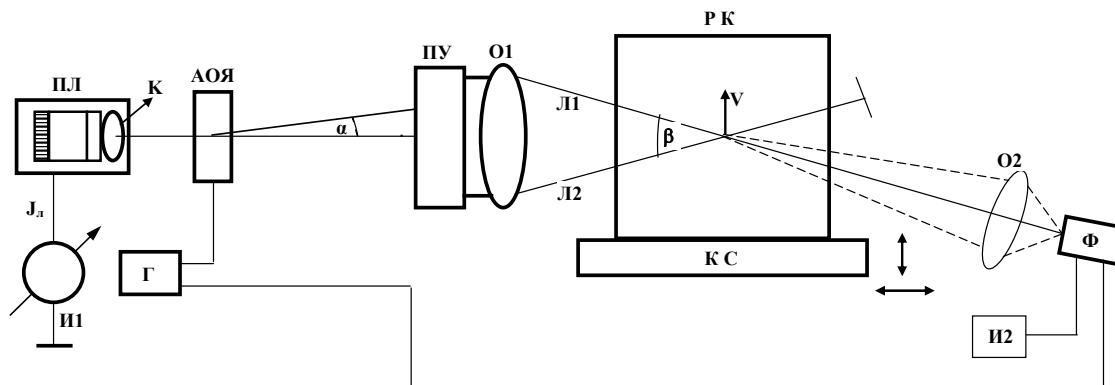


Рис. 2. Структурная оптическая схема ЛДА

В качестве излучателя применяется мощный (до 100 мВт) полупроводниковый лазер ПЛ, стабилизированный по температуре, с длиной волны 0,67 мкм. Мощность излучения ПЛ можно менять в широких пределах благодаря предусмотренной в схеме регулировке рабочего тока I_n лазерного диода. Это позволяет выбирать оптимальный режим работы лазерного диода, а также юстировать оптическую схему при малой яркости лазерных пучков. Рабочий ток лазера задается источником тока И1. В корпусе излучателя встроен регулируемый вручную коллиматор К, с помощью которого можно изменять фокусировку лазерного луча. Для расщепления лазерного луча и смещения одного из них по частоте используется акустооптическая ячейка АОЯ типа МЛ-201, работающая на частоте 80 МГц. Для возбуждения ячейки служит генератор Г, в котором предусмотрена плавная регулировка выходной мощности. Ячейка юстируется под углом Брэгга ко входному лазерному пучку. Изменением мощности возбуждения ячейки можно регулировать интенсивность отклоненного луча. При одинаковой интенсивности прямого и отклоненного лучей формируется дифференциальная схема ЛДА. В нашем случае применялась схема с опорным пучком, которая в условиях сильной задымленности рабочей камеры оказалась с точки зрения отношения сигнал/шум более предпочтительной. Угол α между основным и дифрагированным пучками на выходе ячейки равен примерно одному градусу. Для формирования в исследуемом потоке интерференционной картины, которая должна обеспечить высокое пространственное разрешение, а также удобный для обработки диапазон доплеровских частот (непосредственно связанный с диапазоном измеряемых скоростей), в оптической схеме после акустооптической ячейки предусмотрено перископическое устройство ПУ, состоящее из системы 4-х призм и широкоугольного объектива О1. Это устройство позволяет развести пучки Л1 и Л2 на достаточное расстояние, а затем пересечь их в одной плоскости так, чтобы перетяжки пучков оказались в центре измерительного объема. Таким образом, обеспечивается равномерность интерференционной картины в измерительном объеме и соответственно высокая точность ЛДА. В нашем случае угол между зондирующими пучками Л1 и Л2 составляет 11° . При этом коэффициент пропорциональности между скоростью V и доплеровской частотой F_d равен 280 кГц /м/с. Измерительный объем в данном случае имеет длину порядка 0,3 мм и диаметр около 50 мкм. Он располагается в центре рабочей камеры РК, в которой формируется торнадоподобный

вихрь. Рабочая камера установлена на координатном столе КС. Перемещая координатный стол, можно устанавливать измерительный объем в заданную точку потока.

Рассеянный частицами потока свет собирается приемным объективом О2 и направляется на фотоприемник Ф. Туда же поступает опорный пучок света Л1. Приемником служит лавинный фотодиод. Смещение на лавинный диод подается от специального источника И2. Поскольку опорный пучок света смещен по частоте относительно прямого пучка на 80 МГц, а рассеянный частицами потока свет имеет доплеровский сдвиг Fd , сигнал на выходе фотодиода имеет частоту $80 \text{ МГц} \pm Fd$, причем знак доплеровской частоты Fd зависит от направления скорости потока V в точке измерений. После усиления и фильтрации этот сигнал поступает на входы двух смесителей (преобразователей частоты), вторые входы которых питаются квадратурными напряжениями той же частоты, которая возбуждает акустооптическую ячейку (АОЯ). На выходах этих смесителей получаются два квадратурных напряжения, образующие аналитический доплеровский сигнал.

Электронная часть (следающий фильтр)

Для оценки локальных скоростей исследуемого вихря использован метод следящей узкополосной фильтрации.

Устройство, реализующее данный метод, представляет собой цифровую систему автоматической подстройки частоты [5]. Оно включает персональный компьютер, квадратурный цифровой синтезатор частоты, четыре аналоговых перемножителя сигналов, два узкополосных фильтра низкой частоты, к выходу каждого из которых подключены усилитель и дифференцирующий усилитель, четыре устройства выборки-хранения, четырехканальный коммутатор и аналого-цифровой преобразователь. Функциональная схема лазерного доплеровского измерителя скорости движущихся частиц приведена на рис. 3.

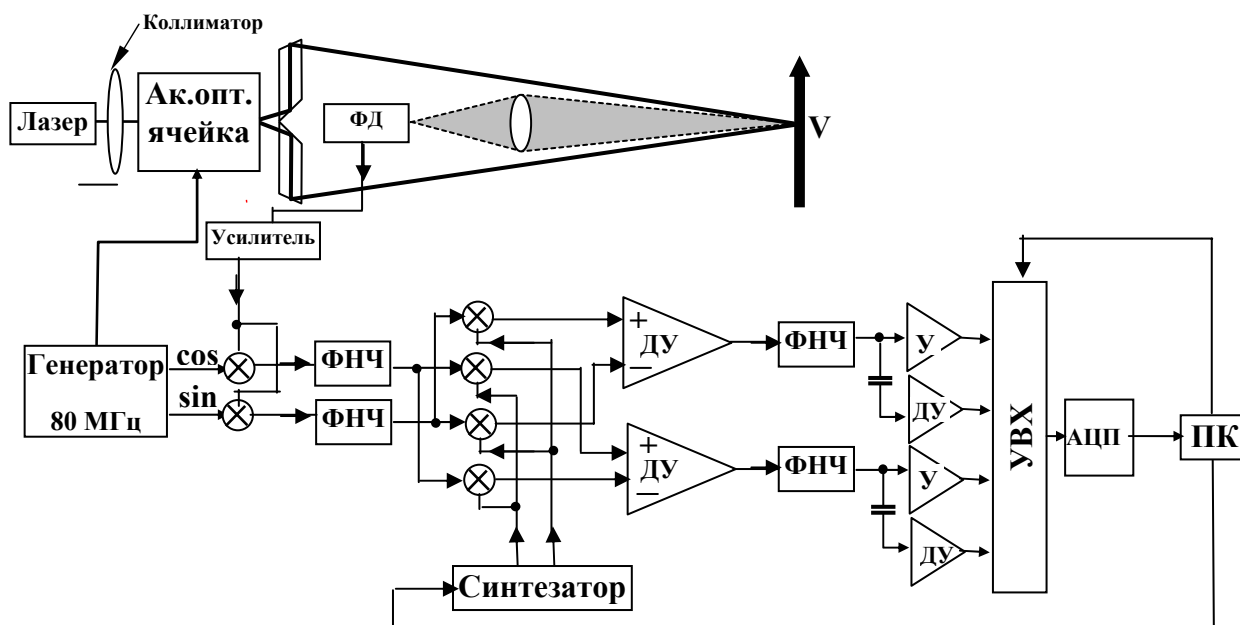


Рис. 3. Функциональная схема электроники ЛДА

Сигнал с выхода фотодетектора после усилителя высоких частот, освобожденного сигнала от низкочастотного пьедестала, подается на входы двух преобразователей частоты, вторые входы которых питаются от квадратурных выходов генератора, питающего акустооптическую ячейку. В результате на выходах преобразователей после низкочастотной фильтрации получаются два квадратурных сигнала доплеровской частоты. Эти сигналы

подаются на входы четырех перемножителей, на вторые входы которых подаются синусоидальные напряжения с выходов квадратурного синтезатора, частота которого управляется кодами, соответствующими измеренному значению сигнала разностной частоты подаваемых сигналов. Чтобы получить коды управления цифровым генератором квадратурные сигналы разностной частоты с выхода каждого смесителя проходят через два дифференциальных усилителя, вычитающих сигналы суммарной частоты. Таким образом, на выходах этих усилителей получаются квадратурные сигналы разностной частоты. Эти сигналы проходят соответственно через два узкополосных фильтра нижних частот. Фильтры освобождают эти сигналы от сопровождающих шумов. Их полосы пропускания могут быть заданы командами компьютера и составляют 2, 10 и 30 КГц. Квадратурные усиленные сигналы разностной частоты и квадратурные дифференцированные сигналы разностной частоты с тактовой частотой, задаваемой компьютером, запоминаются в четырех устройствах выборки-хранения и далее через коммутатор с помощью АЦП оцифровываются и считываются в память персонального компьютера. Цифровой синтезатор, устройства выборки-хранения, коммутатор и АЦП связаны через интерфейсный блок с шиной ISA персонального компьютера.

Если обозначить квадратурные сигналы на выходах усилителей, как U и V , а квадратурные дифференцированные сигналы, как U' и V' , то в интересующие нас моменты мгновенная частота этих сигналов определяется следующим соотношением [6]

$$\omega(t) = \frac{[U(t)V' - V(t)U']}{U^2(t) + V^2(t)} \quad (1)$$

Компьютер суммирует код, соответствующий этой частоте, с предыдущим кодом цифрового генератора, обеспечивая тем самым слежение за частотой доплеровского сигнала. Текущие коды синтезатора соответствуют мгновенной частоте доплеровского сигнала.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО АНЕМОМЕТРА

Первая часть программы позволяет на экране монитора визуально оценить наличие или отсутствие сигнала разностной частоты при заданном амплитудном пороге, оценить спектр доплеровского сигнала и увидеть дискриминационную характеристику следящего фильтра. Эта программа является вспомогательной и используется при настройке всей системы автоматического слежения за доплеровской частотой. При этом задается минимальное и максимальное значения частот синтезатора, шаг квантования сигнала разностной частоты по времени и уровень порога сигнала над уровнем шума, при котором возможно измерение частоты доплеровского сигнала. Вторая часть программы используется непосредственно для измерения частоты доплеровского сигнала и оценки его статистических характеристик.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ВЕКТОРА СКОРОСТИ В ТОРНАДОПОДОБНОМ ВИХРЕ

Профили вертикальной компоненты скорости в вихре определялись для того, чтобы, с одной стороны, понять структуру созданного вихря, получить информацию о характере переходного процесса его образования, оценить величину прецессии, а с другой - вычислить скорость отсоса дыма при различных формах вихревой камеры.

Отметим, что для цилиндрической и квадратной камер профили скорости можно аппроксимировать Гауссовой кривой. Что касается прямоугольной камеры, то профиль скорости становится несимметричным и смещенным относительно центра камеры. С увеличением радиальной координаты вертикальная компонента скорости медленно падает и меняет знак.

В качестве примера ниже на рисунке 4 представлен расчет скорости выноса дыма (расхода) для цилиндрической камеры при $\Delta P = 16$ Па. при условии, что профиль скорости аппроксимирован конусом. Расход Q в рассматриваемом случае равен объему конуса с радиусом основания $R_0=30$ мм и высотой, равной максимальному значению скорости в центре ($V_{\max}=2,332$ м/с.); $Q = \frac{1}{3}\pi R_0^2 V_{\max} = 2,2$ л/с.

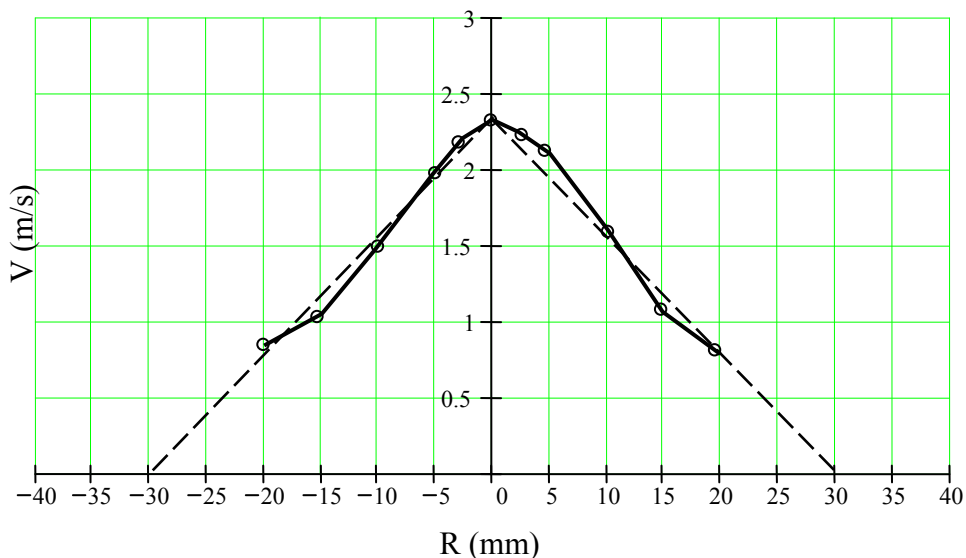


Рис. 4. Аппроксимация для расчета расхода Q

Методика эксперимента состояла в том, что точка измерений устанавливалась на заданном горизонте и с помощью координатного стола сканировалась поперек вихря таким образом, чтобы она прошла через центр вихря. На рис. 5 в качестве примера представлена картинка с экрана компьютера, управляющего экспериментом. Показаны: реализация мгновенной скорости, ее среднее значение, среднеквадратичное отклонение, спектральная плотность и плотность вероятности для случая цилиндрической камеры, когда перепад давления на входе камеры составлял $\Delta P = 16$ Па. Отметим, что график реализации мгновенной скорости начинается с переходного процесса образования торнадоподобного вихря. Его длительность составляет приблизительно 5 секунд.

На рисунке 6 показаны построенные по полученным данным профили вертикальной скорости для цилиндрической, квадратной и прямоугольной камер при двух значениях перепада давления ($\Delta P = 16$ Па и $\Delta P = 24$ Па) на выходе.

Результаты измерений

название файла с данными:	filedata= "d:\dopler\j23016.prn"
интервал квантования, мс:	del= 2.20074
количество отсчетов в одной выборке:	NFUR= 16384
фильтр, кГц:	F = 30
размах сигнала, Гц:	Amplitude= 662522.018831
максимальное значение частоты, Гц:	max(sig) = 816249.032165
минимальное значение частоты, Гц:	min(sig) = 153727.013334
среднее значение частоты, Гц:	doplerm= 621241.76168
стандартное отклонение частоты, %:	sigma= 18.093614
стандартное отклонение частоты, кГц:	s = 112405.087482
отношение амплитуд:	otn = 5.309731

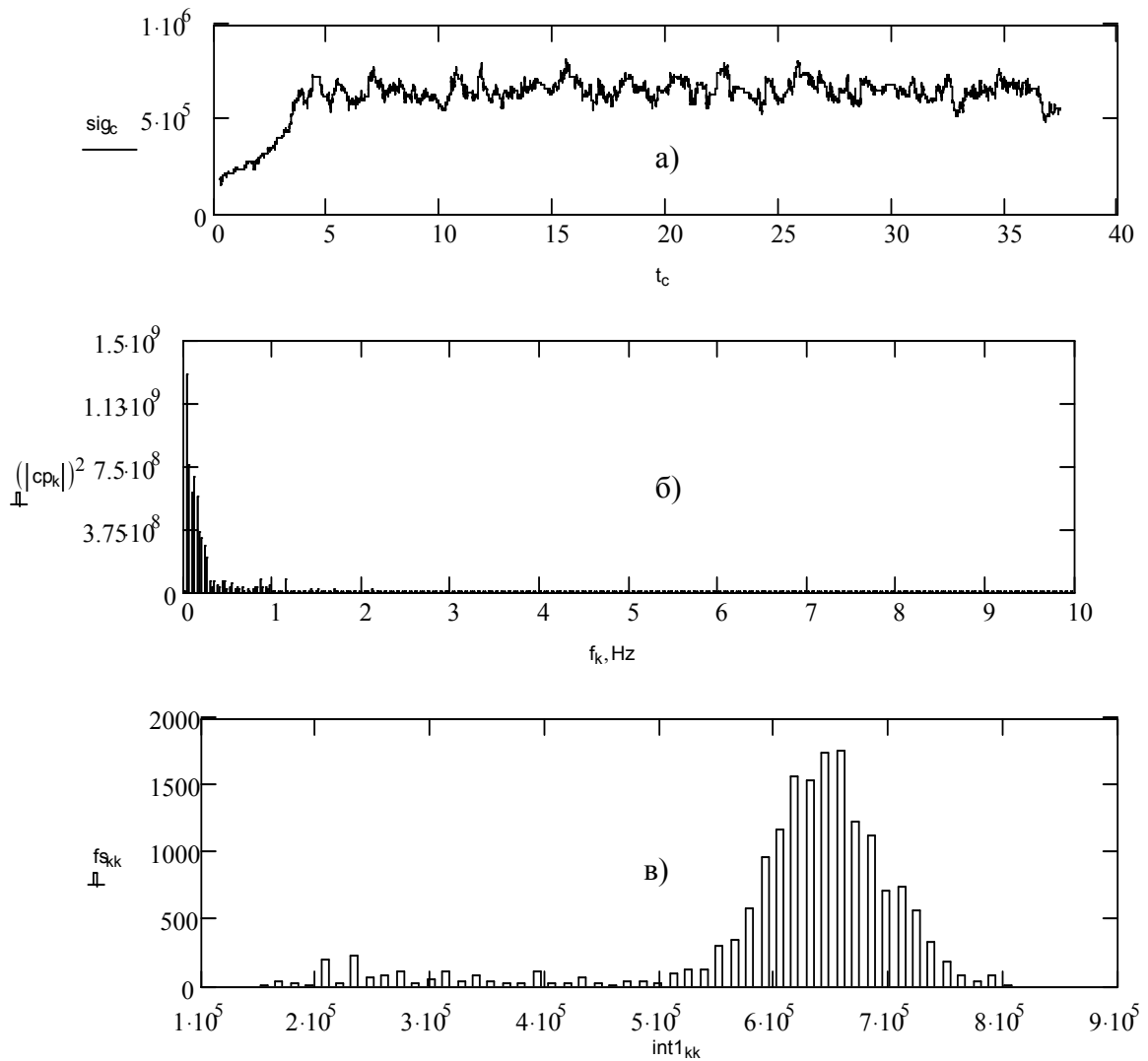
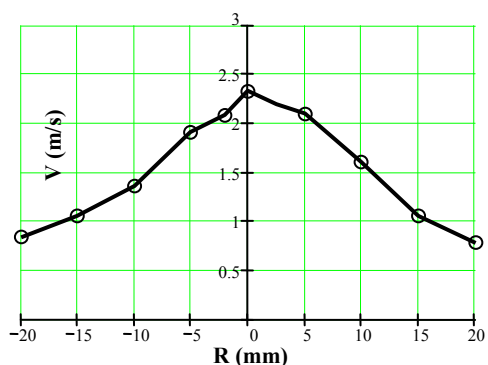


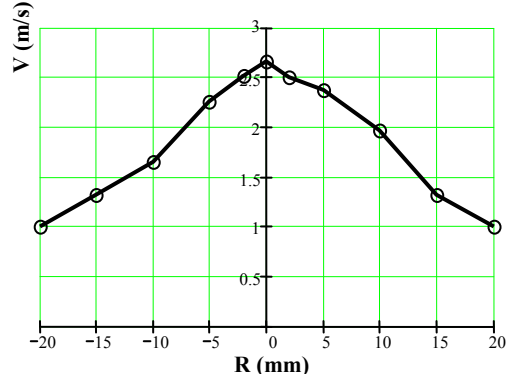
Рис. 5. Результаты измерений и реализация мгновенной скорости (а), ее спектральная плотность (б) и функция распределения значений (в) для случая цилиндрической камеры при перепаде давлений $\Delta P = 16$ Па

X - 23 июня- 2010, **Цилиндр**, пол 6 см ,
 $\Delta P=16$ Па



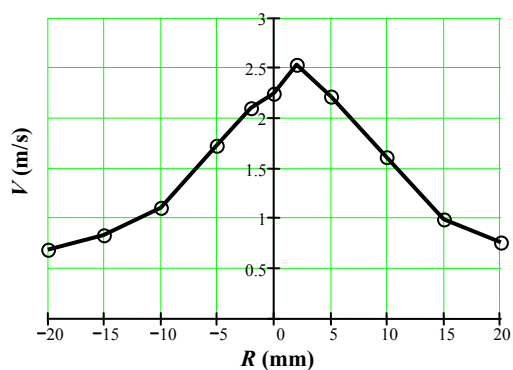
$Q = 2,2$ л/с

XI - 23 июня- 2010, **Цилиндр**, пол 6 см ,
 $\Delta P=24$ Па



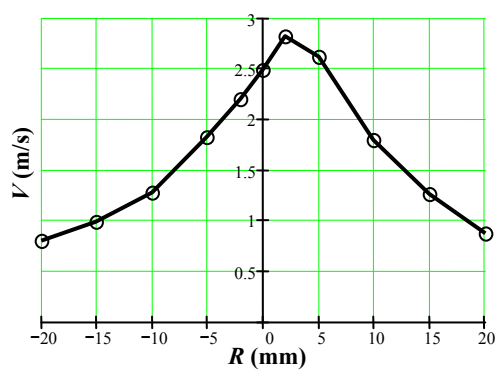
$Q = 2,94$ л/с

XII-24 июня-2010, **КВАДРАТ** пол 6 см,
 $\Delta P=16$ Па



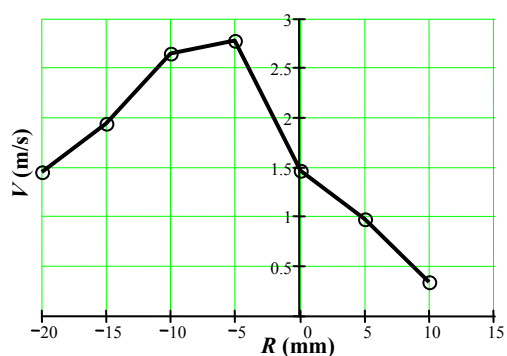
$Q = 2,65$ л/с

XIII - 24 июня- 2010, **КВАДРАТ** пол
 $\Delta P=24$ Па,



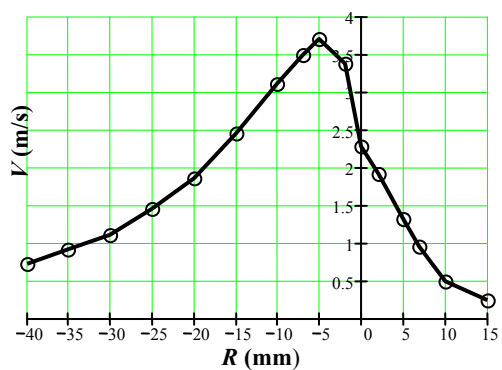
$Q = 3,4$ л/с

IX - 22 июня- 2010, **ПРЯМОУГОЛЬНИК**
 40×51 см², пол 6 см , $\Delta P=16$ Па



$Q = 3,2$ л/с

VIII-22 июня- 2010, **ПРЯМОУГОЛЬНИК** 40×51
см², пол 6 см , $\Delta P=24$ Па



$Q = 5,2$ л/с

Рис. 6. Профили вертикальных скоростей и данные расходов Q для цилиндрической, квадратной и прямоугольной камер при давлениях $\Delta P = 16$ Па и $\Delta P = 24$ Па

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ВЕКТОРА СКОРОСТИ В ТОРНАДОПОДОБНОМ ВИХРЕ

Измерения горизонтальной компоненты проводилось по той же методике, что и вертикальной, была соответственно перестроена только оптическая часть анемометра. На рис.7 в качестве примера представлены данные с выхода ЛДА (реализации доплеровской частоты (скорости)), соответствующие спектральные плотности и плотности вероятности флуктуаций скорости, а также средние ее значения и среднеквадратичные отклонения для вихря в цилиндрической камере при $\Delta P = 20$ Па. На основе этих и подобных результатов на Рис.8 приведены профили для горизонтальной компоненты скорости вихря в цилиндрической камере при $\Delta P = 20$ Па и на рис. 9 для трех форм камер (цилиндр, квадрат и прямоугольник) при $\Delta P = 20$ Па.

Результаты измерений

название файла с данными:	filedata= "d:\dopler\krug\s41_4024.prn"
интервал квантования, мс:	del= 2.20074
количество отсчетов в одной выборке:	NFUR= 8192
фильтр, кГц:	F = 30
размах сигнала, Гц:	Amplitude= 456048.155345
максимальное значение частоты, Гц:	max(sig) = 976465.251827
минимальное значение частоты, Гц:	min(sig) = 520417.096482
среднее значение частоты, Гц:	doplerm= 720277.256727
стандартное отклонение частоты, %:	sigma= 9.01447
стандартное отклонение частоты, кГц:	s = 64929.179601
отношение амплитуд:	otn = 1.876313

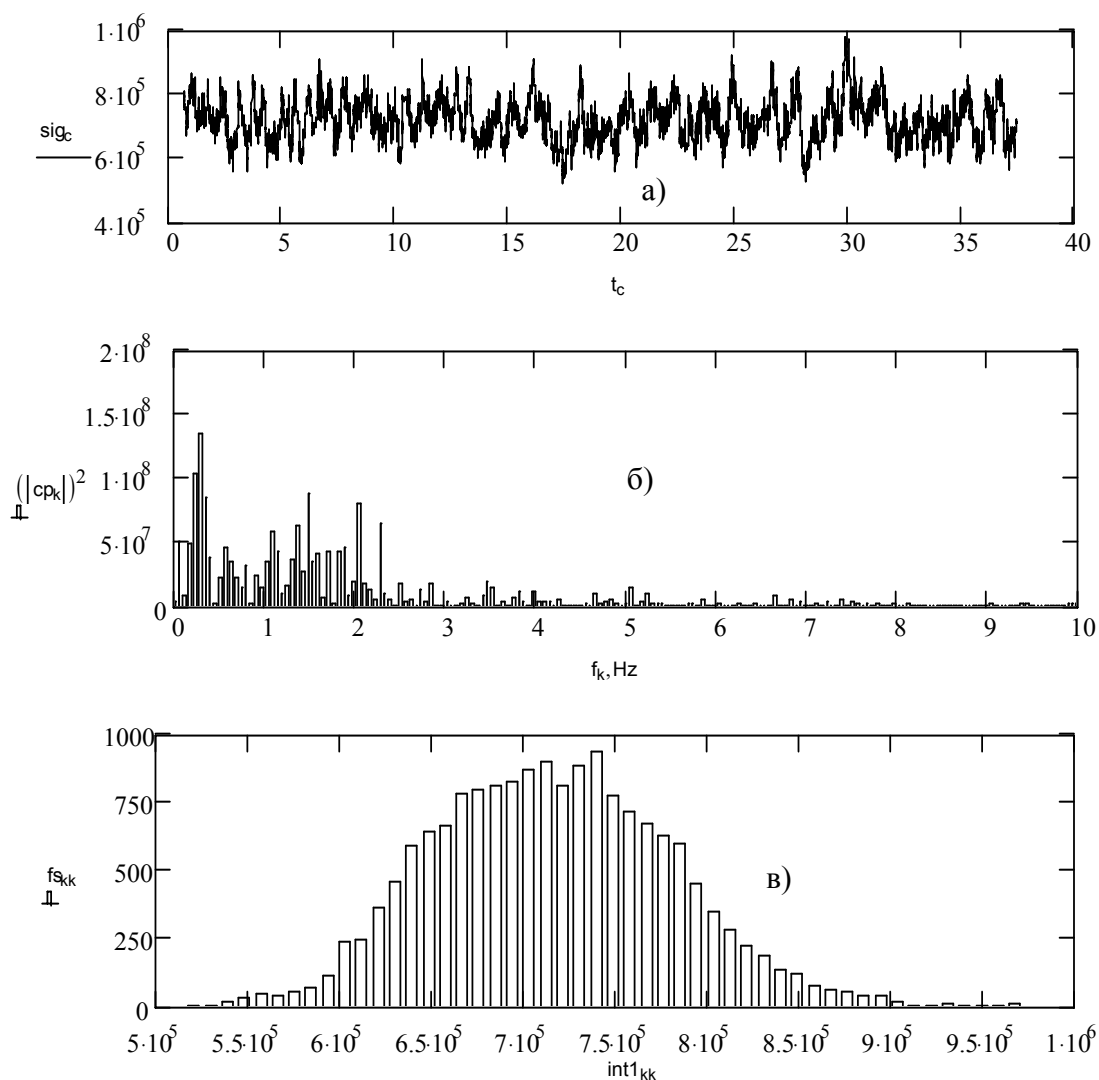


Рис. 7. Данные с выхода ЛДА: Таблица результатов измерений - в верхней части Рисунка. а) реализация доплеровской частоты (скорости), б) спектральная плотность, в) плотность вероятности флуктуаций скорости

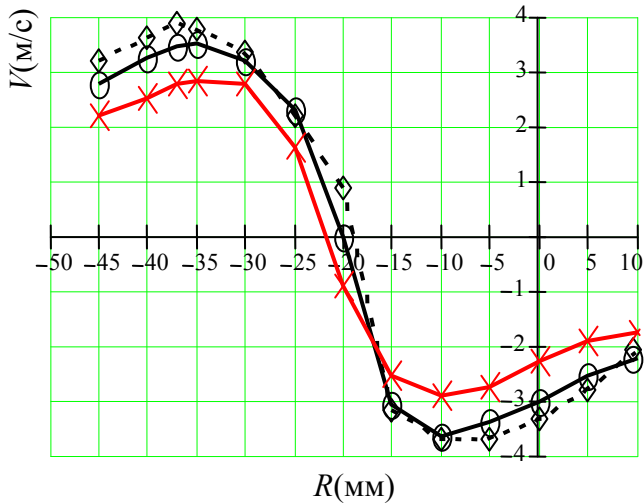


Рис. 8. Горизонтальные компоненты вектора скорости для кругового цилиндра (крестики), прямоугольника (ромбики), квадрата (кружки) при давлении $\Delta P=20$ Па.

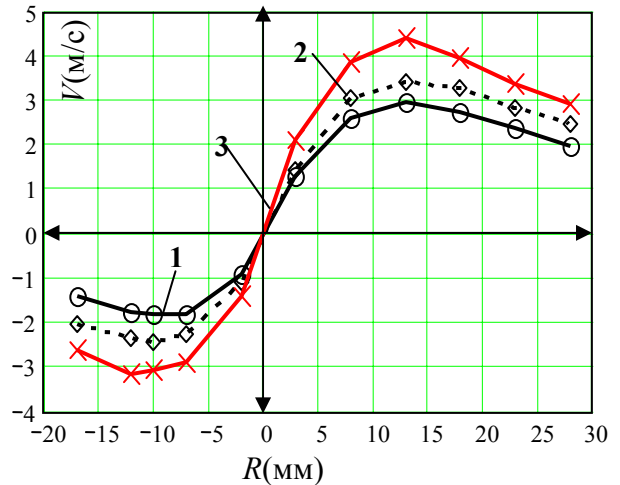


Рис. 9. Отцентрированные профили горизонтальных компонент скорости при трех значениях давления: кривая 1 (кружки) $\Delta P=24$ Па; кривая 2 (ромбики) - $\Delta P=20$ Па; кривая 3 (крестики) - $\Delta P=16$ Па.

Большой интерес представляет оценка завихренности исследуемого торнадо, определяемая, как ротор вектора скорости:

$$\omega = \text{rot}(V) = \frac{dV}{dR} + \frac{V}{R} \quad (2)$$

На рис.10 представлен рассчитанный по вышеприведенной формуле (2) профиль завихренности для перепада давления на входе камеры $\Delta P = 16$ Па.

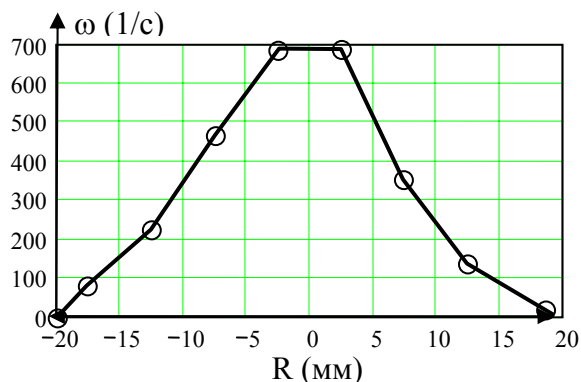


Рис. 10. Профиль завихренности для перепада давления на входе камеры $\Delta P=16$ Па

Как следует из этого рисунка, центральная часть вихря в зоне значений радиальной координаты $0 - 2,5$ мм вращается как твердое тело, то есть угловая скорость вращения постоянна. С увеличением радиальной координаты угловая скорость падает до нуля. Отметим, что рассчитанная, исходя из этого рисунка, угловая скорость в центре вихря составляет 700 (1/с).

Далее, с использованием профилей вертикальной и горизонтальной компонент построены изменения модуля вектора скорости и его наклон, как функции радиуса. Соответствующие результаты представлены на рис. 11 и 12.

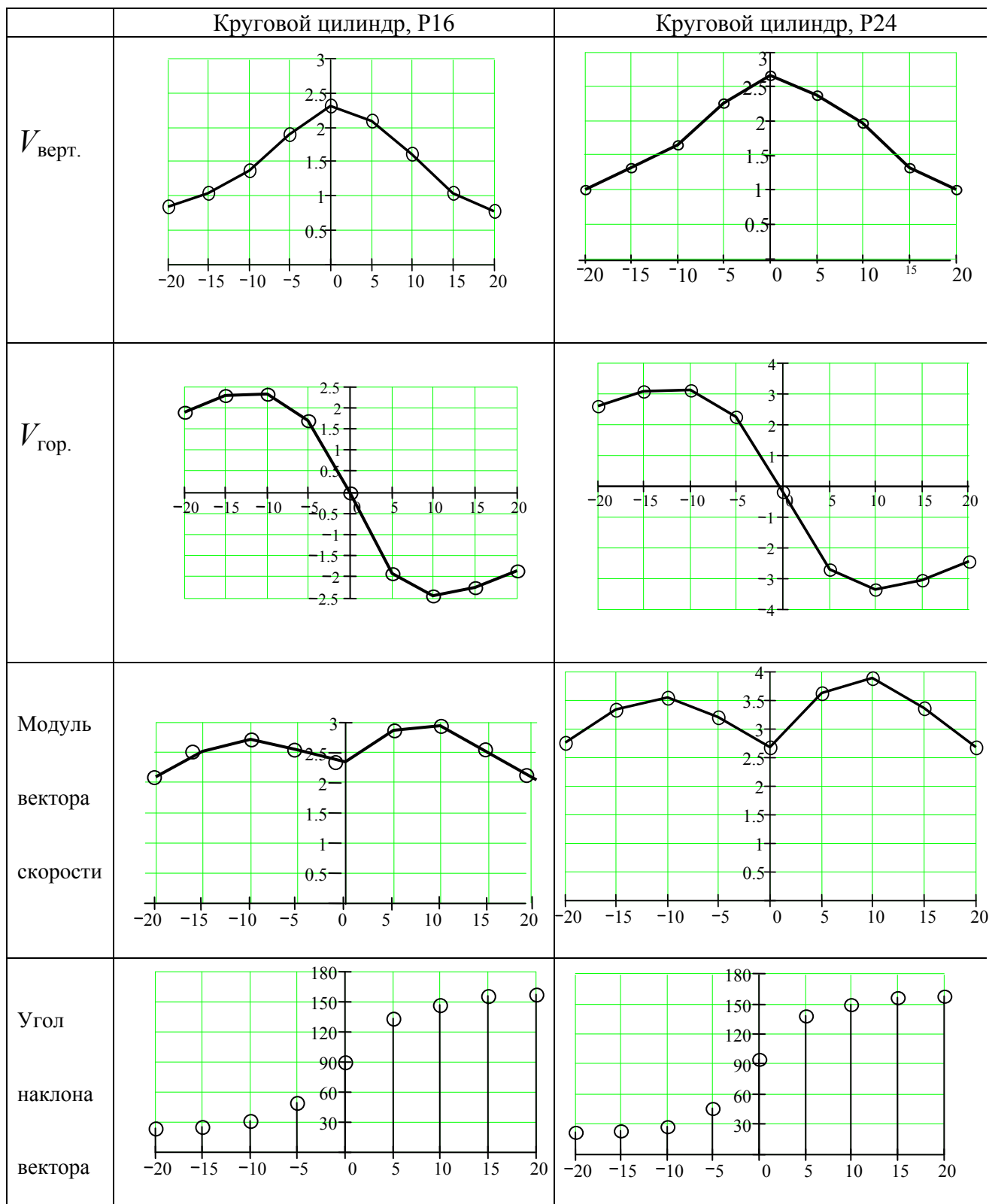


Рис. 11. Модуль и угол наклона вектора скорости в вихре

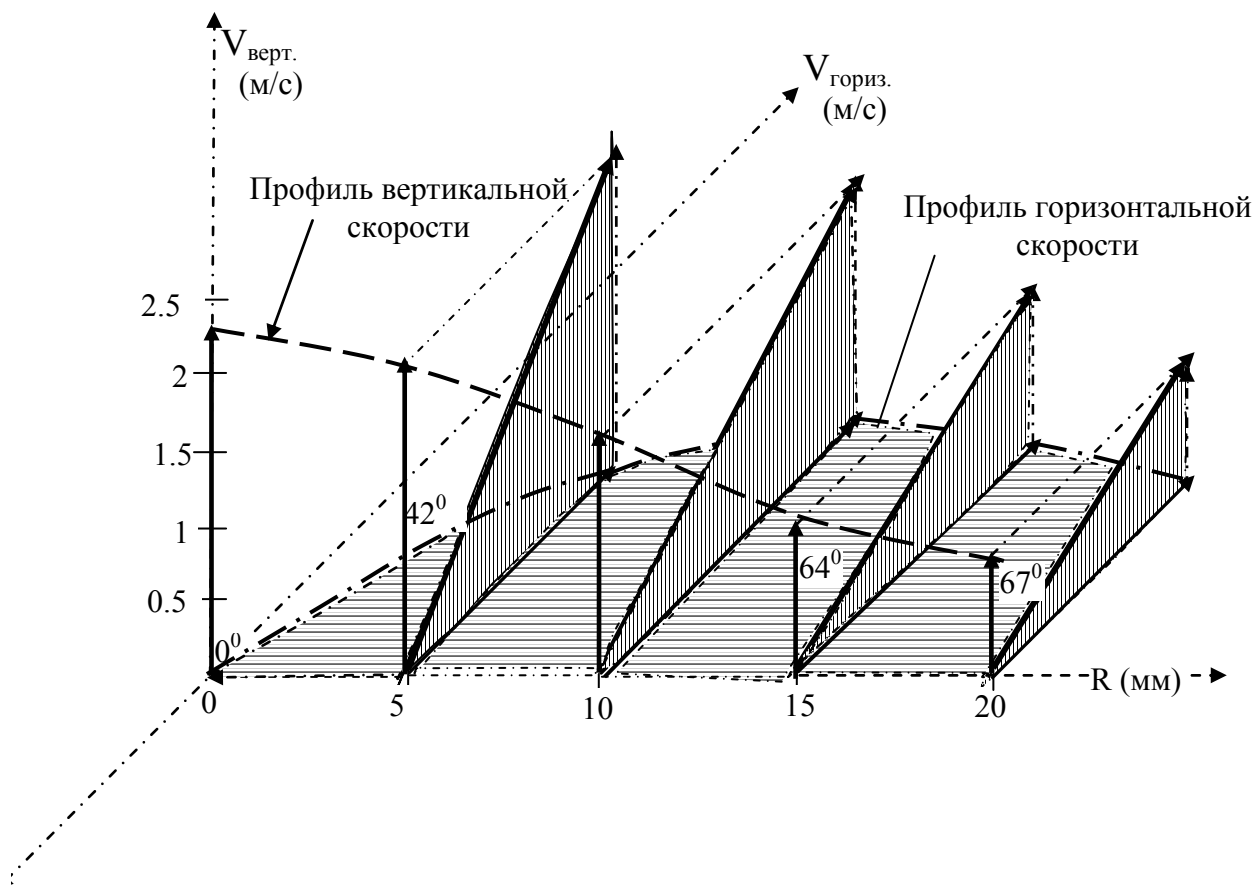


Рис. 12. Наклон вектора скорости как функция радиальной компоненты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе показано, что:

- 1) Профиль вертикальной компоненты скорости (для цилиндрической камеры) имеет гауссову форму с шириной на половине высоты 12 мм, то есть диаметр вихря по этому критерию составляет 24 мм. Профили в случае прямоугольной камеры в отличие от квадратной или цилиндрической существенно несимметричны.
- 2) При изменении перепада давления на входе цилиндрической камеры с 16 до 24 Па, то есть в 1,5 раза, отношение максимальных значений вертикальной компоненты составляет всего 1,08. Для квадратной камеры оно тоже очень мало: от 1,07 до 1,16. Для прямоугольной камеры оно составляет существенно большую величину – до 1,36.
- 3) Спектральная плотность флуктуаций скорости простирается от 0 до 5 Гц, что говорит о том, что частота прецессии лежит в этих пределах.
Форма кривой плотности вероятности флуктуаций скорости практически отвечает нормальному закону.
- 4) Скорость выноса дыма, рассчитанная по вертикальной компоненте вектора скорости в случае цилиндрической камеры для перепада давления $\Delta P = 16$ Па составляет 2,2 л/с, а для перепада давления $\Delta P = 24$ Па 2,94 л/с. Отношение перепадов давления равно 1,5, а отношение расходов – 1,4. Для прямоугольной камеры 40×50 см отношение расходов составляет 1,6.
- 5) Профиль горизонтальной компоненты в центральной части вихря линейен вдоль радиальной координаты, что свидетельствует о том, что эта его часть (по крайней мере с учетом усредняющего действия прецессии) вращается как твердое тело. Максимальное

значение горизонтальной компонента достигает при значении радиуса 10 – 12 мм, а затем плавно спадает.

- 6) При увеличении перепада давления на входе камеры горизонтальная компонента вектора скорости возрастает прямо пропорционально этому перепаду.
- 7) Модуль вектора скорости (для цилиндрической камеры) в пределах вихря при $\Delta P = 16$ Па. принимает значение около 3 м/с и изменяется мало, хотя с ростом радиальной координаты в начале прирастает примерно на 10%, а затем плавно падает. При $\Delta P = 24$ Па его значение составляет немногим более 3,5 м/с.
- 8) Угол наклона вектора скорости от 0 в центре медленно изменяется и в точке $r = R = 20$ мм достигает 67 градусов (рис. 9, рис. 10).
- 9) В области максимальных значений вектора скорости ее дисперсия существенно больше, чем в остальных областях. Сравнение профилей для цилиндрической камеры и прямоугольной показывает существенную разницу: максимальные значения в случае цилиндрической камеры в два раза выше, чем для прямоугольной.
- 10) Результаты исследований представляют определенный научный интерес, так как позволяют провести сравнение данных реального и модельного (компьютерного) экспериментов. Кроме этого, они могут быть использованы при проектировании вихревых устройств, предназначенных для очистки помещений от вредных загрязнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Наливкин Д.В.** Ураганы, бури, смерчи. Л.: Наука. 1969. 487 с.
2. **Ахметов Д.Г., Никулин В.В.** Устройство для очистки воздуха. Патент РФ №2354891, (2009).
3. **Alekseenko S.V., Shtork S.I.** Swirling flow large-scale structure in a combustor model // Russian J. of Eng. Thermophysics. 1992. V.2, №4. P.231-266.
4. **Ахметов Д.Г., Никулин В.В.** Экспериментальное определение времени образования торнадоподобного вихря в замкнутой камере // ПЖТФ. 2008. Т.34. Вып.24. С.36-41.
5. **Соболев В.С.** и др. Лазерная доплеровская система нового поколения как датчик скорости для автоматизации научного эксперимента и технологических процессов // Датчики и системы. 2000. №2. С. 25 – 30.
6. **Тихонов В.И.** Статистическая радиотехника. М.: Сов. Радио. 1966. 680 С.

V.V. Nikulin¹, V.S. Sobolev², E.N. Utkin², A.M. Shcherbachenko², GA Kashcheeva²

¹ *Institute of Hydrodynamics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrent'ev Ave., 15, E-mail: nikulin@hydro.nsc.ru*

² *Institute of Automation and Electrometry, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Russia, 630090, Novosibirsk, Acad. Koptyug Ave., 1, E-mail: sobolev@iae.nsk.su*

TORNADO-LIKE VORTICES STRUCTURE AND DYNAMIC CHARACTERISTICS INVESTIGATIONS WITH HIGH PRECISION LASER DOPPLER ANEMOMETER

The structure and dynamic characteristics (profiles of vertical and azimuthal component of the velocity vector) of the tornado-like vortex are investigated by the laser Doppler anemometry method, and their statistical characteristics, as well as the mass transfer rate.

TORNADO, VORTEX FLOW, DOPPLER ANEMOMETRY