



Экспериментальное исследование теплофизических и газодинамических процессов

Лекция № 3

Измерение давления, расхода и скорости



Средства измерения давления

2

Измерение давления необходимо для управления технологическими процессами и обеспечения безопасности производства. Кроме того, этот параметр используется при косвенных измерениях других технологических параметров: уровня, расхода, температуры, плотности и т.д. В системе СИ за единицу давления принят паскаль (Па).

Основные средства измерения давления:

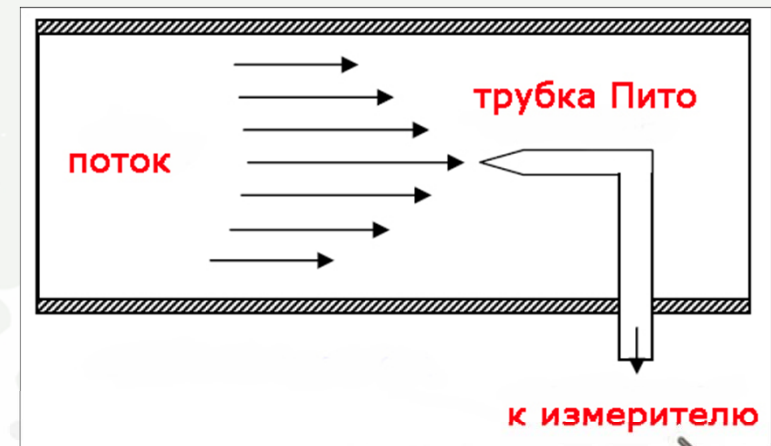
- трубка Пито;
- манометры;
- вакуумметры;
- мановакуумметры;
- напоромеры;
- тягомеры;
- тягонапоромеры;
- датчики давления;
- дифманометры.



Трубка Пито

Трубка Пито служит для измерения скорости течения за счет дополнительного давления, возникающего вследствие скоростного напора.

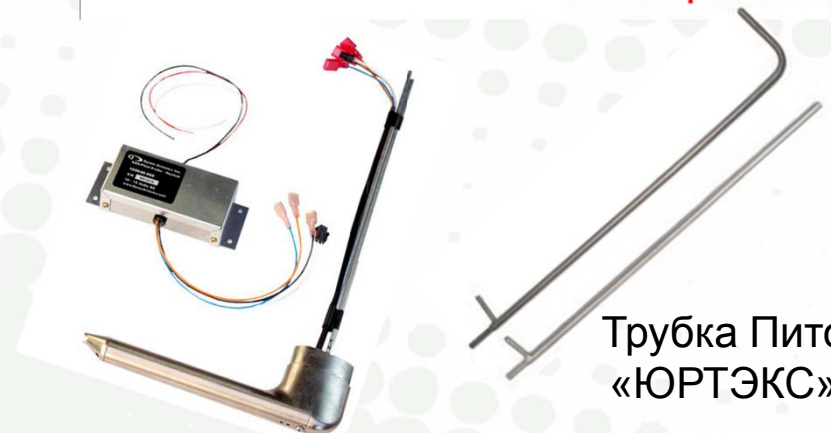
Конец трубки, который открыт для входящего потока, всегда направлен вверх по потоку относительно места монтажа, а другой конец трубки подсоединяется к контрольно-измерительному прибору.



Трубка Пито / для пара «WIKА»



Трубка Пито DELTAFLOW «Systec Controls»



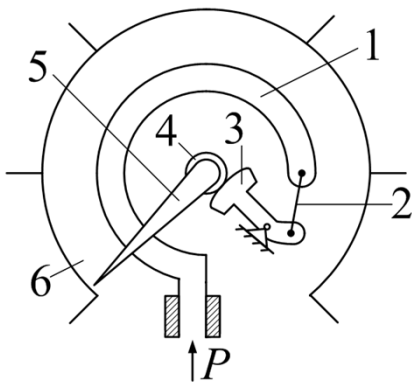
L-образная трубка Пито DYNON AVIONICS, INC.

Трубка Пито «ЮРТЭКС»



Деформационные приборы

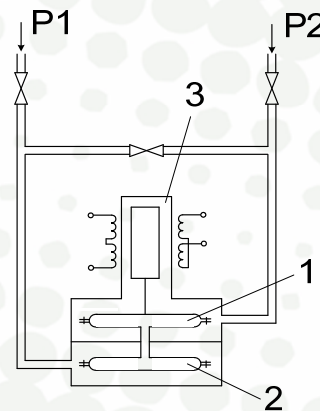
С трубчатой пружиной



METER DM 01

- 1 – трубчатая пружина;
- 2 – тяга; 3 – зубчатый сектор;
- 4 – шестерня; 5 – стрелка;
- 6 – шкала

Мембранный дифманометр

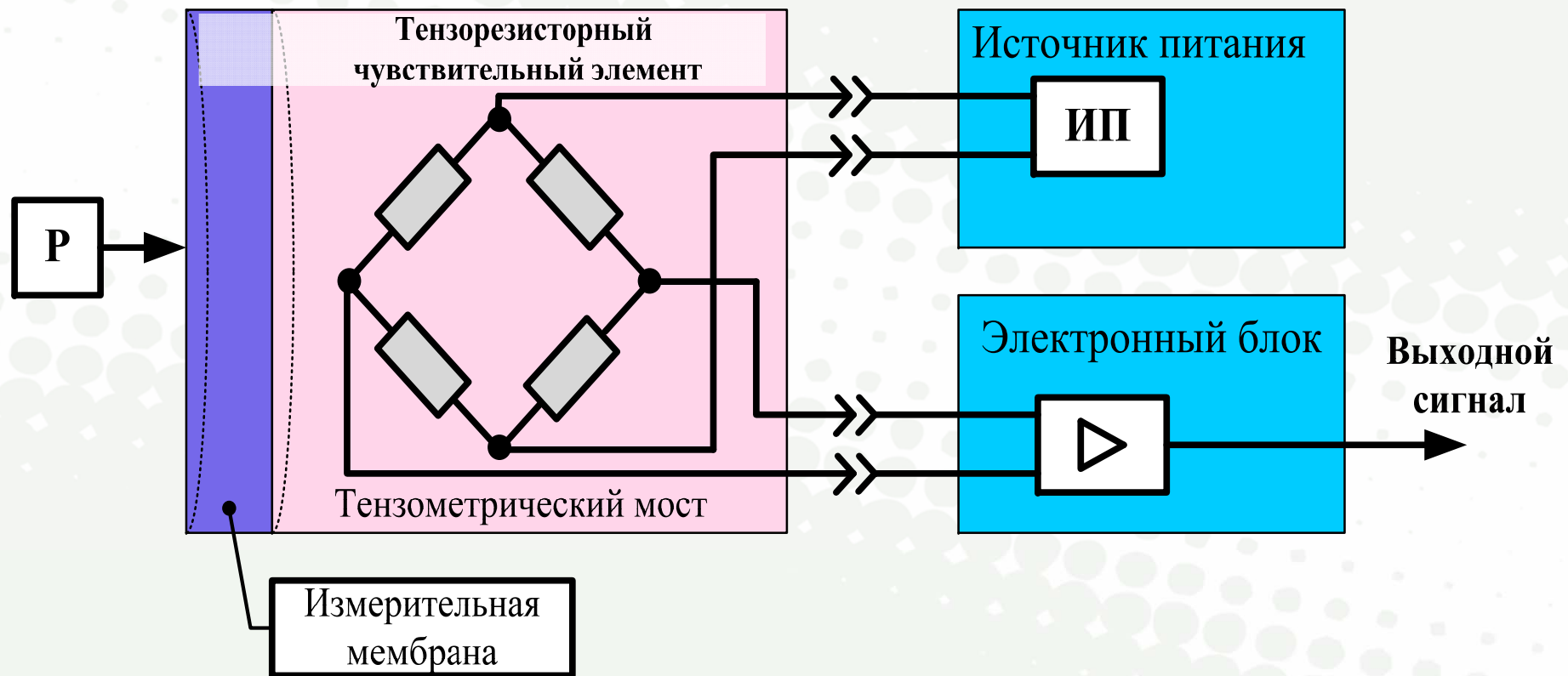


- 1, 2 – мембранные коробки;
- 3 – дифференциально-трансформаторный преобразователь

Датчики фирмы «Метран»



Резистивные дифференциальные манометры



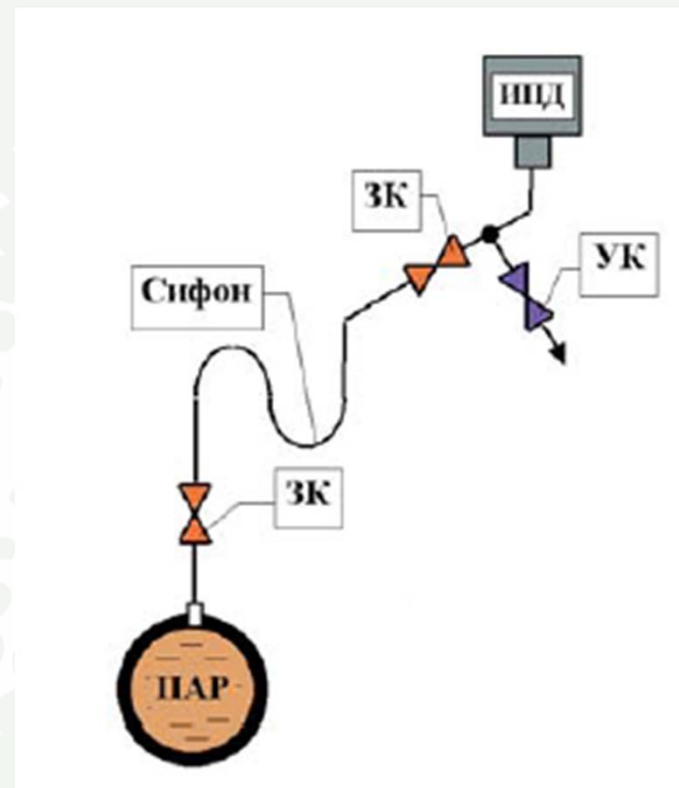


Средства измерения давления

Особенности эксплуатации приборов для измерения давления

Если среда химически активна по отношению к материалу прибора, то его защиту производят с помощью разделительных сосудов или мембранных разделителей.

Для предохранения прибора от действия высокой температуры среды применяют сифонные трубки.



УК – уравнильный клапан;
ИПД – измерительный преобразователь давления; ЗК – запорный клапан





Средства измерения расхода

7

Для контроля и управления химическим производством большое значение имеет измерение расхода и количества различных веществ: газов, жидкостей, пульп и суспензий.

Расход вещества – это его количество, протекающее через сечение трубопровода в единицу времени. Количество измеряют в единицах объема (м³, см³) или массы (т, кг, г). Соответственно может измеряться объемный (м³/с, м³/ч, см³/с) или массовый (кг/с, кг/ч, г/с) расход.

- Расходомеры переменного перепада давления.
- Расходомеры постоянного перепада давления.
- Электромагнитные расходомеры.
- Ультразвуковые расходомеры.
- Вихревые расходомеры.
- Тепловые расходомеры.
- Турбинные расходомеры.
- Кориолисовы расходомеры.





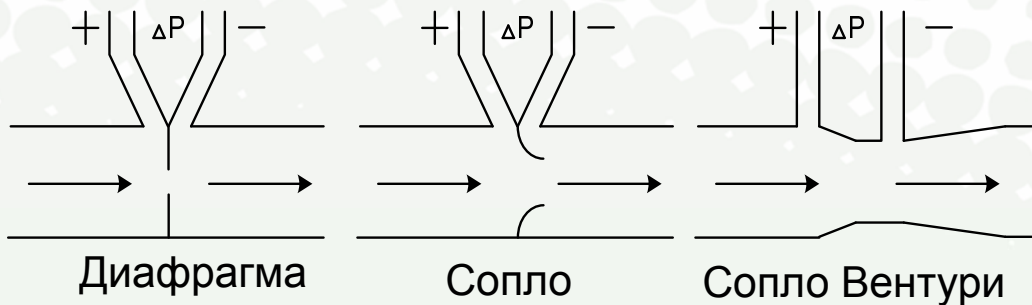
Средства измерения расхода

Расходомеры переменного перепада давления

Принцип действия основан на измерении перепада давления, создаваемого при протекании жидкого или газообразного вещества, через сужающее устройство, установленное внутри трубопровода.

При протекании вещества через сужающее устройство часть потенциальной энергии давления переходит в кинетическую энергию. В следствие чего средняя скорость потока в суженном сечении повышается, а статическое давление потока после сужающего устройства становится меньше, чем перед ним. Образуется разность давлений (перепад давления).

Сужающие устройства



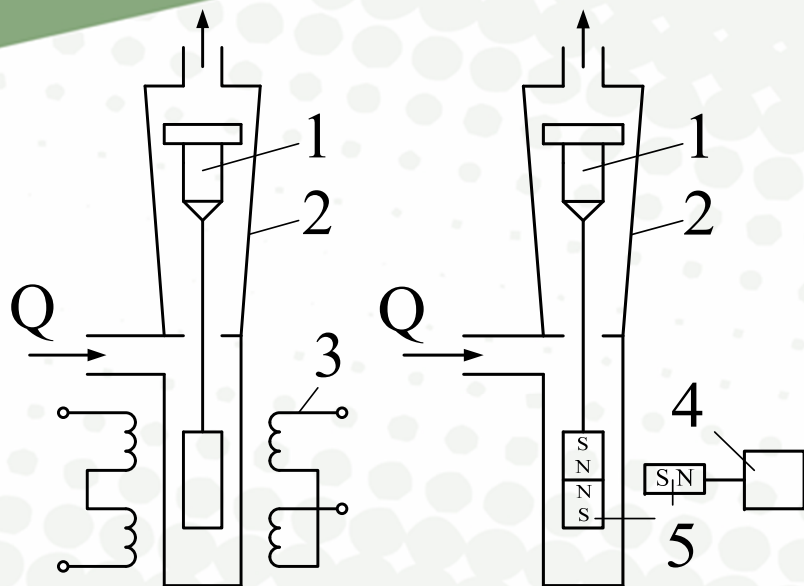
Сапфир-22 ДД



Emerson Rosemount 3051SFC



Расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры)



- 1 – поплавок;
- 2 – стеклянная трубка;
- 3 – дифференциально-трансформаторный преобразователь;
- 4 – преобразователь;
- 5 – два постоянных магнита.

Поток измеряемого вещества, перемещающийся в конусообразной трубе снизу вверх, поднимает поплавок до тех пор, пока сечение кольцеобразного промежутка между поплавком и стенками трубки не достигает величины, при которой силы воздействия протекающего вещества на поплавок не уравновесятся его весом.



Ротаметр с электрической дистанционной передачей показаний (тип РЭВ)
ООО «РосПрибор»



Ротаметр пневматический (тип РП)
НПО «СПЕКТР»

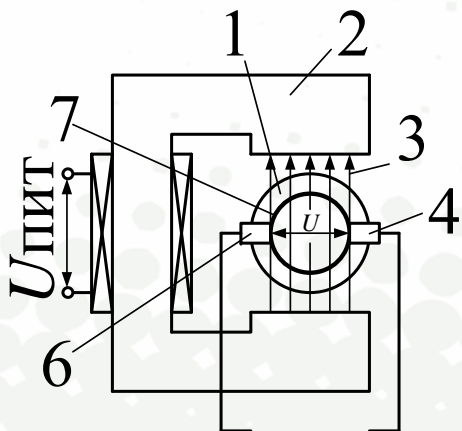


Ротаметр с местными показаниями (тип РМА)
ООО «РОТАМЕТР»



Электромагнитные расходомеры

Принцип действия основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости.



- 1 – трубопровод;
- 2 – электромагнит;
- 3 – электромагнитное поле;
- 4, 6 – изолированные электроды;
- 7 – электроизоляция.



FM 657 TigerMag
производства Sparling

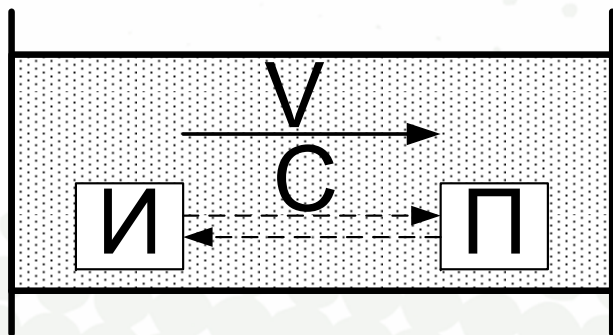


ИПРЭ-1 «Арзамасский
приборостроительный завод



Ультразвуковые расходомеры

Принцип действия основан на измерении зависящего от расхода того или иного акустического эффекта, возникающего при прохождении ультразвуковых колебаний через контролируемый поток жидкости или газа.



И – излучатель;
П – приемник;
V – скорость потока;
C – скорость звука в данной среде.



Ultrasonic Senior Sonic
производства Daniel

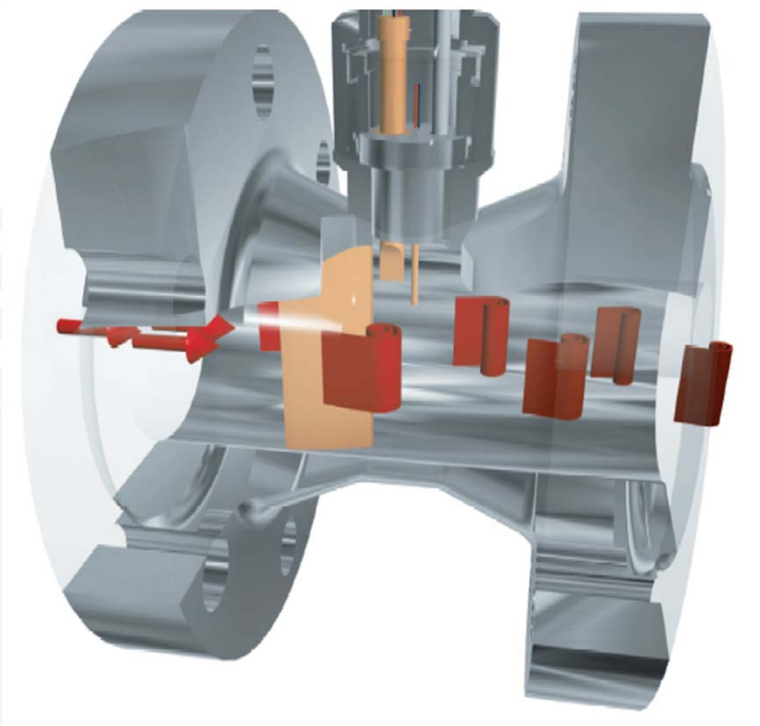


Siemens Sitrans F
M MAG 1100 FOOD



Вихревые расходомеры

Принцип действия основан на явлении возникновения вихрей при встрече потока с телом не обтекаемой формы.



InnovaMass 240/241
Series SIERRA



Rosemount 8800
Emerson



Тепловые расходомеры

Принцип действия основан на измерении зависящего от расхода эффекта теплового воздействия на поток или тело, контактирующее с потоком.

По характеру теплового взаимодействия с потоком различают:

- калориметрические (при электрическом омическом нагреве нагреватель расположен внутри трубы);
- термоконвективные (нагреватель расположен снаружи трубы);
- термоанемометрические.

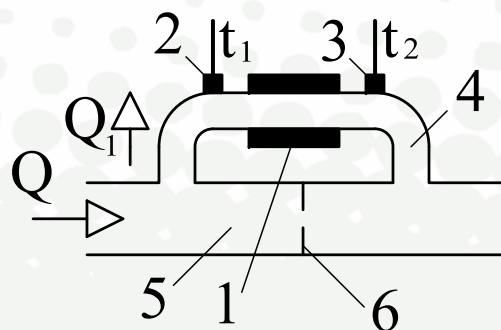


Схема термоконвективного расходомера:

1 – нагреватель; 2, 3 – датчики температуры;
4 – трубка; 5 – шунтируемый участок трубопровода;
6 – дроссель.

Распределение температур нагрева зависит от расхода вещества. При отсутствии расхода температурное поле симметрично, а при его появлении T_1 падает сильнее (вследствие притока холодного вещества), чем температура T_2 . С увеличением расхода разность температур T_1 и T_2 будет уменьшаться.



Sensor TA Di
«Hoentzsch»



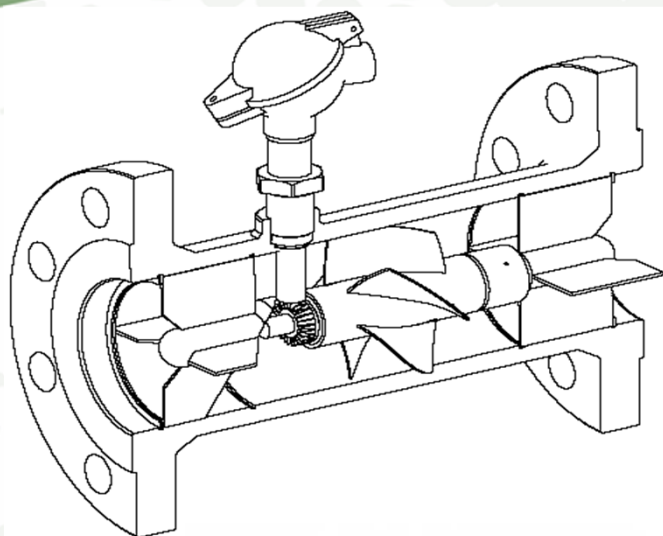
ЭМИС-ТЭРА 280
«ЭМИС»



504FT компании
KURZ Instruments



Турбинные расходомеры



Турбинный расходомер представляет собой измерительное средство, воспринимающее скорость среды, протекающей в трубопроводе под давлением. На пути жидкости протекающей через расходомер расположено аксиальное ходовое колесо, число оборотов которого, в заданном пределе погрешности, пропорционально скорости потока. Число оборотов ходового колеса воспринимается индуктивным сигнальным датчиком.



TURBOQUANT-S

«MMG FLOWINSTRUMENTATION Ltd.»



АГАТ-1М

«ЗАО ПРОМПРИБОР»



Расходомер Daniel
(серия 1500)

«Emerson»

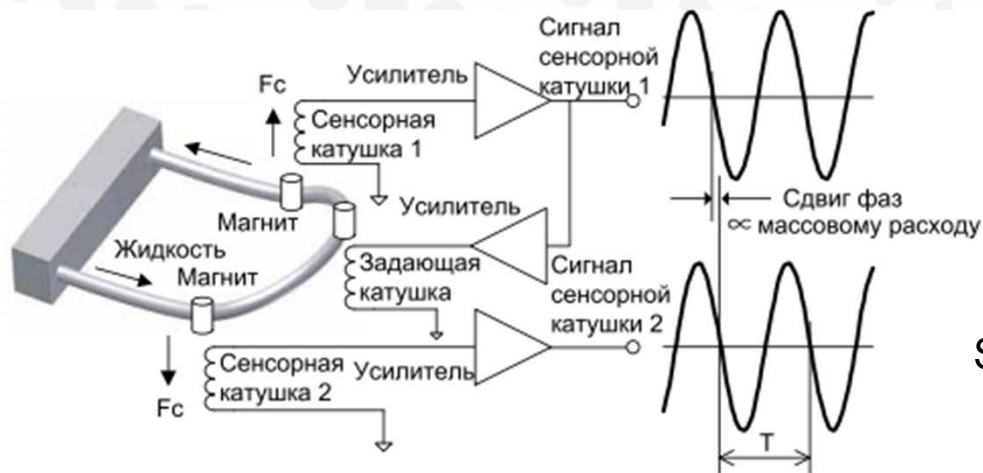


Кориолисовы расходомеры

Каждая катушка сенсора движется в однородном магнитном поле соседнего магнита. Напряжение, генерируемое каждой измерительной катушкой, создает синусоидальное колебание, отражающее движение одной трубки относительно другой.

В условиях отсутствия потока эффект Кориолиса не возникает (движения на входном и на выходном концах трубки находятся в одной фазе, синусоидальные колебания совпадают).

При наличии потока синусоидальные колебания различаются по фазе, поскольку сигнал на выходной ветви запаздывает относительно сигнала на входной ветви (кориолисова сила направлена в различные стороны для входного и выходного потоков). Таким образом, массовый расход может быть рассчитан на основе измерения сдвига фаз двух сигналов.



SITRANS FC430
«Siemens»



Эмис-Масс 260
«ЭМИС»



RotaMASS
«Yokogawa»



Анемометры

Анемометр – измерительный прибор, предназначенный для определения скорости ветра, направленных воздушных и газовых потоков.

Основные составные части:

- приемное устройство (чувствительный элемент, первичный преобразователь);
- вторичный преобразователь (механический, пневматический, электронный блок);
- отсчетное устройство (указатель стрелки, шкала, индикатор, индикатор, дисплей).

По принципу действия чувствительных элементов:

- динамометрические (трубки Пито-Прандтля);
- вращающиеся (чашечные, винтовые, крыльчатые);
- тепловые (термоанемометры);
- вихревые;
- ультразвуковые;
- оптические (лазерные, доплеровские).



Тепловой анемометр
ТМА-21НВ
«ЭЛЕКТРОНПРИБОР»



Чашечный
анемометр МС-13
«ЮРТЭКС»



Ультразвуковой
анемометр ANM/O
«FuehlerSysteme»



Анемометр ЭОЛ-01
НПО «ВЫМПЕЛ»



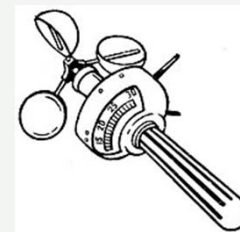


Анемометры

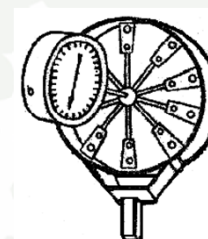
Чашечные анемометры могут измерять скорость ветра лишь в одной плоскости, перпендикулярной оси вращения. Поток воздуха вращает чашки, и по скорости их вращения вычисляется скорость ветра.

У **крыльчатого анемометра** (в отличие от чашечного) деталь, улавливающая скорость ветра, выполнена в форме вентилятора. Поток воздуха, попадая на вентилятор, вращает лопасти и по скорости их вращения измеряется скорость ветра.

Принцип действия **ультразвуковых анемометров** состоит в измерении скорости звука, которая изменяется в зависимости от направления ветра. Информация об измеряемых характеристиках звука преобразуется электронно-цифровым блоком в сигнал, благодаря которому и вычисляется скорость звука.



Анемометр AMC-02
«Гидрометприбор»



Анемометр ACO-3
ЗАО НПО «Техноком»

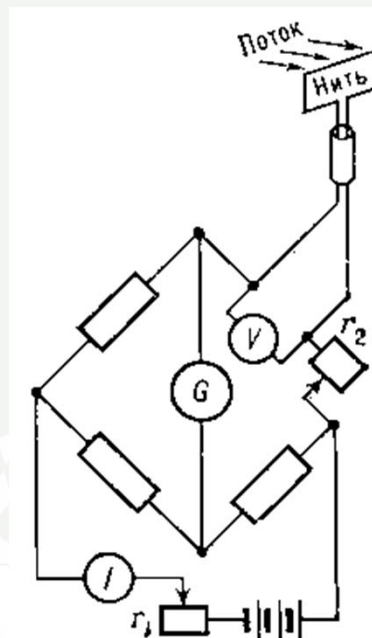


Анемометр HD 52.3D
«GHM-Messtechnik»



Термоанемометры

Принцип действия **термоанемометра** основан на зависимости между скоростью потока и теплоотдачей проволоочки, помещенной в поток и нагретой электрическим током. Основная часть – измерительный мост, в одно плечо которого включен чувствительный элемент в виде нити из никеля, вольфрама или платины, укрепленной на тонких электропроводных стержнях. Количество тепла, передаваемое нагретой проволоочкой потоку жидкости (газа), зависит от физических характеристик движущейся среды, геометрии и ориентации проволоочки.



Тепловой анемометр
Testo 425 «Testo»



Тепловой анемометр
ТКА-ПКМ ООО «Метеоприбор»

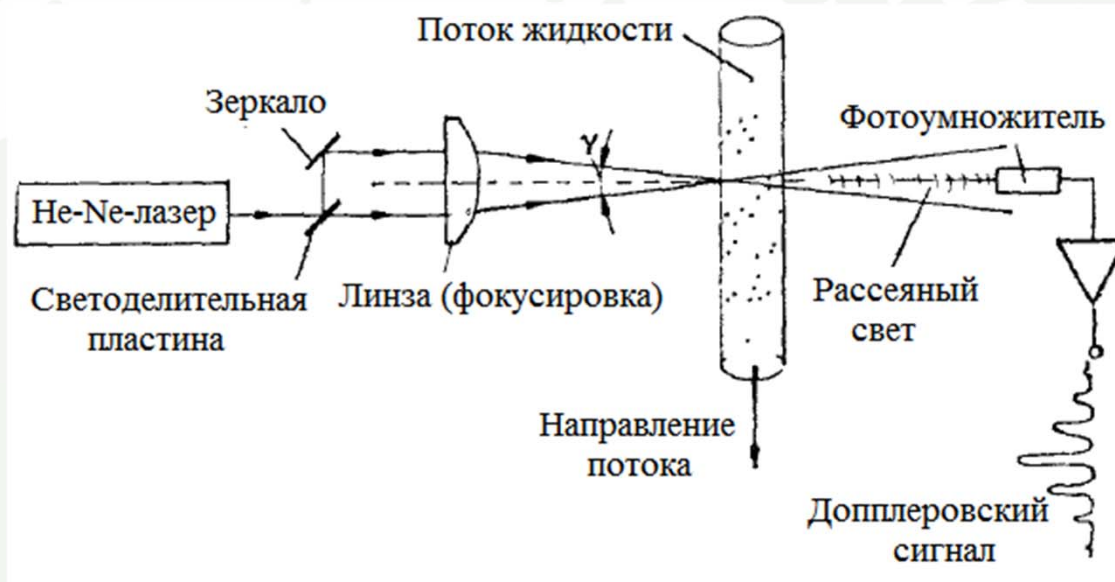


Тепловой анемометр VT 110
«KIMO Instruments»



Оптические анемометры

Принцип действия **лазерного доплеровского анемометра (ЛДА)**: объект облучают пучком лазерного излучения от неподвижного источника. Это излучение отражается от объекта и регистрируется неподвижным приемником. Вследствие эффекта Доплера, частота излучения, попадающего на приемник, будет отличаться от частоты излучения неподвижного источника на некоторую величину, пропорциональную скорости движения объекта относительно источника и приемника.



PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (ЦИФРОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ)

Метод цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry или PIV) относится к классу бесконтактных методов измерения скорости в потоках. В ряду других инструментов для исследования структуры течений он занимает особое место благодаря возможности регистрировать мгновенные пространственные распределения скорости. Данное преимущество является особенно важным при изучении потоков, содержащих крупномасштабные вихревые структуры, информация о которых частично теряется при применении одноточечных методов диагностики. Преимущества метода: можно отнести невозмущающий характер измерений и возможность комбинации с другими оптическими методиками.

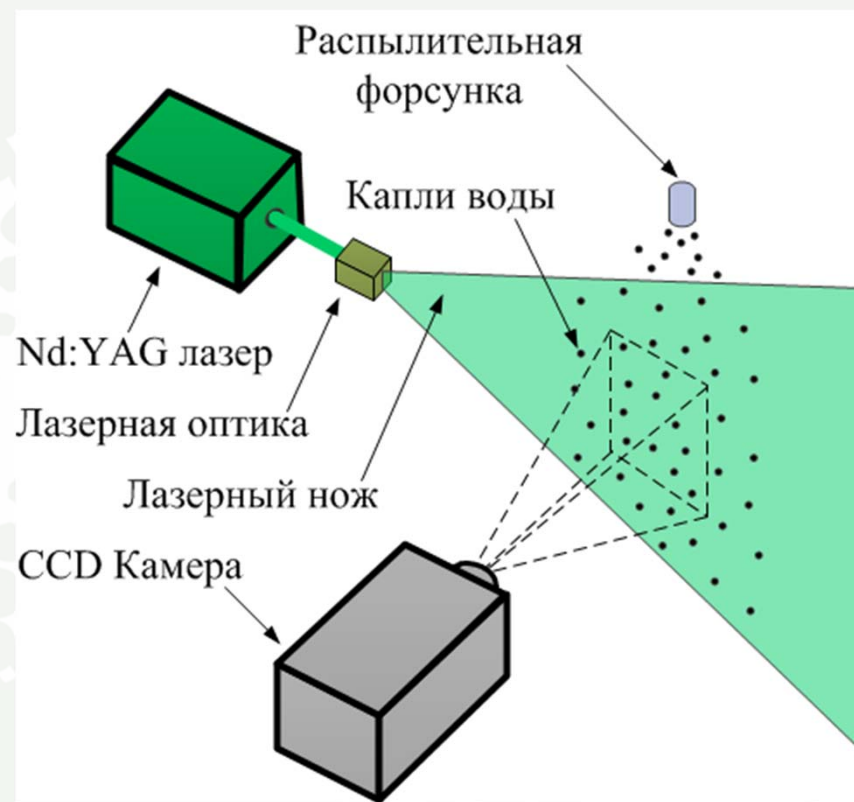
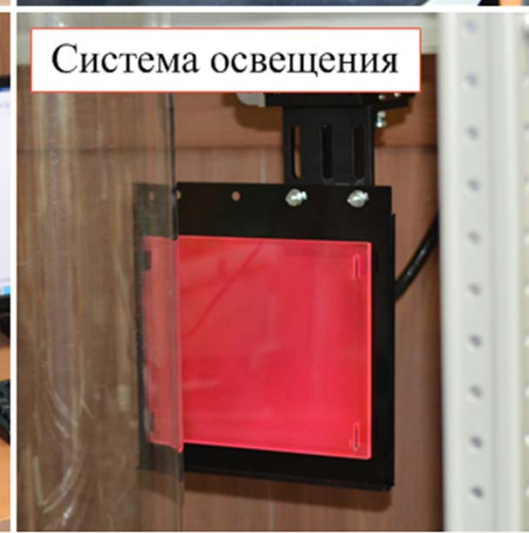
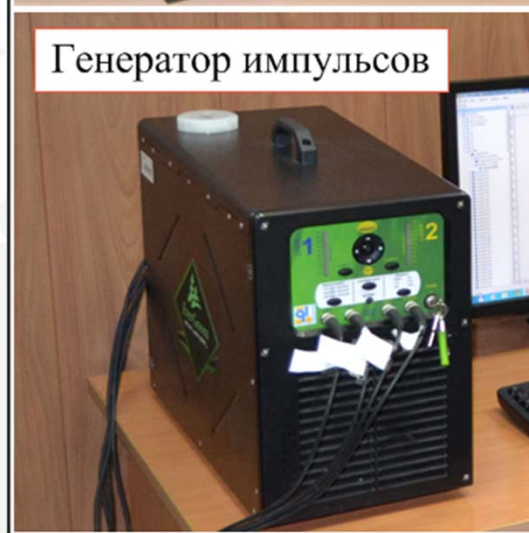


Схема метода PIV



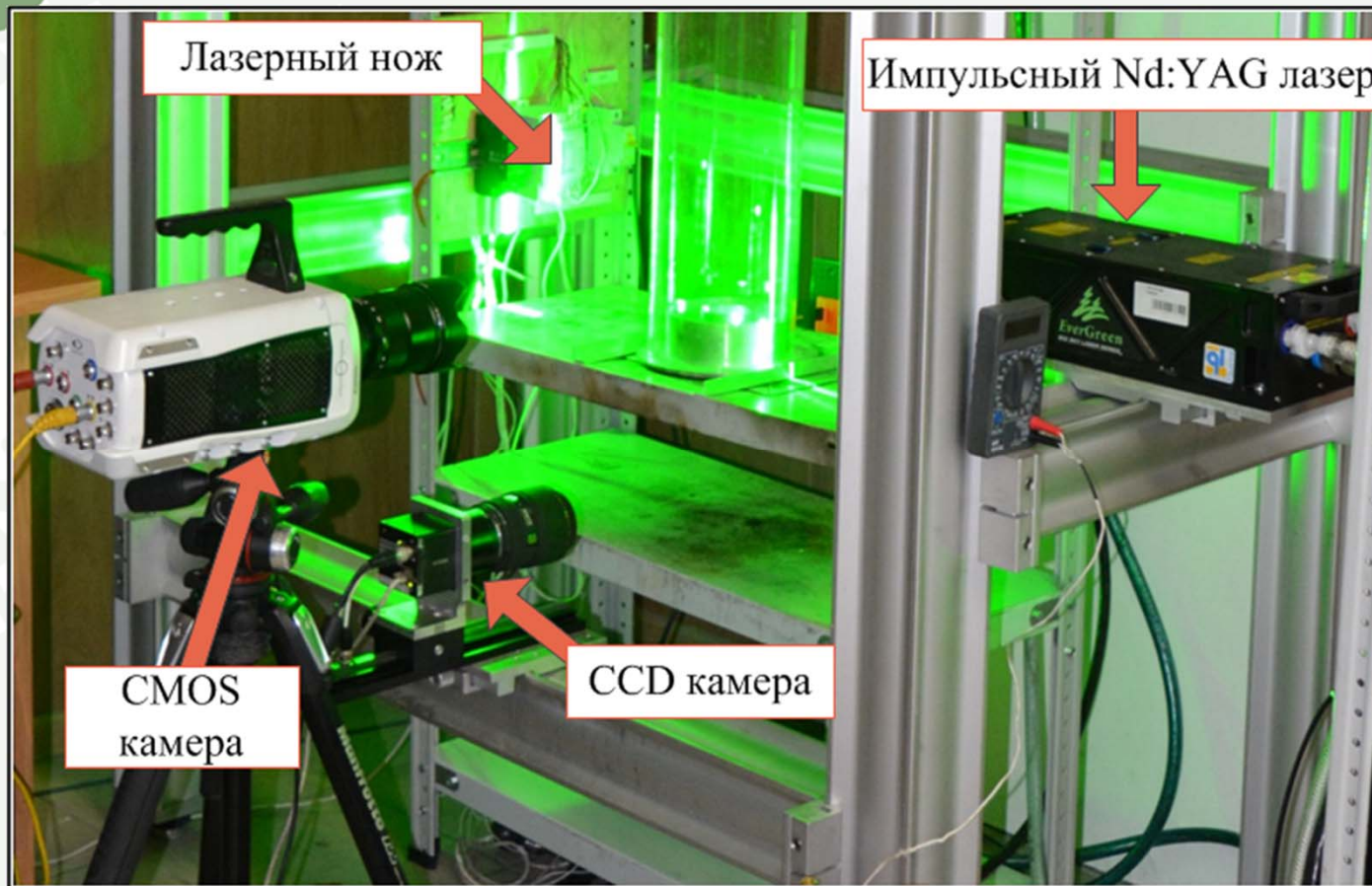


CCD
видеокамеры



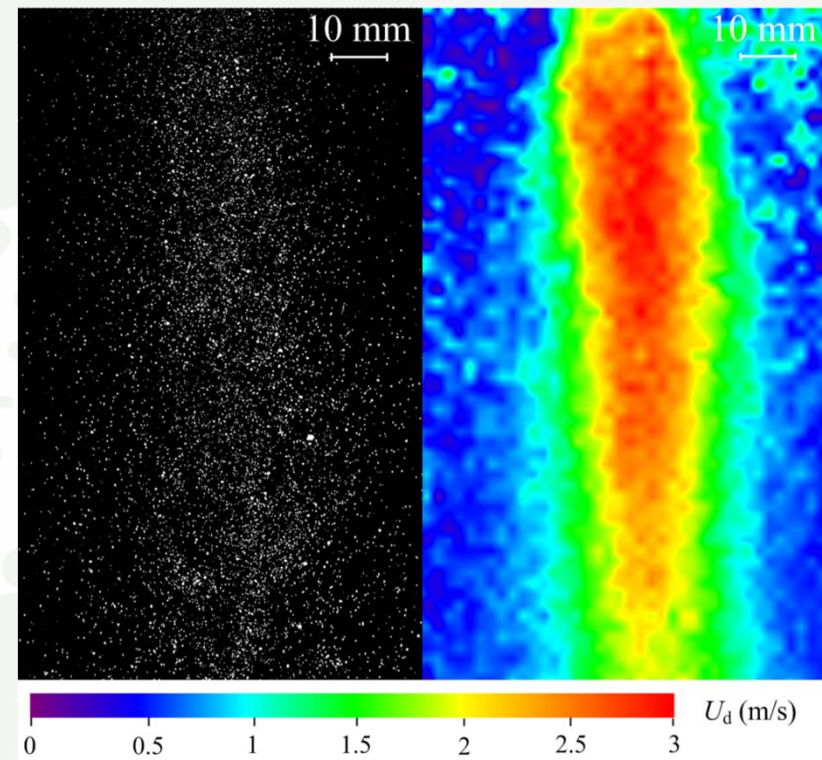
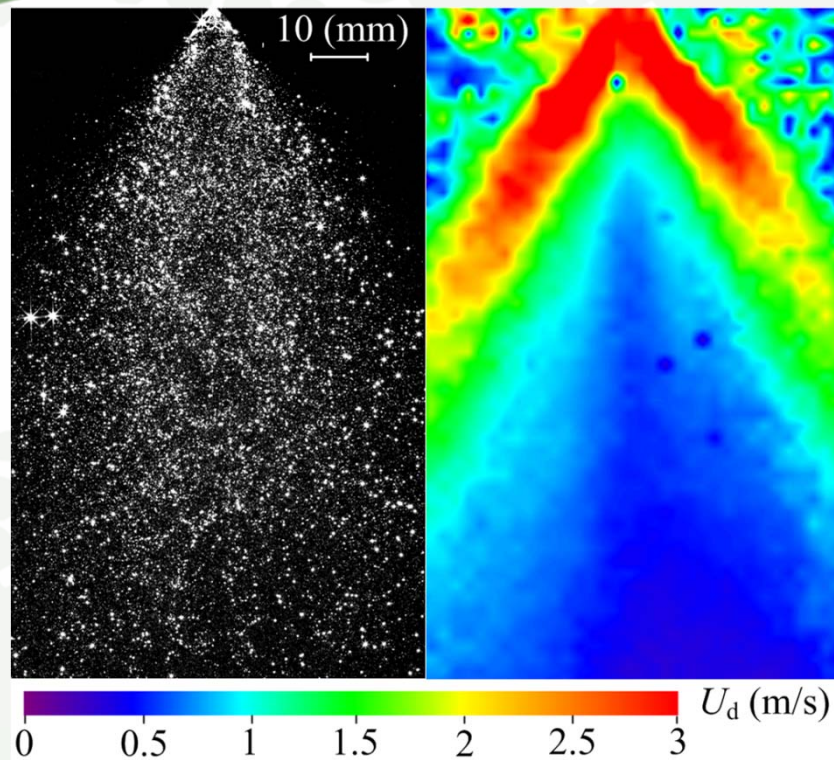
Оборудование, используемое в PIV измерениях





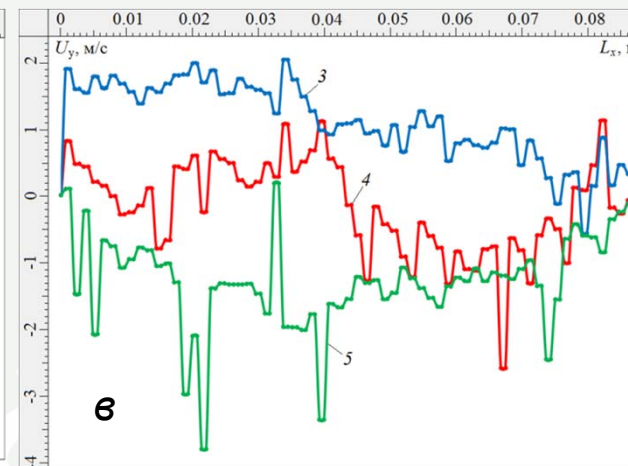
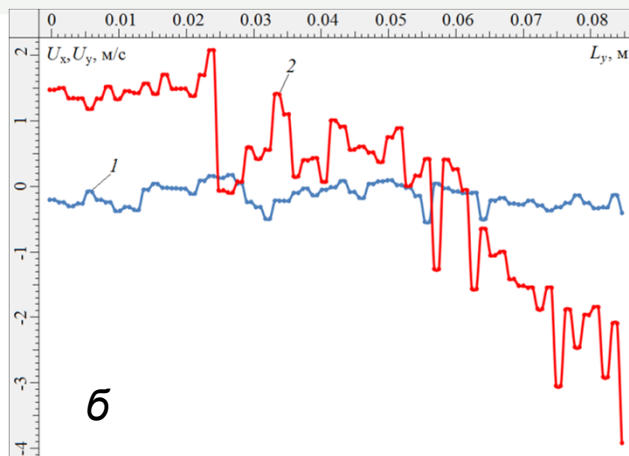
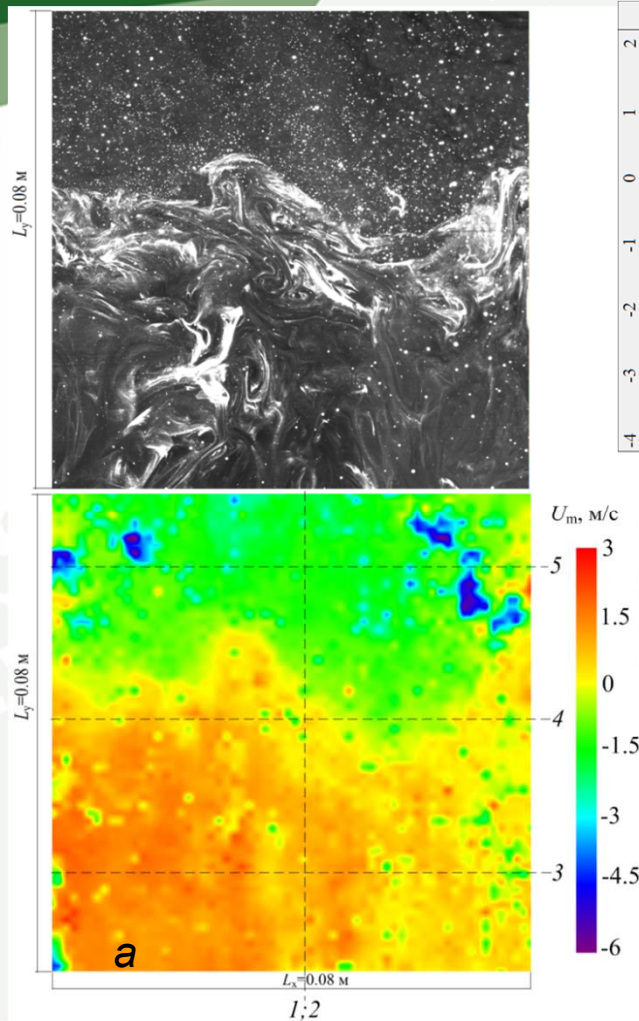
Пример экспериментального стенда для реализации PIV измерений





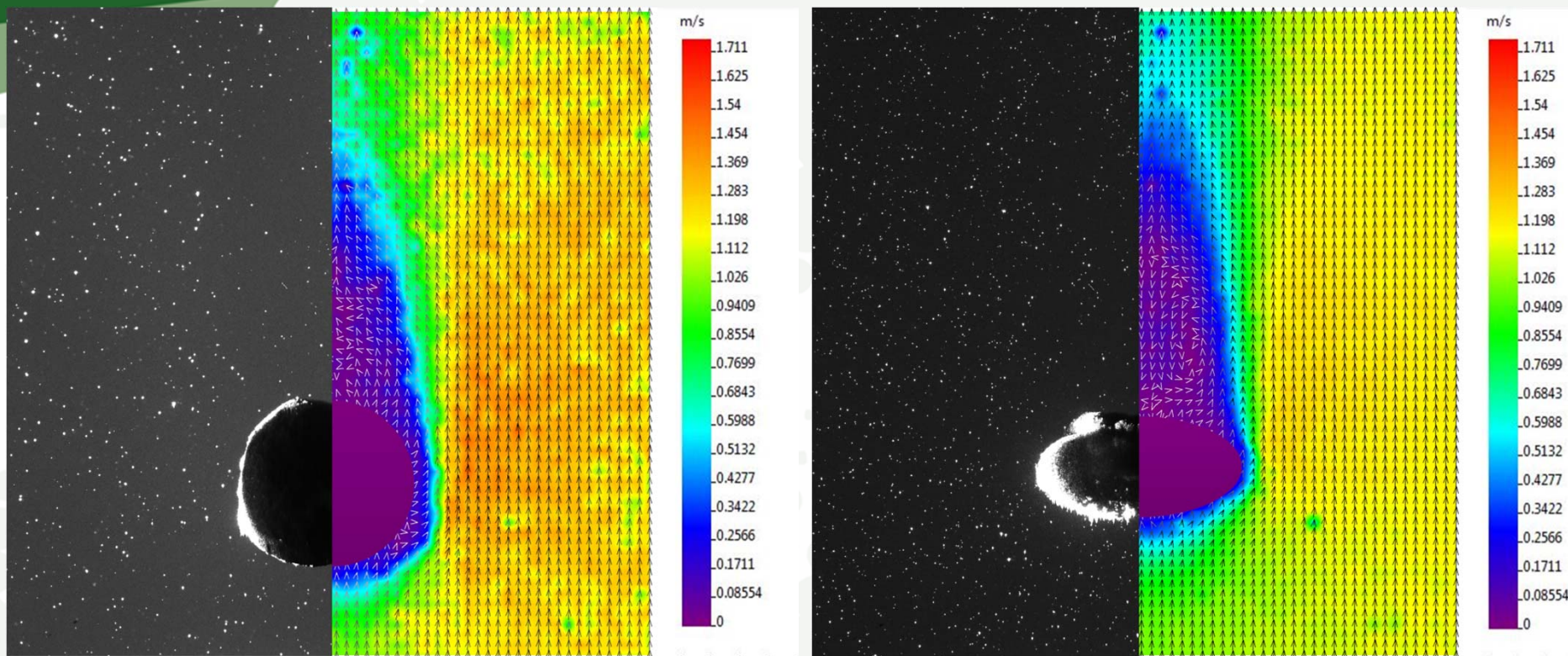
Видеограммы аэрозольного потока, генерируемого распылительной форсункой и соответствующие поля скорости, полученные с использованием PIV измерений





Видеограмма процесса и поле скоростей «трассеров» (а) при смешении полидисперсного капельного потока с газами, а также соответствующие продольные (б) и поперечные (в) профили скоростей газопарокапельного потока (1 – U_x при $L_x=0,04$ м; 2 – U_y при $L_x=0,04$ м; 3 – U_y при $L_y=0,02$ м; 4 – U_y при $L_y=0,05$ м; 5 – U_y при $L_y=0,07$ м)





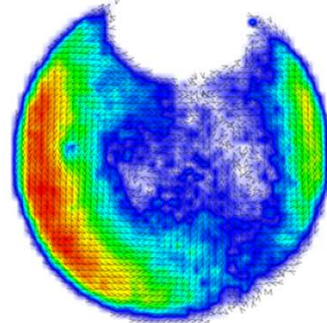
а

б

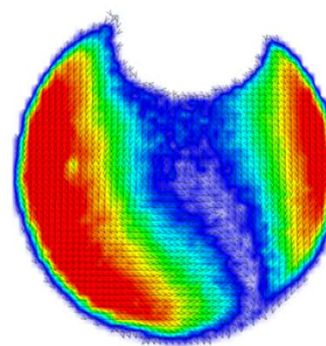
Видеограмма газового потока (слева) и соответствующее осредненное двухкомпонентное поле скорости «трассеров» (справа) при обтекании потоком частиц сферической (а) и эллипсоидальной (б) форм



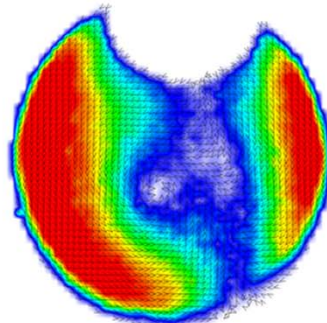
1 м/с



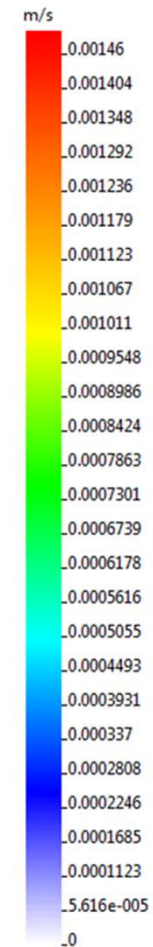
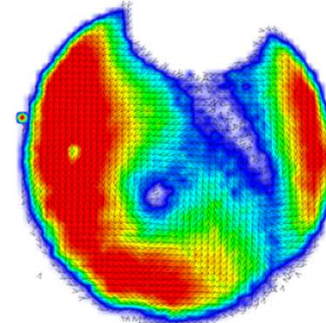
1,5 м/с



1,9 м/с



2,3 м/с



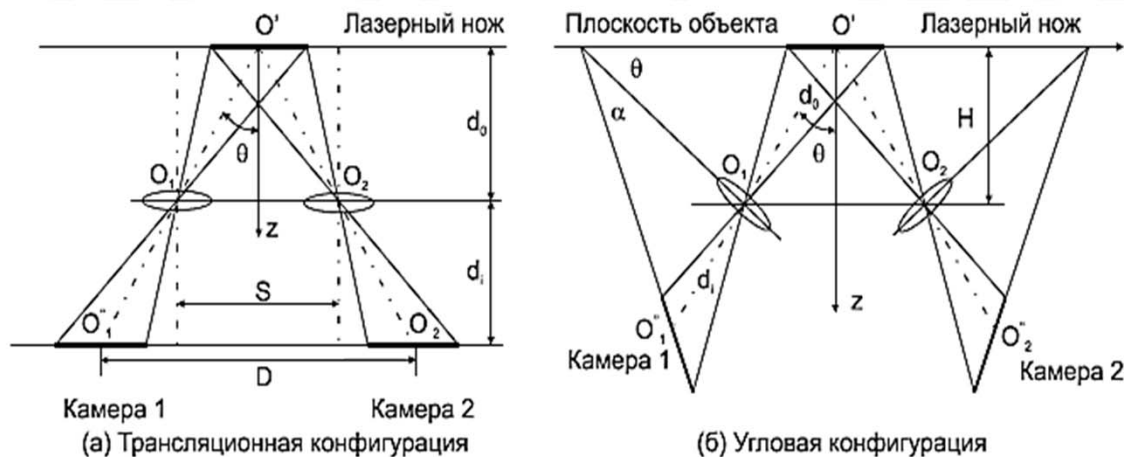
Поля скоростей внутри капли воды при воздействии на нее потока воздуха ($T_g \approx 310$ K)



STEREOSCOPIC PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (ЦИФРОВАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ)

Метод Stereo PIV является расширением метода PIV и позволяет измерять трехкомпонентные поля скорости в выбранном сечении потока.

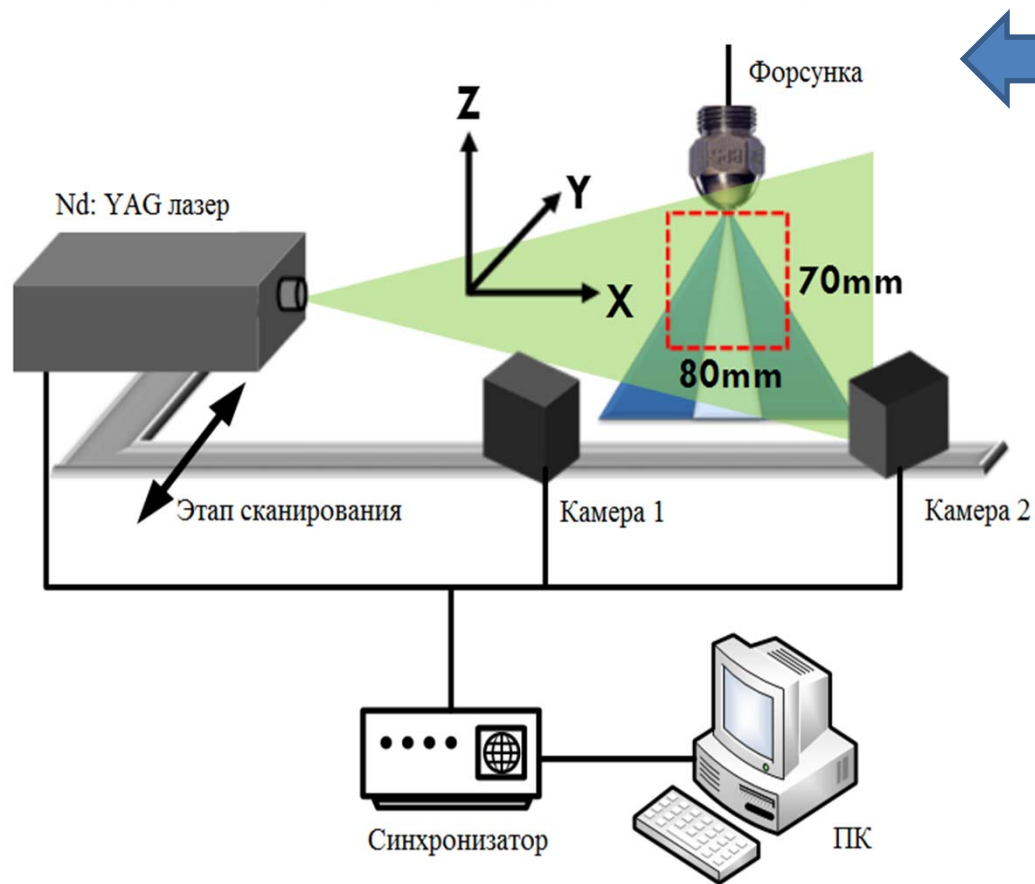
В Stereo PIV измерениях добавляется вторая камера для получения изображения области измерения под некоторым углом. Запись в этом случае производится двумя камерами, направленными на объект под разными углами. При этом каждая камера получает плоскую информацию об объекте измерения. Объединяя эту информацию от двух камер можно получить трехмерную информацию об интересующем нас объекте



Конфигурации стереоскопических измерений

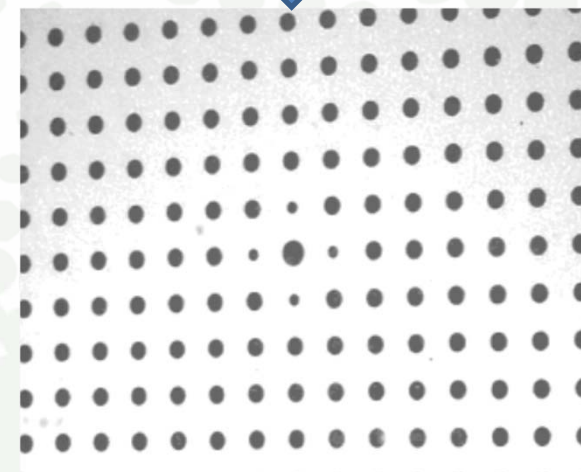


STEREOSCOPIC PARTICLE IMAGE VELOCITY (ЦИФРОВАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ)



← Схема из основных элементов метода Stereo PIV

Калибровочная мишень для сведения сигналов двух CCD видеокамер

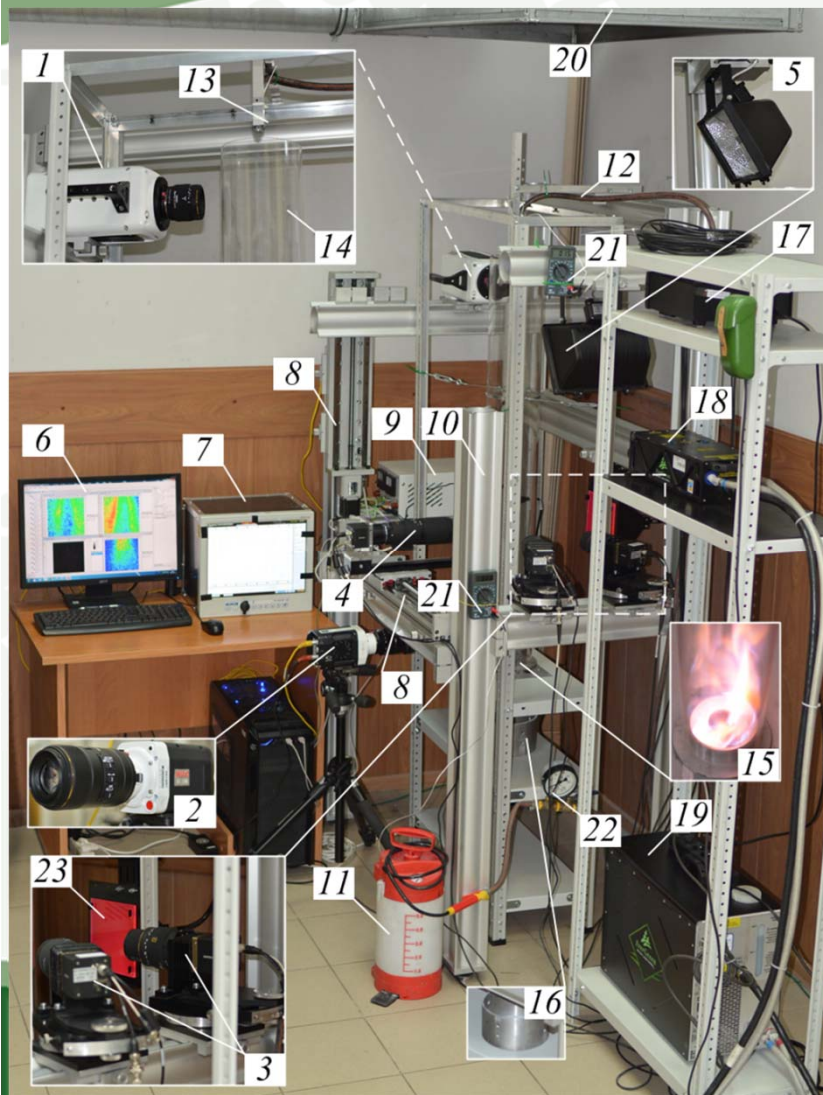




Средства измерения скорости

29

STEREOSCOPIC PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (ЦИФРОВАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ)



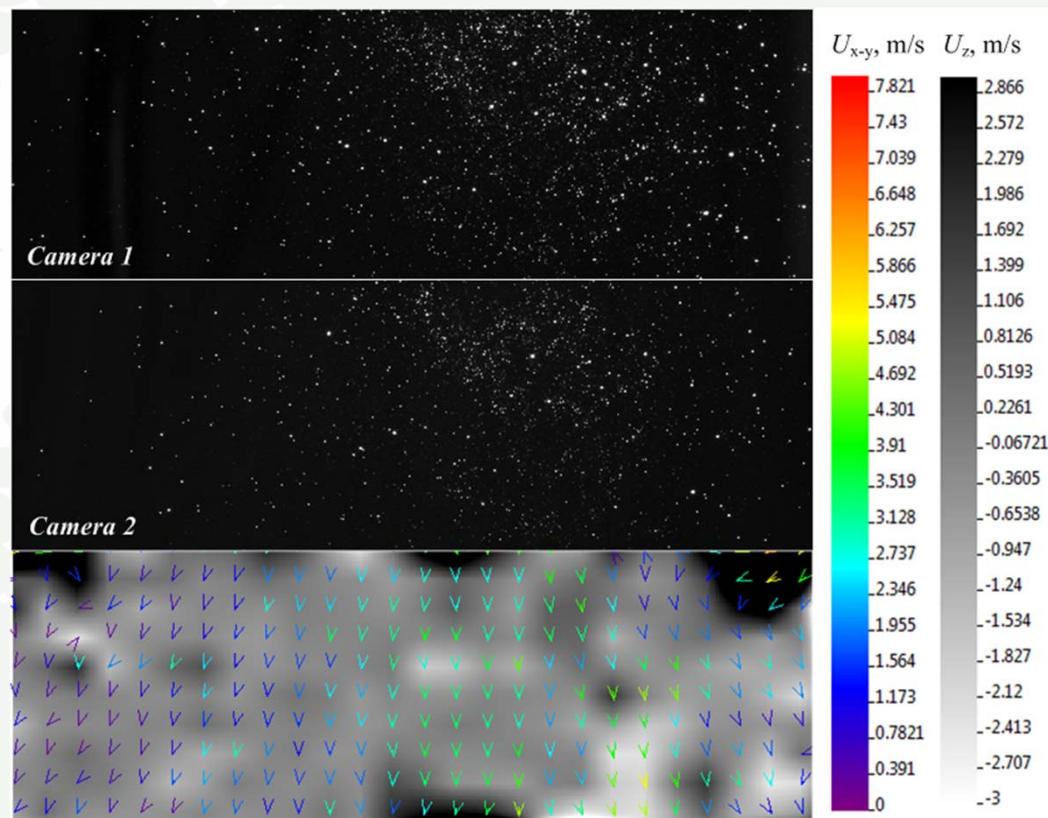
Пример экспериментального стенда для реализации Stereo PIV измерений:

- 1, 2 – высокоскоростные видеокамеры;
- 3, 4 – кросскорреляционные камеры;
- 5 – осветительный прожектор;
- 6 – персональный компьютер (ПК);
- 7 – регистратор многоканальный технологический (PMT);
- 8 – моторизированное координатное устройство (МКУ);
- 9 – блок питания МКУ;
- 10 – алюминиевый каркас;
- 11 – емкость с водой;
- 12 – канал подачи воды;
- 13 – распылительное устройство;
- 14 – цилиндр из кварцевого стекла;
- 15 – полый цилиндр с горючей жидкостью;
- 16 – уловитель капель;
- 17 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера;
- 18 – двойной твердотельный импульсный лазер;
- 19 – генератор лазерного излучения;
- 20 – нагнетательная система;
- 21 – цифровой мультиметр;
- 22 – манометр;
- 23 – диффузионный экран в комплекте со световодом



Средства измерения скорости

STEREOSCOPIC PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (ЦИФРОВАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ)



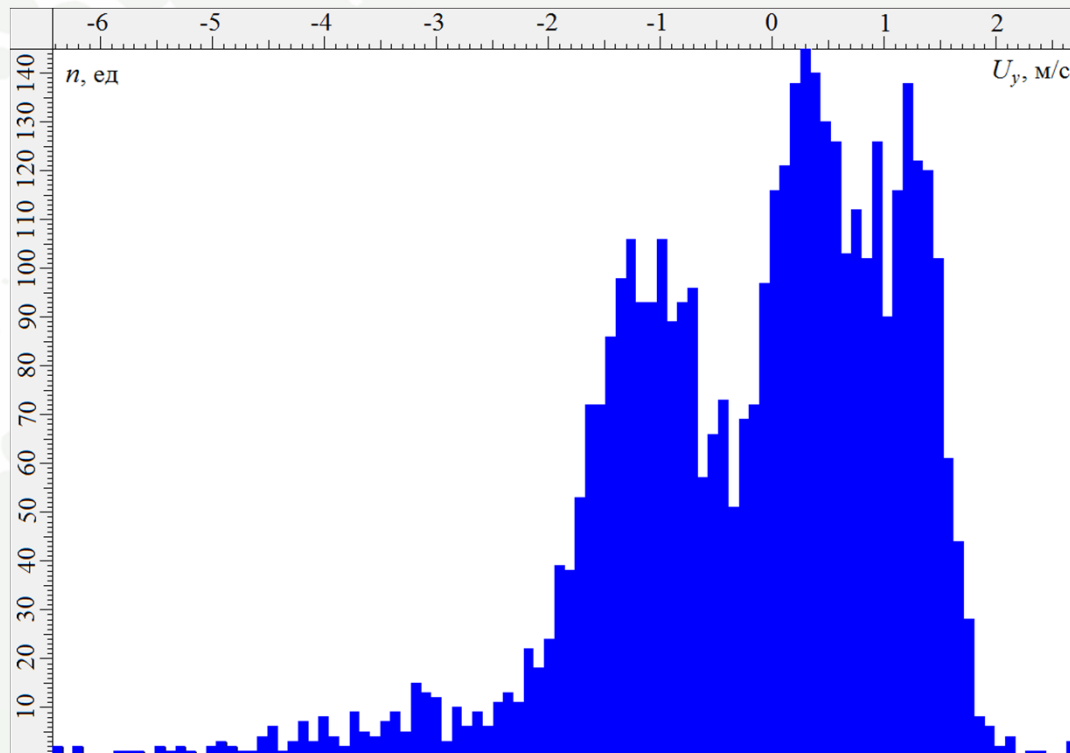
Кадры видеogramм CCD видеокамер и результат их обработки методом Stereo PIV (регулярное трехкомпонентное поле скоростей)





Средства измерения скорости

STEREOSCOPIC PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (ЦИФРОВАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ)



Гистограмма скоростей трассирующих частиц, полученная с использованием метода Stereo PIV (вертикальная составляющая скорости)



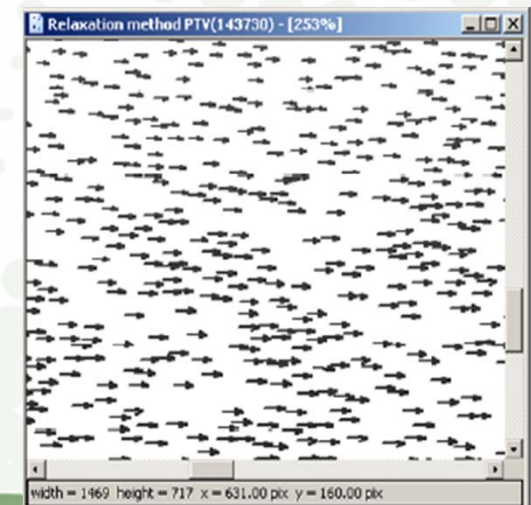
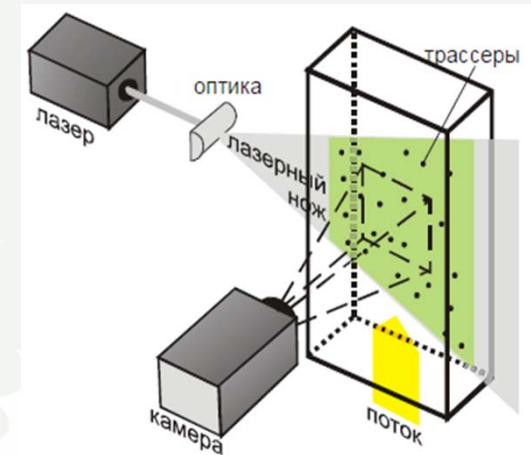
PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY (НЕРЕГУЛЯРНАЯ ЦИФРОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ)

Для измерения поля скорости с корреляционным подходом PIV используется методика слежения за каждой отдельно взятой частицей – PTV. Достоинством такого способа измерения поля скорости является большее пространственное разрешение, а также меньшая чувствительность к неравномерному засеvu потока частицами.

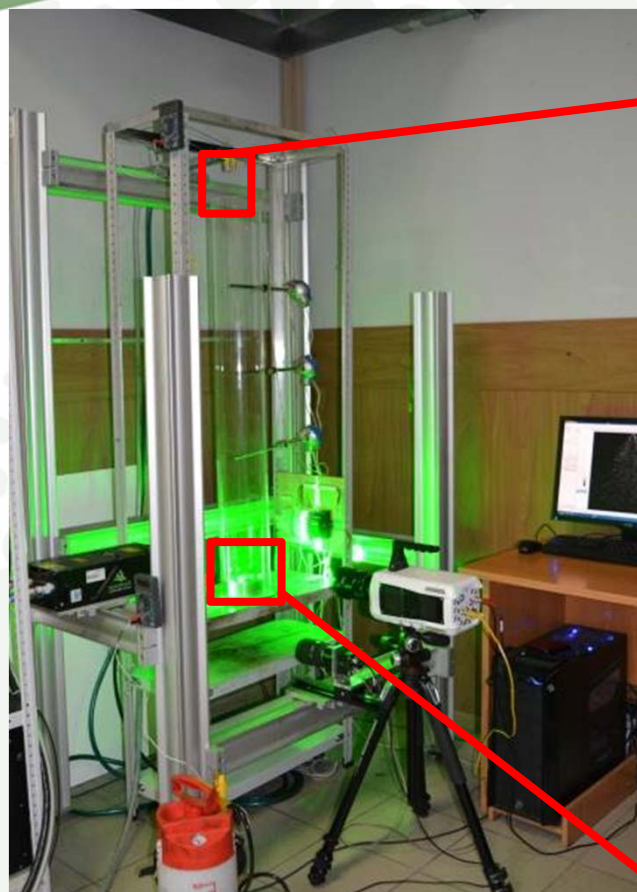
Результатом измерения PTV метода являются мгновенные двухкомпонентные поля скорости. В отличие от PIV метода вектор скорости измеряется по перемещениям отдельных трассеров в потоке. Измеренное векторное поле, как правило, имеет разрешение больше, чем в методе PIV, а векторная сетка является нерегулярной, с узлами в точках положения трассеров.

Область применения метода:

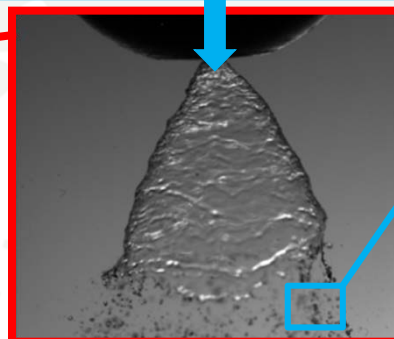
- однофазные потоки с малой или неравномерной концентрацией трассеров;
- двухфазные потоки (твердые частицы в газе);
- аэрозольные и пузырьковые потоки.



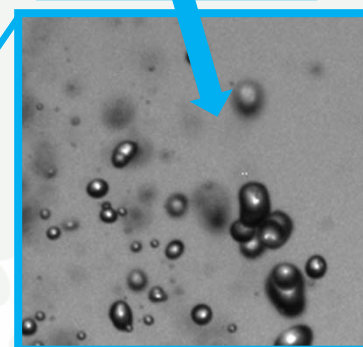
PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY (НЕРЕГУЛЯРНАЯ ЦИФРОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ)



Распылительная форсунка



Капли воды



Цилиндр из кварцевого стекла



Кварцевый цилиндр
(1 – до зажигания
горючей жидкости;
2 – в процессе горения
горючей жидкости)

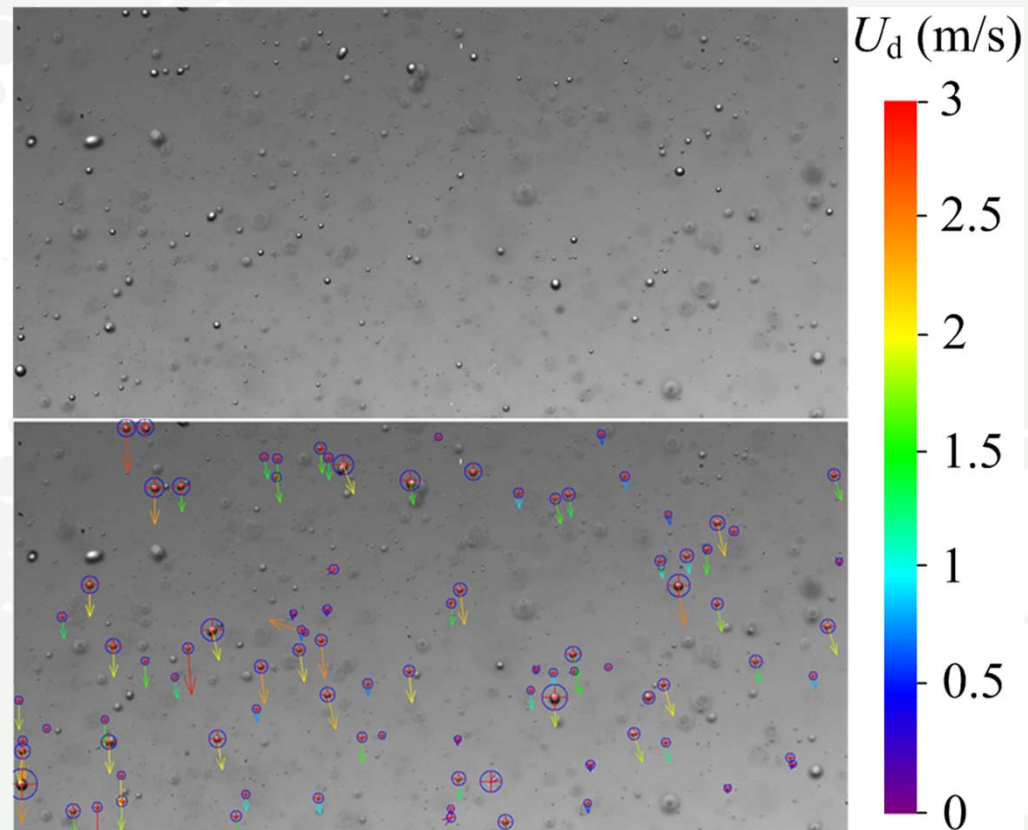
Полый цилиндр с
горючей жидкостью

Пламя и продукты
сгорания

Пример экспериментального
стенда для реализации PIV
измерений



PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY (НЕРЕГУЛЯРНАЯ ЦИФРОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ)



Нерегулярное поле скорости капель воды, полученное с использованием PTV метода





Спасибо за внимание!

