



Руководство пользователя

Программы «ActualFlow»

Версия 1.16



Новосибирск, 2007



Институт Теплофизики СО РАН
пр. акад. Лаврентьева, 1
Новосибирск 630090, Россия

Тел.: +7(383)335-66-84

Факс: +7(383)335-66-84

E-mail: piv@itp.nsc.ru

Сайт: <http://www.itp.nsc.ru/piv/>

© 2001-2008 Институт теплофизики СО РАН

Версия 1.16 – 1 декабря 2008

Краткое содержание

1.	Описание метода Particle Image Velocimetry (PIV)	11
1.1.	Принцип метода	11
1.2.	Обработка данных в методе PIV	13
1.3.	Погрешности и динамический диапазон	38
1.4.	Методика Stereo PIV	43
2.	Описание программного обеспечения ActualFlow.....	54
2.1.	Введение.....	54
2.2.	Установка.....	54
2.3.	Основные элементы	54
2.4.	Менеджер базы данных.....	61
2.5.	Проведение эксперимента	82
2.6.	Процедуры обработки изображений	90
2.7.	Отображение данных.....	140
2.8.	Окно свойств.....	157
3.	Список литературы	163

Содержание

1.	Описание метода Particle Image Velocimetry (PIV)	11
1.1.	Принцип метода	11
1.2.	Обработка данных в методе PIV	13
1.2.1.	Обработка изображений для получения поля скорости.....	13
1.2.1.1.	Наложение окон на расчетную область.....	15
1.2.1.2.	Частотная фильтрация корреляционной функции	17
1.2.1.3.	Поиск максимума на корреляционной плоскости, подпиксельная интерполяция, эффект Peak locking.....	18
1.2.2.	Итерационные алгоритмы расчета поля скорости	21
1.2.2.1.	Поправка к смещению нулевого порядка	23
1.2.2.1.1.	Одношаговый алгоритм с прямым расчетом корреляционной функции и различным размером исследуемой области и области поиска (Direct CC)	23
1.2.2.1.2.	Итерационный кросс-корреляционный алгоритм с целым смещением областей (DWS).....	23
1.2.2.1.3.	Итерационный кросс-корреляционный алгоритм с непрерывным смещением областей (CWS).....	24
1.2.2.2.	Поправка к смещению первого порядка	24
1.2.3.	Метод коррекции ошибок	28
1.2.4.	Методы отсева	29
1.2.4.1.	Отсев по отношению сигнал/шум.....	29
1.2.4.2.	Отсев по локальному среднему	30
1.2.4.3.	Отсев по локальному медианному значению	30
1.2.4.4.	Отсев по абсолютному значению скорости.....	31
1.2.4.5.	Отсев по статистической выборке (статистическая фильтрация)	31

1.2.5.	Методы интерполяции.....	32
1.2.6.	Статистическая обработка данных	34
1.2.7.	Расчет дифференциальных характеристик	34
1.2.8.	Статистическая обработка пространственных производных скорости.....	36
1.2.9.	Расчет пространственных спектров и двухточечных корреляций.....	37
1.3.	Погрешности и динамический диапазон	38
1.3.1.	Методы оценки погрешности измерений.....	39
1.3.2.	Практические рекомендации по проведению эксперимента	42
1.4.	Методика Stereo PIV	43
1.4.1.	Принцип метода	43
1.4.2.	Оптическая конфигурация в условии Шаймпфлюга (Sheimpflug condition)	45
1.4.3.	Калибровка камеры.....	46
1.4.4.	Геометрическая реконструкция 3-х компонентного поля скорости	49
1.4.5.	Реконструкция 3-х компонентного поля скорости на основе модели отображения	51
1.4.6.	Коррекция рассогласования плоскости калибровочной мишени и плоскости лазерного ножа	51
1.4.7.	Погрешность метода.....	53
2.	Описание программного обеспечения ActualFlow.....	54
2.1.	Введение.....	54
2.2.	Установка	54
2.2.1.	Установка алгоритмов	54
2.3.	Основные элементы	54
2.3.1.	База данных.....	54
2.3.2.	Менеджер эксперимента	55

2.3.3.	Обработка данных	55
2.3.4.	Визуализация данных.....	56
2.3.5.	Панель свойств	57
2.3.6.	Журнал событий и исключительных ситуаций.....	58
2.3.7.	Сохранение диагностического файла при аварийном завершении программы.....	60
2.4.	Менеджер базы данных.....	61
2.4.1.	Создание, открытие и удаление базы данных	61
2.4.2.	Резервное копирование базы	62
2.4.3.	Управление данными в базе.....	62
2.4.3.1.	Структура дерева данных	62
2.4.3.2.	Составление выборок данных.....	63
2.4.3.2.1.	Выделение узлов	63
2.4.3.2.2.	Сортировка выделенных узлов для обработки.....	64
2.4.3.2.3.	Группы выделения.....	65
2.4.3.3.	Удаление данных.....	67
2.4.3.4.	Просмотр данных.....	67
2.4.3.5.	Обработка данных	68
2.4.3.5.1.	Сохранение и загрузка цепочек обработки	70
2.4.4.	Копирование/вставка узлов базы	70
2.4.5.	Импорт/экспорт.....	71
2.4.5.1.	Импорт данных.....	71
2.4.5.2.	Экспорт данных.....	73
2.4.5.3.	Импорт изображений	74

2.4.5.4.	Экспорт изображений	76
2.4.5.5.	Импорт масок	77
2.4.5.6.	Экспорт анимации.....	79
2.4.5.7.	Импорт/экспорт эксперимента.....	80
2.4.6.	Восстановление базы данных	81
2.4.7.	Дефрагментация базы данных	82
2.5.	Проведение эксперимента	82
2.5.1.	Создание эксперимента	82
2.5.2.	Окно управления экспериментом	83
2.5.3.	Настройка параметров эксперимента.....	84
2.5.3.1.	Установка временных параметров эксперимента	84
2.5.3.2.	Установка параметров камеры.....	85
2.5.3.3.	Запуск системы по внешнему событию	86
2.5.3.4.	Однокадровый режим.....	86
2.5.4.	Проведение эксперимента	87
2.5.4.1.	Масштабный коэффициент.....	88
2.6.	Процедуры обработки изображений	90
2.6.1.	Корреляционные алгоритмы обработки изображений	90
2.6.1.1.	Стандартный кросскорреляционный метод	90
2.6.1.2.	Итерационный кросскорреляционный метод	94
2.6.1.2.1.	Поиск максимумов	99
2.6.1.2.2.	Подпиксельная интерполяция	99
2.6.1.2.3.	Оконные функции	99
2.6.1.2.4.	Частотная фильтрация корреляционных функций.....	100

2.6.1.2.5.	Коррекция ошибок на корреляционной плоскости.....	101
2.6.2.	Stereo PIV алгоритмы	102
2.6.2.1.	Калибровка камеры	102
2.6.2.2.	Расчет трехкомпонентного поля скорости.....	113
2.6.2.3.	Реконструкция изображения.....	117
2.6.2.4.	Реконструкция поля скорости.....	119
2.6.2.5.	Процедура коррекции рассогласования плоскости калибровочной мишени и измерительной плоскости.....	120
2.6.3.	Методы отсева векторов	125
2.6.3.1.	Отсев по отношению сигнал/шум.....	125
2.6.3.2.	Отсев по локальному среднему	125
2.6.3.3.	Отсев по локальному медианному значению	126
2.6.3.4.	Отсев по абсолютному значению скорости.....	127
2.6.4.	Интерполяция векторных полей.....	127
2.6.5.	Расчет полей производных	128
2.6.5.1.	Расчет поля завихренности	128
2.6.5.2.	Расчет пространственной корреляционной функции.....	129
2.6.5.3.	Расчет одномерной спектральной плотности.....	129
2.6.6.	Расчет статистических характеристик	130
2.6.6.1.	Расчет статистических моментов.....	130
2.6.6.2.	Расчет статистических моментов (быстрый метод).....	132
2.6.6.3.	Расчет корреляционных функций и одномерных спектров для турбулентных пульсаций скорости.....	132
2.6.6.4.	Расчет средней интенсивности и среднеквадратичного отклонения интенсивности для группы изображений.....	133

2.6.7.	Построение профилей.....	134
2.6.8.	Наложение масок.....	135
2.6.8.1.	Наложение маски на изображения.....	135
2.6.8.2.	Наложение маски на поле данных.....	136
2.6.9.	Арифметические операции над изображениями.....	137
2.6.10.	Фильтрация изображений.....	138
2.6.11.	Построение гистограмм по ансамблю полей данных.....	139
2.7.	Отображение данных.....	140
2.7.1.	Двумерные поля данных.....	140
2.7.1.1.	Окно визуализации полей.....	140
2.7.1.2.	Растровые изображения.....	142
2.7.1.3.	Векторные поля.....	143
2.7.1.4.	Скалярные поля.....	146
2.7.1.5.	Работа с палитрой.....	147
2.7.1.6.	Комбинации полей.....	148
2.7.2.	Гистограммы.....	149
2.7.3.	Графики.....	152
2.7.3.1.	Окно визуализации графиков.....	152
2.7.3.2.	Профили.....	153
2.7.4.	Таблицы данных.....	154
2.7.5.	Текстовые файлы.....	156
2.7.6.	Сохранение параметров визуализации.....	156
2.8.	Окно свойств.....	157
2.8.1.	Работа со свойствами одного узла.....	157

2.8.2. Работа со свойствами группы узлов	161
3. Список литературы	163

1. Описание метода Particle Image Velocimetry (PIV)

Метод цифровой трассерной визуализации 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. К подобным течениям можно отнести большую часть сдвиговых течений, включая струи, следы, слои смешения. Применение полевых методов дает возможность получения информации о динамике структур, их масштабов, расчета дифференциальных характеристик, пространственных и пространственно – временных корреляций, а также статистических характеристик потока.

Кроме того, методы цифровой трассерной визуализации являются в настоящее время востребованными и в практических приложениях – в авиастроительной индустрии, автомобилестроении (в промышленных аэродинамических трубах – диагностика полной картины обтекания элементов летательных аппаратов и автомобилей), энергетике, химической и нефтегазодобывающей промышленности, машиностроении (оперативная диагностика и оптимизация аэрогидродинамики в реальных аппаратах или их моделях), а также медицине, при физическом моделировании работы искусственных сосудов и клапанов.

Полевые измерения скорости, в основе которых лежит измерение перемещений взвешенных в потоке мелких частиц (трассеров), применяются уже в течение нескольких десятилетий [1, 5]. Применяемая ранее ручная обработка данных была чрезвычайно трудоемкой, и это не позволяло получать необходимое при решении физических задач количество и качество информации. За последние 15 лет прогресс в электронике, лазерной технике и регистрирующей видео-аппаратуре позволил на базе традиционных развить новые методы количественной визуализации потоков, позволяющие измерять мгновенные поля скорости с высоким пространственным разрешением, проводить измерения за доли секунды и автоматизировать процесс обработки.

1.1. Принцип метода

Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры). Размер, плотность и объемная концентрация частиц

подбираются таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц, были минимальны. Измерительной областью потока (см. Рис. 1-1) считается плоскость, «вырезаемая» световым ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены минимум дважды. Образы частиц регистрируются на фотографический или электронный носитель (цифровую камеру). Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей аппаратуры. Для измерения трех компонент скорости используют, как правило, два регистрирующих модуля, оптические оси которых ориентированы под определенным углом относительно друг друга.

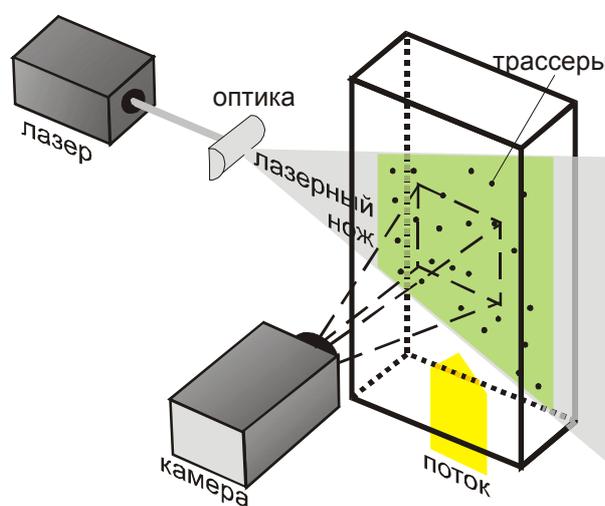


Рис. 1-1 Схема метода

В качестве источника излучения обычно используются твердотельные импульсные Nd:YAG лазеры. Такие лазеры имеют малую длительность импульса (~ 4–10 нсек) и достаточно высокую энергию в импульсе. Использование двух лазеров, работающих на одной оптической оси, позволяет получать короткую временную задержку между импульсами, что необходимо для исследования высокоскоростных потоков. Иногда для освещения частиц применяют непрерывные лазеры, сканирующие поток при помощи вращающихся призм и зеркал.

Основными преимуществами метода являются: бесконтактность; возможность измерения мгновенных распределений скорости; широкий диапазон измеряемых скоростей – от нуля до сверхзвуковых.

1.2. Обработка данных в методе PIV

1.2.1. Обработка изображений для получения поля скорости

Одним из основных элементов метода PIV является обработка полученных в эксперименте изображений. Различают несколько модификаций количественной стробоскопической визуализации в зависимости от концентрации частиц и, соответственно, методов обработки (Рис. 1-2). В качестве критерия обычно используется параметр N_I – «плотность образов частиц», определяемый как:

$$N_I = C \Delta z_0 \left(D_I / M_0 \right)^2,$$

где C – счетная концентрация трассеров, Δz_0 – толщина лазерного ножа, D_I – размер расчетной области, M_0 – коэффициент увеличения. При $N_I \ll 1$ применяются подходы, в основе которых лежит анализ перемещений каждой частицы (PTV – Particle Tracking Velocimetry), при $N_I \gg 10$ проводится анализ спекловых картин (LSV – Laser Speckle Velocimetry). Метод PIV, для которого $N_I \sim 10$, предполагает использование корреляционных алгоритмов обработки трассерных изображений, при которых все поле течения разбивается на элементарные измерительные области, для каждой из которых вычисляется корреляционная функция сдвигов частиц.

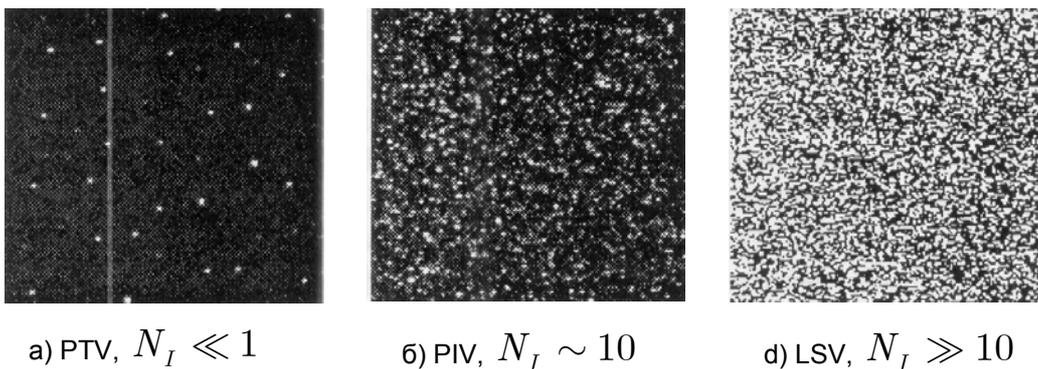


Рис. 1-2 Примеры изображений для различных видов количественной визуализации. а) Particle Tracking Velocimetry, б) Particle Image Velocimetry, с) Laser Speckle Velocimetry

Существуют два основных типа корреляционных алгоритмов: автокорреляционный, в этом случае на одном кадре записаны как начальные положения трассеров, так и

конечные; и кросскорреляционный, когда начальные и конечные положения трассеров фиксируются на разные кадры [24, 35]. Использование кросскорреляционных алгоритмов является предпочтительным, поскольку в автокорреляционных алгоритмах начальные и конечные положения трассеров равнозначны, и смещение определяется с точностью до знака. Для однозначного определения направления скорости в этом случае необходимо либо привлекать априорные знания о направлении потока, либо использовать дополнительные технические решения (разделение двух кадров по длине волны рассеиваемого излучения, многоимпульсные модификации с различными временными задержками и т.д.).

Кратко сущность кросскорреляционного подхода заключается в следующем. Имеются два изображения, на одном из которых зафиксированы частицы в момент первой вспышки, а на другом в момент второй вспышки лазера. Каждое изображение разбивается на элементарные области (расчетные области) размером $d_x \times d_y$ (см. Рис. 1-3). Интенсивность отраженного от частиц и зарегистрированного камерой света (степень серого) можно представить дискретной функцией двух переменных x и y : $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ для первого и второго кадра соответственно. Рассчитывается корреляционная функция:

$$\phi_{I_1 I_2}(m, n) = \sum_{l=-d_y/2}^{d_y/2} \sum_{k=-d_x/2}^{d_x/2} I_1(k, l) \cdot I_2(k + m, l + n).$$

Максимум корреляционной функции соответствует наиболее вероятному сдвигу частиц в данной области. При этом в идеальном случае предполагается, что скорость потока в элементарной области неизменна и все частицы делают одинаковое перемещение, т.е. у корреляционной функции существует один наиболее ярко выделенный максимум на фоне шума. Для более точного определения координат максимума используется подпиксельная интерполяция корреляционной функции в окрестности ее максимума. Интерполяция может проводиться независимо по обеим координатам, а интерполирующая функция может быть самой различной (например, полином второй степени или Гауссиан). Координатой максимума считается координата максимума интерполирующей функции.

Для расчета корреляционной функции используется стандартный алгоритм быстрого преобразования Фурье с применением корреляционной теоремы, в соответствии с которой:

$$\phi_{I_1 I_2} = \mathfrak{F}^{-1} \left[\mathfrak{F}[I_1] \cdot \mathfrak{F}^*[I_2] \right]$$

где \mathfrak{F} и \mathfrak{F}^{-1} – прямое и обратное преобразование Фурье соответственно. В алгоритмах быстрого Фурье преобразования размер элементарной области равен $2^n \times 2^n$, где $n = 2 \div 8$.

Зная временную задержку между вспышками лазера Δt и рассчитав наиболее вероятное перемещение частиц \bar{D} в данной элементарной области можно посчитать скорость:

$$V = S \cdot \bar{D} / \Delta t$$

где S - масштабный коэффициент для пересчета скорости в м/сек.

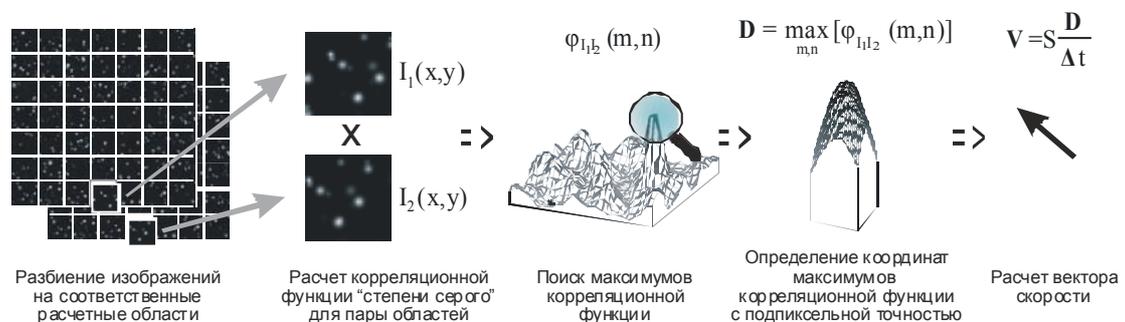


Рис. 1-3 Кросскорреляционный алгоритм вычисления вектора скорости по изображениям частиц в потоке

Подобная операция, произведенная для каждой элементарной области (см. Рис. 1-3), на которые разбито все поле течения, позволяет рассчитать мгновенное поле скорости. Обычно используется регулярное разбиение, с определенной степенью перекрытия ячеек. Здесь и везде по тексту мгновенное поле скорости означает поле скорости, осредненное за время между вспышками лазера, которое, как правило, на два или три порядка ниже минимальных характерных времен потока, соответствующих наиболее высокочастотным пульсациям.

1.2.1.1. Наложение окон на расчетную область

Для уменьшения эффектов конечности элементарного объема при Фурье преобразовании используется стандартная техника наложения окон. Окном здесь называется весовая функция, обычно обладающая центральной симметрией, значения которой умножаются на соответствующие элементы изображения внутри расчетной области. Кроме того, использование окон уменьшает вклад в корреляционную функцию частиц, которые лежат близко к границам области. Такие частицы с большой вероятностью не присутствуют в той же элементарной области на втором изображении

и, следовательно, вносят случайный вклад в корреляционную функцию. Это так называемый эффект «потери пары». Перечислим некоторые оконные функции:

Top-hat окно. Применение этого окна сводится к умножению интенсивностей в центре исследуемой области на 1, в то же время интенсивности вблизи края области умножаются на 0. Вид функции:

$$W(m, n) = \begin{cases} 1, & \text{если} \begin{cases} -k * \frac{M}{2} \leq m \leq k * \frac{M}{2} \\ -k * \frac{N}{2} \leq n \leq k * \frac{N}{2} \end{cases} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases},$$

где M, N – размер расчетной области, а m, n – координаты пикселей в ней. Поскольку интенсивность пикселей, находящихся за границей Top-hat окна, равна нулю, то вклад этих пикселей в корреляционную функцию также равен нулю. Использование данного окна можно рассматривать как метод снижения размеров области пространственного осреднения при расчете вектора скорости. Так при использовании данного окна можно получить эффективный размер элементарной расчетной области не кратный степени двойки. Например, если размер элементарной расчетной области равен 32x32 пикселя, и используется Top-hat окно с коэффициентом $k = 0.75$, то область осреднения в данном случае будет 24x24 пикселя.

Gaussian окно. Это окно можно применять вместо предыдущего. Оно эффективно уменьшает случайные корреляции, связанные с эффектом “потери пары” на границе области. Интенсивности элементов изображения в области берутся с весом, зависящим от радиального удаления их от центра. Вид функции:

$$W(m, n) = \exp\left[-\left[1/k\right]^2 \left[\left(2m/M\right)^2 + \left(2n/N\right)^2\right]\right].$$

Это окно, также как и предыдущее, уменьшает эффективный размер расчетной области. В Таблица 1-1 представлены значения эффективного размера расчетной области (окна), по отношению к исходному размеру расчетной области.

К	1/k ²	Ширина окна
1.19	0.7	85%
1,00	1,0	71%
0,82	1,5	58%
0,71	2,0	50%

Таблица 1-1 Эффективный размер расчетной области для различных k

1.2.1.2. Частотная фильтрация корреляционной функции

Помимо оконных функций в процессе корреляционной обработки изображения можно использовать фильтрацию корреляционной функции в частотной области, непосредственно перед определением пиков и подпиксельной интерполяцией. Также как и оконные функции, фильтры реализованы в виде весовых функций, но применяются перед обратным Фурье-преобразованием. Фильтрация применяется в тех случаях, когда на изображениях есть неподвижные объекты (фильтр No-DC), а также в случаях, когда ширина сигнальных пиков мала (менее трех пикселей) и подпиксельная интерполяция не может быть корректно проведена. В последнем случае применение фильтров позволяет увеличить ширину пиков, не изменяя при этом положение их максимумов.

Для того чтобы пояснить принцип работы фильтров необходимо заметить, что узкие пики на корреляционной плоскости соответствуют высоким частотам. И наоборот, широким пикам соответствуют значения вблизи начала координат. Постоянная составляющая сигнала будет находиться в начале координат, а ее Фурье-коэффициент будет иметь координаты (0, 0). Перечислим частотные фильтры:

No-DC фильтр удаляет постоянную компоненту в сигнале, что является необходимым при обработке изображений, на которых присутствуют неподвижные элементы (преграды, сопла, обтекаемые объекты и т.д.). Вид фильтра:

$$W(u, v) = \begin{cases} 0, & \text{если } (u, v) = (0, 0) \\ 1, & \text{иначе} \end{cases},$$

здесь и далее по тексту U, V - размер частотной области, u, v - координаты пространственных частот.

Low-pass фильтр. Этот фильтр отсекает небольшую часть низких частот и эффективно удаляет высокие частоты из спектра корреляционной функции. Вид фильтра:

$$W(u, v) = \begin{cases} 0, & \text{если } (u, v) = (0, 0) \\ \exp(-k^2(u^2 + v^2)/UV), & \text{иначе} \end{cases}.$$

Данный фильтр используется для увеличения ширины корреляционных пиков в тех случаях, когда пики узкие и не могут быть точно интерполированы полиномом второй степени. Фильтр не меняет координат максимума корреляционной функции, увеличивая лишь его ширину.

Band-pass фильтр. Данный фильтр имеет трапецеидальную форму в частотной области и выделяет полосу средних частот, оставляя ее неизменной, вместе с тем полностью удаляет высокие и низкие частоты. Вид фильтра:

$$W(u,v) = \begin{cases} 4r, & \text{если } r \leq 1/4 \\ 1, & \text{если } 1/4 < r \leq 3/4 \\ 4-4r, & \text{если } 3/4 < r \leq 1 \\ 0, & \text{если } r < 1 \end{cases}, \text{ где } r = \sqrt{(2u/U)^2 + (2v/V)^2}.$$

Вместо последовательного использования двух предыдущих фильтров можно использовать Band-pass filter, поскольку он с одной стороны убирает постоянную составляющую сигнала (аналогично No-DC фильтру), а с другой стороны отсекает высокие частоты (аналогично Low-Pass фильтру).

Фильтрация Фурье-образа корреляционной функции направлена на улучшение качества обработки. Тип фильтра и его параметры различны для каждого эксперимента, а их выбор зависит от характеристик корреляционных функций, получаемых при обработке данных.

1.2.1.3. Поиск максимума на корреляционной плоскости, подпиксельная интерполяция, эффект Peak locking

Каждый пик на корреляционной плоскости, соответствует возможному смещению частиц в области. Во-первых, дадим определение локального максимума. Локальным максимумом на корреляционной плоскости будем называть элемент, удовлетворяющий следующему критерию:

	X _{m-1}	X _m	X _{m+1}
Y _{m+1}	>	>	>
Y _m	>	MAX	>=
Y _{m-1}	>=	>=	>=

В результате дискретного представления изображения максимальный пик, найденный на корреляционной плоскости, будет иметь целые координаты. В большинстве случаев такой точности определения смещения недостаточно. Если корреляционный пик покрывает более одного пикселя, смещение может быть определено с подпиксельной точностью при помощи интерполяции. На Рис. 1-4 изображена форма пика для диаметра трассера 1.6 pix и различной величины дробного смещения [30].

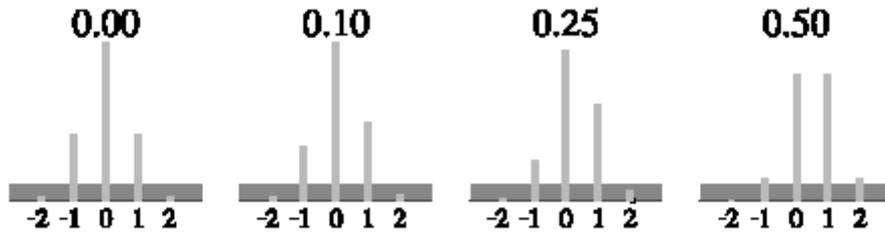


Рис. 1-4 Форма корреляционного пика для различной величины дробного смещения. Темным цветом показан уровень шума.

Сильнее всего эффект подпиксельного смещения проявляется в значениях корреляционной функции прилегающих к максимуму. Только непосредственные соседи максимального значения превышают уровень шума. Поэтому для интерполяции пользуются трехточечными оценками.

Как правило, для интерполяции используют один из трех приведенных способов:

1. Центрирование пика.

$$f(x) = \frac{EX}{EX^2}, \text{ где координаты максимума:}$$

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(i-1) * R(i-1, j) + i * R(i, j) + (i+1) * R(i+1, j)}{R(i-1, j) + R(i, j) + R(i+1, j)} \\ y_0 = \frac{(j-1) * R(i, j-1) + j * R(i, j) + (j+1) * R(i, j+1)}{R(i, j-1) + R(i, j) + R(i, j+1)} \end{cases}$$

2. Интерполяция параболой.

$$f(x) = A * x^2 + B * x + C, \text{ где координаты максимума:}$$

$$\begin{cases} x_0 = i + \frac{R(i-1, j) - R(i+1, j)}{2 * R(i-1, j) - 4 * R(i, j) + 2 * R(i+1, j)} \\ y_0 = j + \frac{R(i, j-1) - R(i, j+1)}{2 * R(i, j-1) - 4 * R(i, j) + 2 * R(i, j+1)} \end{cases}$$

3. Интерполяция кривой Гаусса.

$$f(x) = C * \exp\left(-\frac{(x_0 - x)^2}{\pi}\right), \text{ где координаты максимума:}$$

$$\begin{cases} x_0 = i + \frac{\ln R(i-1, j) - \ln R(i+1, j)}{2 * \ln R(i-1, j) - 4 * \ln R(i, j) + 2 * \ln R(i+1, j)} \\ y_0 = j + \frac{\ln R(i, j-1) - \ln R(i, j+1)}{2 * \ln R(i, j-1) - 4 * \ln R(i, j) + 2 * \ln R(i, j+1)} \end{cases}$$

где $R(i,j)$ – значение корреляционной функции в точке с целочисленными координатами (i,j) .

Сравнение данных методов подпиксельной интерполяции, приведенное в работе [30], дает следующие результаты (см. Рис. 1-5).

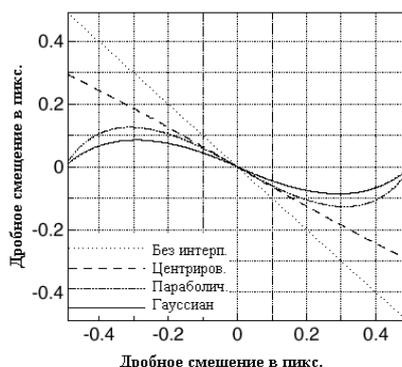


Рис. 1-5 Сравнение ошибки для различных методов интерполяции

Можно заметить, что наибольшую ошибку дает центрирование пика. Самые лучшие результаты показывает интерполяция кривой Гаусса.

В результате применения подпиксельной интерполяции не удастся полностью отстраниться от дискретного представления изображения. Возникает нежелательный эффект, названный *peak locking effect*, который можно увидеть, построив гистограмму распределения скоростей (см. Рис. 1-6). Здесь вектора со значениями компонент скорости, близкими к целому значению, встречаются чаще. Наличие эффекта *peak locking* зависит от типа подпиксельной интерполяции максимумов корреляционной функции и типа корреляционного алгоритма, использованного для получения поля скорости. Данный, нежелательный эффект можно несколько уменьшить, например, при использовании подпиксельной интерполяции кривой Гаусса или при использовании итерационного алгоритма с непрерывным смещением областей (см. главу 1.2.2).

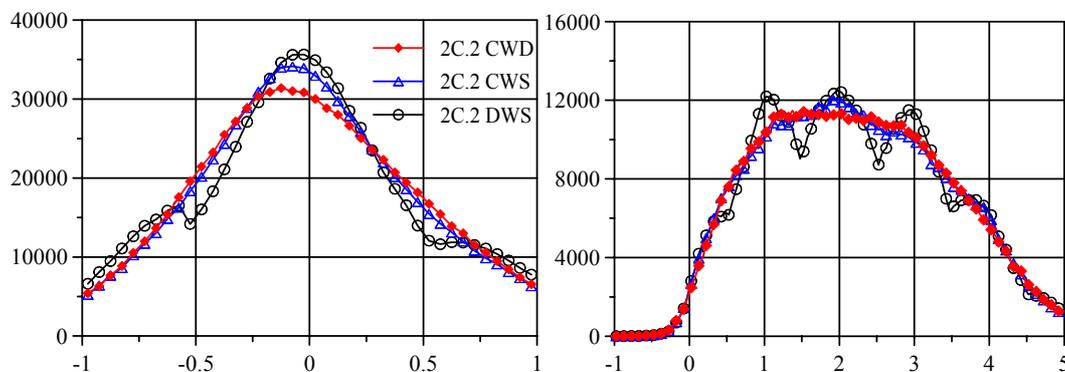


Рис. 1-6 Распределения радиальной (слева) и осевой (справа) компонент скорости в эксперименте со свободной струей, рассчитанные разными алгоритмами: Discrete Window Shift (DWS), Continuous Window Shift (CWS), Continuous Window Shift with an image Deformation (CWD). Демонстрируют эффект *peak-locking*

1.2.2. Итерационные алгоритмы расчета поля скорости

Для повышения точности расчета векторов скорости и увеличения динамического диапазона в современных PIV системах используют адаптивные подходы расчета поля скорости, которые по своей сути являются итерационными методами с компенсацией смещения частиц.

Основная идея итерационных методов состоит в том, чтобы провести обработку одной и той же области несколько раз, при этом используя результат предыдущей итерации в качестве оценки для параметров обработки на следующей итерации. Таким образом, можно добиться сходимости результатов обработки и получить некоторое увеличение точности получаемых данных. При расчете корреляционной функции используются элементарные области, смещенные на вектор, посчитанный на предыдущей итерации. При этом на каждой итерации проводится отсев ошибочных векторов, их интерполяция, а также возможно переразбиение изображения на расчетные области меньшего размера. Целью смещения окон является желание добиться максимального совпадения между ними. Смещение расчетных областей позволяет существенно уменьшить эффект «потери пары» за счет лучшего совпадения трассерных картин и тем самым повысить отношение сигнал/шум. Кроме того, высокая степень «совпадения» частиц на изображениях позволяет (при достаточной концентрации частиц) уменьшить размеры конечной элементарной области, повысив тем самым разрешающую способность метода без ущерба для качества получаемых данных. Главным недостатком алгоритма является увеличенное время обработки по сравнению со стандартными методами. Основы адаптивных алгоритмов можно найти в [25,27].

Начало итерации. Используя стандартный корреляционный алгоритм, вычисляется векторное поле поправок к смещениям частиц. Корреляционная функция рассчитывается для областей $I_1(x - \Delta x/2, y - \Delta y/2)$ и $I_2(x + \Delta x/2, y + \Delta y/2)$, смещенных на вектор $\bar{D}(\Delta x, \Delta y)$, посчитанный на предыдущей итерации. На первой итерации $\bar{D} = 0$. При этом проверяется, чтобы величина поправки не превышала величины вектора, рассчитанного на предыдущей итерации. В случае нарушения этого условия вектор остается неизменным. При расчете векторов могут применяться любые, из числа описанных в главах 1.2.1.1 и 1.2.1.2 окна и фильтры, а также метод коррекции ошибок (Глава 1.2.3, [11]). Если данная итерация последняя, расчет векторного поля на этом заканчивается. Иначе производится отсев ошибочных векторов и их интерполяция. Следует отметить, что интерполяция не проводится на последней итерации. Таким образом, в результате обработки получают неинтерполированные и

неусредненные данные. Далее используется компенсация смещения частиц. При этом для методов со смещением областей вычисляются компенсирующие сдвиги областей на первом и втором кадре изображения, а для методов с реконструкцией изображения строится новая пара изображений. После компенсации следует перестройка сетки. При этом количество ячеек сетки увеличивается вдвое в направлении x и y соответственно. Значение вектора, построенного на предыдущей итерации, транслируется на четыре ячейки сетки, соответствующих данной области до переразбиения сетки (Рис. 1-7). Таким образом, получается оценочное векторное поле для следующей итерации. **Конец итерации.**

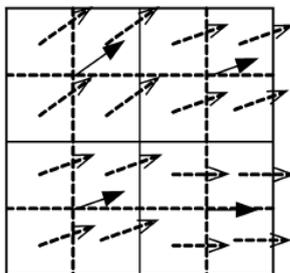


Рис. 1-7 Перестройка сетки. Сплошные вектора – посчитанные на текущей итерации. Пунктирные вектора – оценочные значения смещения областей для следующей итерации

Данная процедура проделывается K раз (здесь K – количество итераций). Как правило, сходимость адаптивных методов является достаточно быстрой ($K = 3-5$). При этом переразбиение сетки может проводиться не на каждой итерации («пустые» итерации). Размер области на этих итерациях не изменяется. Таких шагов без переразбиения сетки может быть несколько. Они служат для улучшения сходимости результатов, но при этом требуют дополнительных вычислительных затрат. В идеале концом обработки можно считать момент полного совпадения первого и второго кадра пары изображений. В действительности полного совпадения добиться не удастся в связи:

- с локальными градиентами смещения (необходима подходящая компенсация градиентов);
- с наличием 3-ей компоненты скорости;
- с различием в освещенности изображений.

Наиболее важным элементом итерационного алгоритма является компенсация смещения частиц на изображении. Она проводится на всех промежуточных итерациях. Компенсация смещения позволяет построить поправку к текущему приближению векторного поля. В общем случае скорость в точке можно разложить в ряд Тейлора:

$$\mathbf{v}(x, y) = \mathbf{v}(x_0, y_0) + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} \Big|_{(x_0, y_0)} (x - x_0) + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} \Big|_{(x_0, y_0)} (y - y_0) + \dots + \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x^2} \Big|_{(x_0, y_0)} (x - x_0)^2 + \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x \partial y} \Big|_{(x_0, y_0)} (x - x_0)(y - y_0) + \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial y^2} \Big|_{(x_0, y_0)} (y - y_0)^2 \right] + \dots + o(x - x_0)^3$$

Точность расчета скорости зависит от порядка точности, с которым вычисляется компенсация смещений областей. Различные порядки точности при расчете компенсаций продемонстрированы схематически на Рис. 1-8.

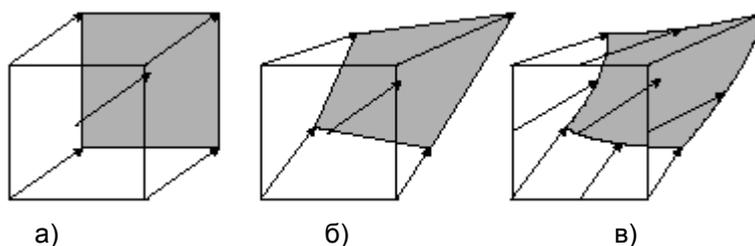


Рис. 1-8 Компенсация смещения частиц. а) – нулевой порядок точности (без учета локальных градиентов); б) – первый порядок точности (линейный учет локальных градиентов); в) – второй (и выше) порядок точности

Перечислим здесь некоторые методы компенсации смещения частиц на изображении.

1.2.2.1. Поправка к смещению нулевого порядка

Основная идея, представляемых ниже методов, состоит в построении новой пары изображений, на которой скомпенсированы смещения частиц, вычисленные на предыдущей итерации. На каждой последующей итерации новая пара изображений всегда строится по исходной паре, полученной в эксперименте.

1.2.2.1.1. Одношаговый алгоритм с прямым расчетом корреляционной функции и различным размером исследуемой области и области поиска (Direct CC)

Данный метод подробно описан и протестирован в работах [32, 16, 6]. Метод использует увеличенный размер одной из расчетных областей (область поиска), что частично уменьшает эффект “потери пары” при движении частиц в плоскости лазерного ножа. Достоинством данного метода является простота реализации, надежность и низкие вычислительные затраты.

1.2.2.1.2. Итерационный кросс-корреляционный алгоритм с целым смещением областей (DWS)

Целью смещения расчетных областей [25] является желание добиться максимального совпадения между ними. Данный метод состоит из нескольких итераций. На первой итерации стандартным корреляционным алгоритмом вычисляется предварительное поле смещений. На основе этого предсказания делается относительное смещение расчетных областей на вектор с целочисленным значением компонент $\overset{\circ}{\Delta}x$, $\overset{\circ}{\Delta}y$ (здесь значок « \circ » означает округление до целого). Существует два типа смещения. Первый – смещение расчетной области второго изображения на вектор $(\overset{\circ}{\Delta}x, \overset{\circ}{\Delta}y)$ (прямое смещение). Второй – симметричное смещение расчетных областей первого и второго изображения относительно начального положения области. Значения смещений в данном случае равны $(\overset{\circ}{\Delta}x/2, \overset{\circ}{\Delta}y/2)$, и $(-\overset{\circ}{\Delta}x/2, -\overset{\circ}{\Delta}y/2)$ соответственно для первого и второго изображения. Нужно отметить, что применение симметричного смещения [26] (см. Рис. 1-9), предпочтительно, по сравнению со смещением одной области.

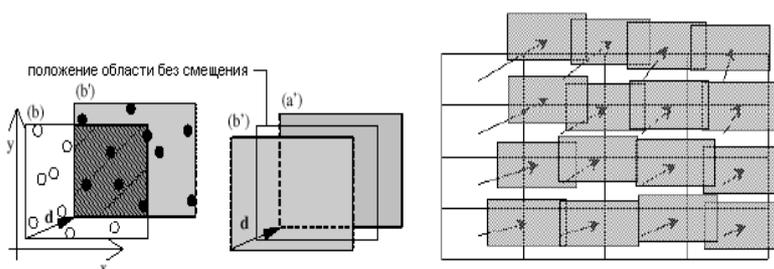


Рис. 1-9 Прямое и симметричное смещение областей [26]

1.2.2.1.3. Итерационный кросс-корреляционный алгоритм с непрерывным смещением областей (CWS)

Отличие данного метода [26] от предыдущего состоит в том, что значения компонент вектора смещения не округляются до целочисленных значений. При этом необходим пересчет интенсивности в точки с вещественными координатами. Такой пересчет требует применения процедур интерполяции интенсивности. Используемые схемы интерполяции изображения: билинейная, бикубическая, симплекс интерполяция, интерполяция B-сплайнами, sinc интерполяция, теорема Фурье сдвига и метод наименьших квадратов. Оценка точности метода на искусственных изображениях, показывает улучшение точности вычисления смещения до значений порядка 10^{-2} пикс.

1.2.2.2. Поправка к смещению первого порядка

В работе [14] был предложен новый подход к обработке PIV изображений, названный Pattern image distortion (PID) - метод коррекции деформации шаблона частиц. Пример

шаблона – тройка расположенных рядом частиц, образующих произвольный треугольник, как показано на Рис. 1-10.

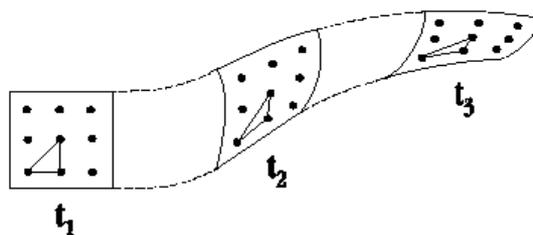


Рис. 1-10 Деформация шаблона частиц

Таким образом, для данного примера деформацией шаблона будет деформация треугольника, при изменении положения частиц в пространстве.

Основные причины деформации:

- шум на изображении (появляется при записи изображения);
- турбулентность в потоке (случайные движения частиц);
- выход частиц из плоскости и выход частиц за границы области;
- эффект градиента скорости $\frac{\partial v}{\partial x}$.

Все вышперечисленные деформации уменьшают корреляции между областями, соответствующими начальному и конечному изображениям. Чтобы увеличить совпадение между шаблонами частиц первого и второго кадра необходимо использовать методы, которые позволяют компенсировать деформации этих шаблонов. В общем случае движение потока можно разложить следующим образом:

Движение потока = Сдвиг + Растяжение + Поворот

«Сдвиг» – это то, что измеряется. «Растяжение» и «Поворот» - нежелательные эффекты деформации, от которых нужно избавиться. Для этого используется линейное преобразование области согласно градиентам скорости на ее границе (Рис. 1-11).

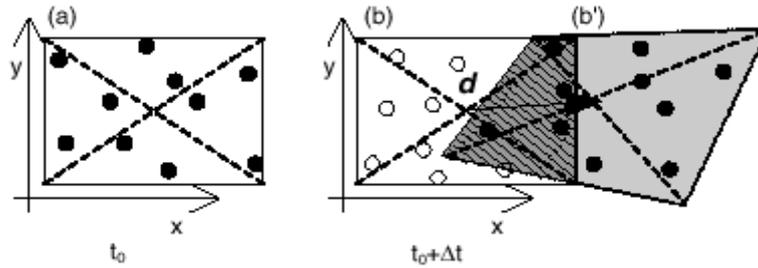


Рис. 1-11 Схема деформации изображения. Частицы следуют среднему смещению и локальному градиенту смещения

В данном методе используется предположение о том, что градиент скорости внутри расчетной области является постоянным.

Еще один метод коррекции первого порядка точности представлен в работе [26], названный window deformation iterative multigrid (WIDIM) – метод деформации области с поэтапным улучшением разрешения. Два улучшения было добавлено в метод PID. Во-первых, вместо билинейной интерполяции изображения была использована Sinc интерполяция с реконструкцией Whittaker-a [23]. Во-вторых, было продемонстрировано, что метод PID может успешно использоваться вместе с техникой последовательного уменьшения размера области, достигая при этом высокого конечного разрешения. Метод был также протестирован на искусственных изображениях. Ошибка измерения составила 0.01 pix.

Адаптивный кросскорреляционный алгоритм CWD (Continuous Window Shift with an image Deformation) [7] был создан на основе метода WIDIM. В нем используется деформация элементарной расчетной области для учета градиента скорости внутри области. Интенсивность «деформированного» изображения вычисляется следующим образом:

$$I_{def}(x, y) = I_{org}(x_s, y_s) = I_{org}\left(x_0 - \frac{u(x, y)}{2}, y_0 - \frac{v(x, y)}{2}\right)$$

$$\mathbf{v}(x, y) = \mathbf{v}(x_0, y_0) + \left.\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x}\right|_{(x_0, y_0)} (x - x_0) + \left.\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y}\right|_{(x_0, y_0)} (y - y_0)$$

где x, y - координаты элемента реконструированного (деформированного) изображения I_{def} , x_s, y_s - его координаты на исходном изображении I_{org} и x_0, y_0 - координаты центра расчетной области. Градиент скорости в центре расчетной области определяется по векторам, расположенным в прилегающих областях.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u(x_0 + 1, y_0) - u(x_0 - 1, y_0)}{2w}, \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u(x_0, y_0 + 1) - u(x_0, y_0 - 1)}{2h},$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{v(x_0 + 1, y_0) - v(x_0 - 1, y_0)}{2w}, \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{v(x_0, y_0 + 1) - v(x_0, y_0 - 1)}{2h},$$

Здесь w и h - линейные размеры ячейки. Для областей расположенных на границе изображения градиенты рассчитываются, используя значения компонент вектора в 3-х соседних узлах:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{-3u(x_0, y_0) + 4u(x_0 + 1, y_0) - u(x_0 + 2, y_0)}{2w},$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{-3u(x_0, y_0) + 4u(x_0, y_0 + 1) - u(x_0, y_0 + 2)}{2h},$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{-3v(x_0, y_0) + 4v(x_0 + 1, y_0) - v(x_0 + 2, y_0)}{2w},$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{-3v(x_0, y_0) + 4v(x_0, y_0 + 1) - v(x_0, y_0 + 2)}{2h},$$

Процесс получения интенсивности элемента реконструированного изображения выглядит следующим образом:

- Для заданного положения элемента изображения внутри области на реконструированном изображении находим его положение на исходном изображении с учетом входного вектора-оценки смещения и градиента внутри текущей области по формуле выше. После пересчета координаты элемента изображения (x_s, y_s) , интенсивность которого мы хотим определить, становятся вещественными;
- Далее для определения интенсивности элемента в точке с вещественными координатами применяется один из видов интерполяции изображения, например, билинейная интерполяция:

$$\begin{cases} x_s = i + dx \\ y_s = j + dy \end{cases}, (dx, dy) \in R[0, 1]; (i, j) \in N;$$

$$I_{org}(x_s, y_s) = I_{org}(i, j)(1 - dx)(1 - dy) + I_{org}(i + 1, j)dx(1 - dy) +$$

$$I_{org}(i, j + 1)(1 - dx)dy + I_{org}(i + 1, j + 1)dxdy$$

С помощью данного метода удается добиться существенного расширения динамического диапазона определения завихренности по сравнению с традиционными методами. Максимальный измеряемый градиент скорости, заявленный авторами,

составил 55.3сек^{-1} (1.1pix/pix). Для сравнения, в работе [35] для стандартного кросс-корреляционного алгоритма эта величина составила 15сек^{-1} (0.5pix/pix).

1.2.3. Метод коррекции ошибок

Для выявления и исправления ошибочных векторов используют процедуры коррекции ошибок. Выделяют два вида коррекции ошибок. Первый метод заключается в отсеивании векторов (1.2.4), не удовлетворяющих определенным критериям, и замещении их интерполированными (1.2.5). Интерполяция происходит по соседним векторам, которые прошли отбор. Это - так называемый «post-interrogation» метод, когда на выходе получаются не точные значения, а приближенные, интерполированные по какому-либо закону (median фильтр, local median фильтр). Второй, «non-post-interrogation» метод, в отличие от первого, дает точное положение пика, соответствующего наиболее вероятному смещению в данной области, и позволяет получить более высокое отношение сигнал/шум. Его действие состоит в коррекции входных данных для алгоритма поиска локального максимума.

Метод Correlation Based Correction (CBC) [11] принадлежит второй группе. Он основан на поэлементном перемножении таблиц корреляционных функции для текущей расчетной области и области, смещенной относительно первой (Рис. 1-12).

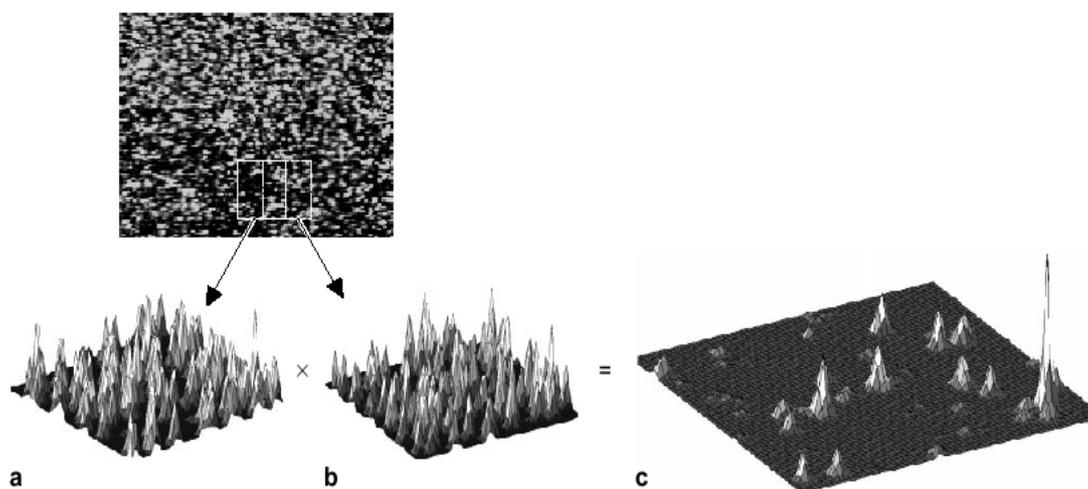


Рис. 1-12 Принцип подавления случайной корреляционной составляющей

При перемножении корреляционных функций в двух соседних областях те значения корреляционной функции, которые не появляются в обеих областях (случайные корреляции, не являющиеся полезным сигналом) устраняются из итоговой области. Тогда как пик, соответствующий реальному смещению частиц остается. В итоге отношение сигнал/шум увеличивается. Такой подход позволяет обнаружить корреляционный пик, соответствующий сигналу (реальному смещению) даже если его

амплитуда до перемножения была меньше амплитуды шумового пика. При этом если смещения частиц в перемножаемых областях отличаются значительно (большие градиенты скорости) на итоговой корреляционной плоскости сигнальные пики нивелируются так же, как шумовые. Это накладывает ограничение на использование данного подхода в потоках с высокими градиентами скорости. Важно заметить так же, что предложенный в [11] подход предполагает расчет вектора скорости по пику на итоговой корреляционной плоскости. Фактически такой вектор есть осредненное значение по двум областям.

Авторы предлагают использовать следующую модификацию метода коррекции ошибок. Было предложено использовать максимум на итоговой корреляционной функции не для определения вектора скорости, а только для определения области на исходной корреляционной функции в которой необходимо осуществлять поиск локального максимума. Такой подход позволяет получать значения векторов скорости без сглаживания и может быть применен к корреляционным функциям с отношением сигнал/шум менее единицы.

1.2.4. Методы отсева

Автоматическая обработка изображений неизбежно приводит к появлению ошибочных векторов. Источником подобных ошибок могут быть различные факторы, как, например, низкое качество изображения в данной измерительной ячейке, недостаточное число трассеров, большие величины градиентов, существенные значения перпендикулярной лазерному ножу компоненты скорости и т.д. Число ошибочных векторов определяет качество измеряемых данных и при оптимальных параметрах эксперимента не превышает 3 – 5% от общего числа векторов. Для определения ошибочных векторов обычно используются критерии, которые будут описаны ниже.

1.2.4.1. Отсев по отношению сигнал/шум

Отбор по отношению сигнал/шум – один из основных критериев отбора. Как и в других экспериментальных методиках, характерное значение параметра сигнал/шум может служить мерилем качества получаемых в эксперименте данных. Отношение сигнал/шум строится по значениям двух максимумов корреляционной функции. Уровнем сигнала считается амплитуда наибольшего максимума корреляционной функции. Вектор скорости в данной расчетной области считается по координате именно «сигнального» максимума. Уровнем шума считается наибольший максимум из оставшихся (не сигнальных, а, следовательно, шумовых) максимумов. Порог отношения сигнал/шум, необходимый для отсеивания «ненадежных» векторов устанавливается эмпирически. Типичное значение порогового уровня равно 1,2. Данные, имеющие отношение сигнал/шум более 2 можно считать надежными. Данные,

с отношением сигнал/шум порядка единицы считаются ненадежными, поскольку в этом случае амплитуды «сигнального» и «шумового» максимумов приблизительно равны, и следовательно, невозможно однозначно выбрать один из них для расчета вектора скорости.

1.2.4.2. Отсев по локальному среднему

Отбор по локальному среднему, в основе которого лежат соображения о локальной гладкости (непрерывности) поля скорости. При данном отборе значение каждого рассчитанного вектора скорости сравнивается с ближайшими векторами. Вектор $v(x, y)$ считается неверным, если выполняется следующее соотношение:

$$|v(x, y) - \bar{v}(x, y)| > k.$$

Здесь $\bar{v}(x, y)$ - средняя скорость в близлежащих элементарных областях. Значение порогового коэффициента k рассчитывается следующим образом:

$$k = \alpha \max_{x,y} |v(x, y) - \bar{v}(x, y)|.$$

Коэффициент α . как правило, лежит в диапазоне $0.01 < \alpha < 0.1$

1.2.4.3. Отсев по локальному медианному значению

Метод отсева по предсказанному медианному значению основан на использовании нелинейного median фильтра. В заданной локальной области вблизи исследуемого вектора u_0 для соседних векторов скорости u_i рассчитывается значение u_{median} , используя median фильтр [31]. Критерием отсева является следующее условие:

$$|u_0 - u_{median}| = r_0 > k$$

где k – задаваемый порог. Позднее была предложена модификация метода, используя нормировку r_0 , с целью минимизации влияния величины абсолютной скорости на величину r_0 . Для этого после нахождения значений r_i для соседних векторов рассчитывается r_{median} аналогично векторам скорости [32]. В данном случае критерием отсева является данное условие:

$$\frac{r_0}{r_{median} + \varepsilon_0} > k$$

При этом величина ε соответствует погрешности расчета скорости и обычно берется равной 0.1.

1.2.4.4. Отсев по абсолютному значению скорости

Отбор по абсолютному значению скорости основан на априорных представлениях о структуре потока. Рассчитанный вектор считается ошибочным, если его абсолютное значение (или значение одной из компонент) не лежит в задаваемых пределах.

1.2.4.5. Отсев по статистической выборке (статистическая фильтрация)

Данная процедура основана на анализе функции плотности вероятности (ФПВ) пульсаций скорости в каждой пространственной точке, которой соответствует вектор скорости. Для осуществления этой процедуры необходим ансамбль полей скорости, полученный при одинаковых условиях эксперимента. Основное предположение, на котором построена процедура фильтрации – это экспоненциальное (гауссово) затухание «хвостов» ФПВ. Количество отклоненных в процессе такой фильтрации векторов, как правило, не превышает 3 – 7 % для большинства пространственных точек в потоке. Однако в некоторых областях, где структура потока существенно трехмерна или имеют место большие градиенты скорости, количество отфильтрованных векторов могут достигать 15 – 18 %. Подробное описание процедуры фильтрации можно найти в работе [13]. Недостатком метода является невозможность восстановления мгновенного поля скорости с отсеянными значениями векторов. Тем не менее, для расчета высших статистических моментов данный метод незаменим, поскольку без дополнительной фильтрации ФПВ значения скоростей в ее хвостах дают значительную ошибку. При вычислении старших моментов (3-го и 4-го), такая ошибка может составлять до 500%.

Процедура применяется непосредственно к ансамблю полей скорости, полученных при одинаковых условиях. Метод основывается на анализе функции плотности вероятности (ФПВ) пульсаций каждой компоненты вектора скорости в отдельно взятом узле данных. ФПВ аппроксимируется следующим значением [13]:

$$P(u) = \frac{a^+}{2\pi\sigma_+} \exp\left\{-\frac{(m^+ - u)^2}{2\sigma_+^2}\right\} + \frac{a^-}{2\pi\sigma_-} \exp\left\{-\frac{(m^- - u)^2}{2\sigma_-^2}\right\}$$

Где u – это пульсации (отклонение от среднего значения) компоненты скорости.

$$m^+ = \frac{\sigma}{4} \left[S + \sqrt{S^2 + 8} \right] \quad a^+ = -\frac{S - \sqrt{S^2 + 8}}{2\sqrt{S^2 + 8}} \quad \sigma_+^2 = (m^+)^2$$

$$m^- = \frac{\sigma}{4} \left[S - \sqrt{S^2 + 8} \right] \quad a^- = \frac{S + \sqrt{S^2 + 8}}{2\sqrt{S^2 + 8}} \quad \sigma_-^2 = (m^-)^2$$

σ и S - дисперсия и асимметрия скорости: $\sigma^2 = \overline{u^2}$ и $S = \overline{u^3}/\sigma^3$ соответственно. Отсев осуществляется итерационным путем, на каждой итерации дисперсия и асимметрия рассчитываются заново, не учитывая неверные вектора. На первой итерации и в случае $S = 0$ аппроксимация осуществляется функцией Гаусса:

$$P(u) = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left\{-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right\}$$

На каждой итерации анализируется ФПВ каждой компоненты скорости, используя следующие критерии:

1. ФПВ вероятности исследуется на интервале $u \in (-\infty, -l\sigma) \cup (l\sigma, \infty)$.
2. Все вектора, для которых хотя бы одна компонента скорости $u \in (-\infty, -u^*) \cup (u^*, \infty)$ являются неверными, где $P(u^*) = \text{MinPDF}$.
3. Если для значения $u = \tilde{u}$ значение ФПВ превосходит аппроксимацию в k раз, то все присутствующие в ансамбле компоненты равные u помечаются как подозрительные. В случае если все компоненты одного вектора попали в подозрение, то вектор является неверным.

Основным преимуществом данного метода является существенное уменьшение погрешности при расчете высших статистических пульсационных моментов скорости.

1.2.5. Методы интерполяции

После применения алгоритмов отсева, даже при оптимальной настройке PIV системы при проведении эксперимента в полях мгновенной скорости присутствуют неверные вектора. Для дальнейшего расчета пространственных дифференциальных характеристик необходимо заменять такие вектора на наиболее вероятное значение.

Существуют два способа интерполяции групп неверных векторов: итерационный метод и метод решения системы интерполяционных уравнений. В первом случае может быть использовано несколько итераций замены по локальному среднему. Второй метод представлен в этой главе.

Используя предположение гладкости поля скорости, как функции двух независимых переменных, можно воспользоваться разложением в ряд Тейлора для компоненты вектора скорости:

$$U_{i,j} = \sum_{k,l=0}^{\infty} \frac{i^k j^l}{k!l!} \frac{\partial^{k+l} U}{\partial x^k \partial y^l} \Big|_{0,0} (\Delta x)^k (\Delta y)^l$$

где Δx и Δy шаг сетки по соответствующим координатам. Учитывая наличие в данных некоррелированного шума, можно записать интерполяционное уравнение для узла с координатами (0,0):

$$U_{0,0} = \frac{1}{a} \sum_{i,j} a_{i,j} U_{i,j} + \sum_{i+j=n+1}^{\infty} \alpha_{i,j} \frac{\Delta x^i \Delta y^j}{i!j!} \frac{\partial^{i+j} U}{\partial x^i \partial y^j} \Big|_{0,0} + \varepsilon \sigma_U \text{ где } a = \sum_{i,j} a_{i,j}$$

Второе слагаемое в правой части уравнения соответствует погрешности, связанной с конечностью задействованной в интерполяции области, третье слагаемое соответствует погрешности, вызванной некоррелированным шумом.

$$\alpha_{i,j} = \frac{1}{a} \sum_{l,m} a_{l,m} l^i m^j, \quad \varepsilon^2 = \frac{1}{a^2} \sum_{i,j} a_{i,j}^2$$

σ_U - может быть найдено из погрешности измерения данных [10]. С ростом порядка интерполяционного уравнения увеличивается область, задействованная в интерполяции, следовательно, увеличивается влияние некоррелированного шума, при этом погрешность, связанная с конечностью схемы уменьшается.

Реализованный алгоритм интерполяции использует интерполяционный фильтр, изображенный на Рис. 1-13.

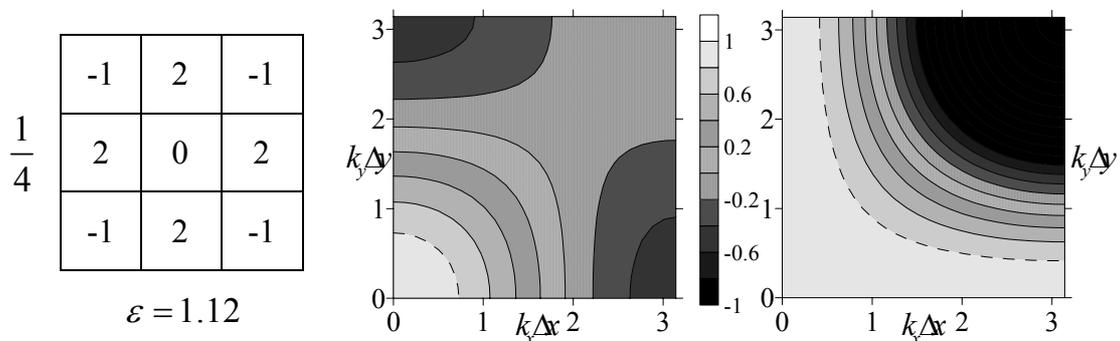


Рис. 1-13 Характеристики (слева) интерполяционного фильтра. Передаточные функции локального среднего (в центре) и интерполяционного фильтра (справа).

Частотные характеристики фильтра могут быть характеризованы передаточной функцией:

$$T = \frac{U_{est.}}{U_{true.}}(k_x \Delta x, k_y \Delta y)$$

Это отношение рассчитанного значения компоненты скорости к действительной. На Рис. 1-13 представлены передаточные функции для локального среднего области 3x3 и используемого в интерполяции фильтра по погрешности измерений в 3%. Низкочастотная область соответствующая PIV данным в случае использование локального среднего восстанавливается существенно хуже. Прерывистой линией ограничена область, в которой сигнал восстанавливается с 20% точностью.

Интерполяция полей скорости может быть рекомендована к применению, в том числе, и перед непосредственным расчетом трехкомпонентных полей скорости для заполнения недостающих векторов.

1.2.6. Статистическая обработка данных

После измерения достаточно большого количества полей мгновенной скорости для стационарного турбулентного потока, можно далее рассчитать поля статистических моментов турбулентных пульсаций различных порядков:

$U_i = \langle u_i \rangle$ - Компоненты средней скорости

$\langle u'_i u'_j \rangle = \langle (u_i - U_i)(u_j - U_j) \rangle$ - Моменты второго порядка или напряжения Рейнольдса

$\langle u'_i u'_j u'_k \rangle = \langle (u_i - U_i)(u_j - U_j)(u_k - U_k) \rangle$ - Моменты третьего порядка и т.д.

Подразумевается осреднение по ансамблю. При расчете, все вектора, определенные ранее как неверные, игнорируются.

1.2.7. Расчет дифференциальных характеристик

В данной главе расчет пространственных дифференциальных характеристик рассмотрен в контексте конечно-разностных схем. Наиболее детально применение линейных фильтров для расчета частных производных в PIV методике описано в [9]. Центральные-разностные схемы имеют следующий вид:

$$\frac{\partial U}{\partial x}(x_j) = \frac{1}{a\Delta x} \sum_{i=1}^{n/2} a_i (U_{j+i} - U_{j-i}) + \sum_{i=n+1}^{\infty} \alpha_i \frac{\Delta x^{i-1}}{i!} \frac{\partial^i U}{\partial x^i}(x_j) + \varepsilon \frac{\sigma_U}{\Delta x}$$

Как и для интерполяционных фильтров, второе слагаемое в правой части уравнения соответствует погрешности, связанной с конечностью задействованной в расчете области, третье слагаемое соответствует погрешности, вызванной некоррелированным шумом.

$$a = 2 \sum_{i=1}^{n/2} i a_i, \quad \alpha_i = \frac{2}{a} \sum_{l=1}^{n/2} a_l l^i \quad \text{и} \quad \varepsilon^2 = \frac{1}{a^2} \sum_{i,j} a_{i,j}^2$$

С ростом порядка схемы вклад в погрешность конечности схемы уменьшается, наряду с ростом вклада от некоррелированного шума.

Применяя экстраполяцию Ричардсона – комбинацию центрально-разностных схем с различным шагом – можно минимизировать один из вкладов в погрешность.

$$\frac{\partial U}{\partial x}(x_j) = \frac{1}{a} \sum_{i=1,2,4,8} \frac{a_i (U_{j+i} - U_{j-i})}{2i\Delta x} + \sum_{i=n+1}^{\infty} \alpha_i \frac{\Delta x^{i-1}}{(n+1)!} \frac{\partial^i U}{\partial x^i}(x_j) + \varepsilon \frac{\sigma_U}{\Delta x}$$

Частотные характеристики фильтров для расчета производных могут быть описаны при помощи функции переноса:

$$T = \frac{\frac{\partial U_{est.}}{\partial x}}{\frac{\partial U_{true.}}{\partial x}}(k_x \Delta x)$$

Далее на Рис. 1-14 приведены частотные характеристики некоторых конечно-разностных схем.

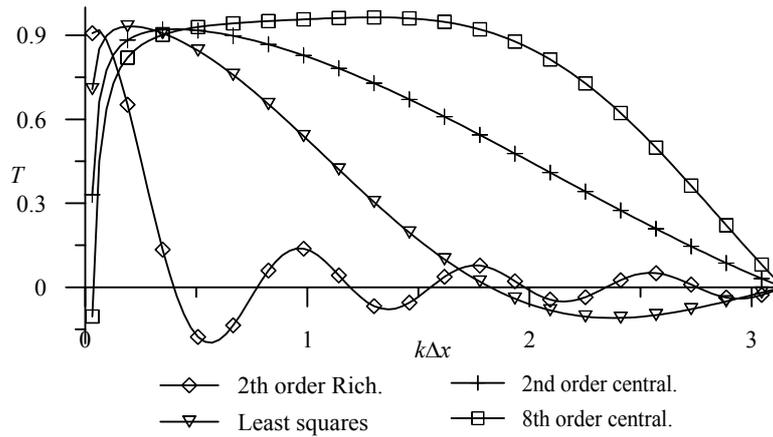


Рис. 1-14 Частотные характеристики различных конечно разностных схем. Схема Ричардсона получена из условия минимума коэффициента усиления шума.

Из работы [9] следует, что в случае оптимизации размера расчетной области [8] при 50% перекрытии, наиболее приемлемой является центрально-разностная схема второго порядка. Такой вывод связан с тем, что этот фильтр имеет наиболее близкие к оптимальным верхнюю и нижнюю границы полосы пропускания. В случае использования 75% перекрытия следует использовать Least squares фильтр, предложенный в [24], эта схема так же может быть предпочтительнее при 50% перекрытии в случае существенного уровня шума.

Основным преимуществом этих схем является возможность оптимально различать низкочастотный сигнал в присутствии некоррелированного шума.

1.2.8. Статистическая обработка пространственных производных скорости

После расчета пространственных производных от достаточно большого количества полей мгновенной скорости для стационарного турбулентного потока, можно далее рассчитать поля статистических моментов градиентов турбулентных пульсаций различных порядков:

$$\left\langle \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} = \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \text{Производные компонент средней скорости}$$

$$\left\langle \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right\rangle = \left\langle \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} - \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \right) \right\rangle - \text{Моменты второго порядка.}$$

$\left\langle \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \frac{\partial u_m}{\partial x_n} \right\rangle = \left\langle \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} - \frac{\partial U_k}{\partial x_l} \right) \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_n} - \frac{\partial U_m}{\partial x_n} \right) \right\rangle$ - Моменты третьего порядка и т.д.

Подразумевается осреднение по ансамблю.

1.2.9. Расчет пространственных спектров и двухточечных корреляций

Одно из основных преимуществ метода PIV – это способность измерять поля мгновенной скорости и, следовательно, возможность расчета пространственных спектров и корреляций.

Двухточечная корреляция для выбранного сечения статистически стационарного течения записывается следующим образом:

$$R_{ij}(X, Y, x, y) = \langle u_i(X, Y) u_j(X + x, Y + y) \rangle$$

В данном случае осреднение подразумевается по ансамблю. Считая в выбранной области пульсации скорости однородными по пространству, можно записать корреляционную функцию для турбулентных пульсаций:

$$R_{ij}(x, y) = \langle u'_i(X, Y) u'_j(X + x, Y + y) \rangle_{X, Y}$$

Тут осреднение подразумевается как по пространству, так и по ансамблю. Применив к выбранному профилю корреляционной функции одномерное преобразование Фурье можно записать одномерную спектральную плотность (или просто одномерный спектр) турбулентных пульсаций:

$$F_{ij}(k_k) = \Phi(R_{ij}(x_k)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{ij}(x_k) \exp(-ik_k x_k) dx_k$$

Используя приближение выполнения Корреляционной теоремы для дискретного преобразования Фурье, можно выразить одномерный спектр пульсаций через произведение преобразований Фурье от самих пульсаций:

$F_{ij}(k_k) = \frac{2\pi}{L} \Phi(u_i(x_k)) \Phi^*(u_j(x_k))$, где L - область, на которой рассчитывается преобразование Фурье, * - означает комплексное сопряжение.

1.3. Погрешности и динамический диапазон

Погрешность метода во многом определяется характеристиками измерительной системы и параметрами эксперимента. Точность измерения смещения трассеров зависит от локальных параметров потока и получаемого изображения, по которому это смещение рассчитывается. Поэтому в общем случае можно указать только характерное значение погрешности. Основной вклад в погрешность PIV измерений вносит точность измерения перемещений частиц, на которую, в свою очередь, влияют следующие факторы [24,35,26,16]:

- *Локальный градиент скорости.* В случае значительного градиента частицы внутри одной элементарной области делают разные перемещения. На корреляционной функции возникают несколько пиков, соответствующих разным перемещениям частиц;
- *Абсолютная величина смещения трассеров.* Вклад данной величины в погрешность измерений тем меньше, чем меньше ее значение. При использовании итерационных методов смещения трассеров малы (компенсируются смещением расчетных областей) и погрешность расчета уменьшается по сравнению со стандартными методами;
- *Разрядность цифровой камеры.* Разрядность цифрового представления изображения более 6 бит уже практически не влияет на точность;
- *Фоновые шумы изображения.* Шумы до 10% по интенсивности незначительно увеличивают погрешность при условии достаточного для регистрации сдвига частиц (более 0.2 пикселя);
- *Размер частиц на изображении.* Размер образа должен обеспечивать, с одной стороны, возможность качественной межпиксельной интерполяции (более 1 пикселя), а с другой – высокую степень локальности;
- *Эффективное количество частиц.* С учетом эффекта «потери пары» эффективное количество частиц в элементарной области должно быть оптимальным для достаточной статистики при расчете корреляционной функции и в то же время должно обеспечивать высокую степень оптической прозрачности;
- *Оптические эффекты,* связанные с дифракцией (размер частиц сопоставим с длиной волны), различными аберрациями;
- *Размер и плавучесть трассеров.* Идеальный случай – плотности частиц и среды совпадают и размер трассеров $\rightarrow 0$. В реальности на перемещение частиц оказывают влияние силы плавучести и локальные сдвиги.

1.3.1. Методы оценки погрешности измерений

Как было сказано выше, сразу несколько факторов влияют на точность PIV измерений. В общем случае ошибку измерения ε_{tot} можно представить как сумму систематической ошибки ε_{bias} и случайной ошибки ε_{rms} :

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{bias} + \varepsilon_{rms}$$

Точность измерений и систематическая ошибка может быть получена несколькими способами. Один из них – это использование реальных PIV измерений, сделанных на физическом объекте с известными распределениями скоростей. Например, PIV измерения в стационарном потоке были использованы для оценки точности метода в работе [35], а так же измерения в воздушной струе в ламинарном режиме [22]. Понятно, что такой способ дает наиболее реальную оценку точности измерений. При этом, однако, он не позволяет исследовать полностью вклад в погрешность таких параметров, как диаметр частиц или уровень шума на изображении.

Другой способ оценки погрешности – применение алгоритмов обработки к искусственным изображениям, сгенерированным методом Монте-Карло [25, 17, 18, 36, 16]. В прямоугольной области пространства, моделирующей световой нож создается случайное распределение частиц. После дискретизации и оцифровки изображений – обработка данных при помощи PIV алгоритмов и сравнение результатов с известным распределением скорости, что позволяет оценить погрешность измерений. Изменяя параметры тестовых изображений, можно определить их вклад в погрешность по отдельности.

Одна из реализаций генератора искусственных изображений (PIV Standard Project) доступна через Интернет по адресу [39]. Программа-генератор создает изображения с заданными параметрами. Кроме того, вместе с изображениями пользователю предоставляется точные значения перемещений частиц, использованные для создания изображений. Поля скорости (перемещения), рассчитанные по изображениям, могут быть сравнены с известными точными значениями перемещений частиц, что даст оценку точности метода.

Основой данного подхода является генерация адекватных изображений трассеров. Генератор изображений должен позволять задавать такие параметры, как диаметр частиц, распределение их по диаметру, форма частиц, пространственная плотность частиц и т.д. Для большинства представленных ниже результатов моделирования распределение интенсивности каждой отдельной частицы представляется в виде Гауссовой функции с заданной шириной. Распределение интенсивности лазерного излучения в нормальном направлении по отношению к плоскости лазерного ножа также

задается Гауссовым распределением. Генератор случайных чисел задает случайные координаты частиц внутри области лазерного ножа. Далее производится интегрирование интенсивности по области, соответствующей площади одного пикселя изображения. Для создания перемещений частиц внутри измерительной области используется искусственное поле скорости с заданным пространственным распределением и градиентами.

Ниже представлены результаты применения описанного подхода к оценке точности PIV измерений [24]. Цель данного раздела – показать, каким образом каждый параметр влияет на погрешность метода. Необходимо понимать, что точность результатов зависит, в том числе и от типа и параметров алгоритма расчета поля скорости, и, следовательно, представленные результаты не могут быть напрямую применены для расчета погрешности измерений.

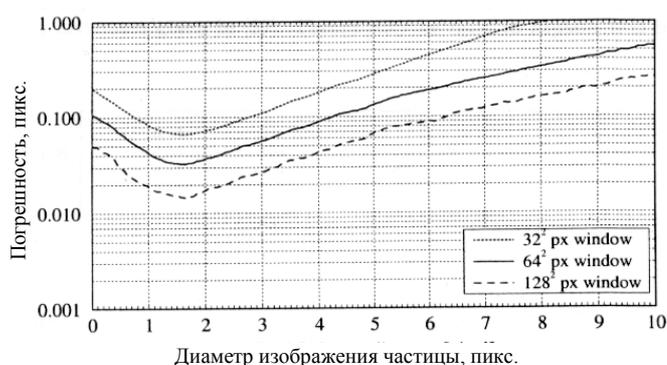


Рис. 1-15 Ошибка кросс-корреляционного алгоритма расчета поля скорости в зависимости от диаметра частиц на изображении. Три кривые соответствуют различным размерам элементарной расчетной области

На Рис. 1-15 представлена ошибка кросс-корреляционного алгоритма расчета поля скорости в зависимости от диаметра частиц на изображении. Видно, что оптимальный размер изображения трассера равен 1.5 пикс.

На Рис. 1-16 представлена ошибка кросс-корреляционного алгоритма в зависимости от смещения частиц для разного количества частиц в элементарной расчетной области (N_I). Видно, что при уменьшении смещения частиц точность расчета повышается. При использовании итерационных алгоритмов расчета поля скорости (см. 1.2.2) расчет перемещений частиц на всех итерациях кроме первой происходит с компенсацией смещения, что приводит к повышению точности метода, поскольку частицы в данном случае делают малые перемещения. Кроме того, на графике видно, что точность расчета повышается с увеличением счетной концентрации частиц N_I на элементарной расчетной области.

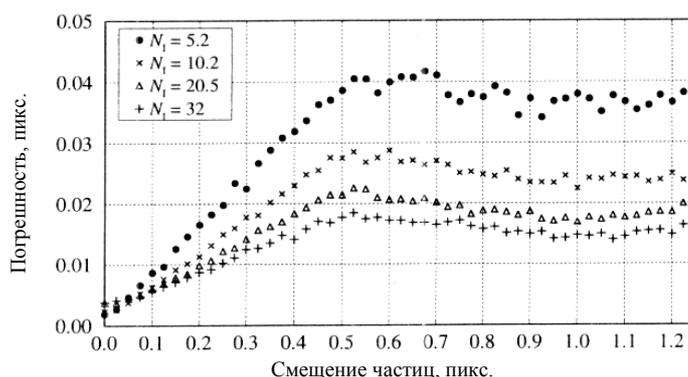


Рис. 1-16 Ошибка кросс-корреляционного алгоритма в зависимости от смещения частиц для разного количества частиц в элементарной расчетной области (N_I)

Поскольку метод PIV основан на статистическом расчете перемещений с использованием корреляций между частицами на изображении, наличие градиента скорости внутри расчетной области влияет на точность результатов обработки. В этом случае разные частицы на изображении делают разные перемещения, и, следовательно, на корреляционной функции возникает несколько пиков, соответствующих различным перемещениям частиц. Кроме того, некоторые частицы могут не иметь своей пары на втором изображении вследствие эффекта потери пары. Для стандартного кросс-корреляционного алгоритма без смещения областей наличие градиентов всегда приводит к недооценке значений скорости. Медленные частицы делают меньшие перемещения и, поэтому в меньшей степени подвержены эффекту потери пары и в среднем вносят больший вклад в истинные (не случайные) корреляции изображения.

На Рис. 1-17 представлена среднеквадратичная ошибка расчета скорости как функция градиента скорости при различных концентрациях частиц и размерах элементарной расчетной области. Глядя на график можно сделать следующий вывод. Расчет скорости с малым размером элементарной расчетной области дает более высокую точность. Даже при одинаковых (нормированных на площадь элементарной области) концентрациях расчет с использованием малых расчетных областей дает лучшую точность по сравнению со случаем больших расчетных областей. Следовательно, при проведении расчета необходимо по возможности уменьшать размер расчетной области.

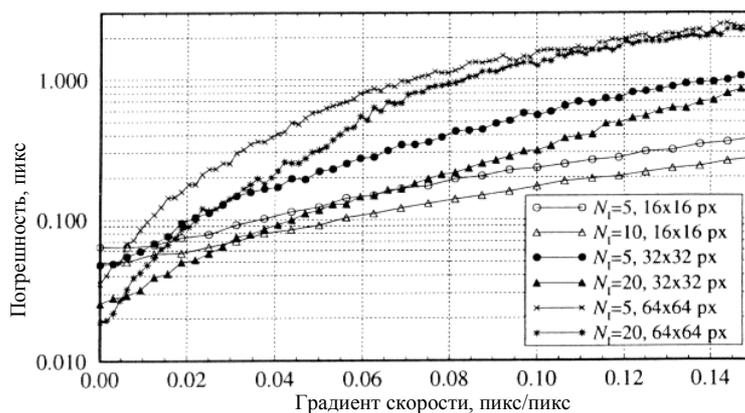


Рис. 1-17 Ошибка кросс-корреляционного алгоритма как функция градиента скорости для различных концентраций частиц (N_I) и размеров элементарной области.

Анализ погрешности современных методов обработки PIV изображений можно найти в [28,29]. Данные работы опубликованы по результатам первого и второго международного симпозиума PIV Challenge, основной целью которого является сравнение различных алгоритмов обработки PIV изображений. В работе симпозиума принимало участие около 20 команд с разных научных центров и коммерческих компаний. Разработчики системы «ПОЛИС» также принимали участие в симпозиуме.

1.3.2. Практические рекомендации по проведению эксперимента

Исходя из накопленного опыта по работе с PIV измерителями скорости и оценки погрешностей измерений, были выработаны следующие рекомендации по минимизации погрешностей PIV измерений:

- Оптимальный размер частиц на изображении должен быть порядка $1.5 \div 2.5$ пикселя [24];
- Эффективное количество частиц (с учетом эффекта «потери пары») в элементарной области $N_I > 5$ для кросс-корреляционных алгоритмов, и $N_I > 8$ для автокорреляционных повышает вероятность «правильного» определения скорости практически до 100% [18].
- Из теоремы Найквиста следует ограничение на максимальное измеряемое смещение частиц внутри области расчета, которое в случае PIV измерений равно четверти области расчета: $D_x^{\max} = \Delta x_0 < d_x/4$, $D_y^{\max} = \Delta y_0 < d_y/4$.

Динамический диапазон измерений определяется отношением максимального измеряемого смещения частиц к минимальному. Оптимальное измеряемое

максимальное смещение – четверть области расчета (в итерационном методе – четверть области на первой итерации). Минимальное смещение зависит от алгоритмов обработки и его типичным значением является 0.1 пикс для стандартного кросскорреляционного алгоритма и 0.03 пикс для итерационных алгоритмов. Таким образом, для расчетной области размером 32x32 пикселя стандартный кросскорреляционный алгоритм дает динамический диапазон около 80. Итерационные алгоритмы с переразбиением областей, например, с 64x64 до 32x32 пикселей, дадут динамический диапазон порядка 500.

1.4. Методика Stereo PIV

В традиционной конфигурации 2D PIV системы оптические оси линз направлены перпендикулярно плоскости измерения, таким образом, после записи изображений частиц, попавших в плоскость лазерного ножа, теряется информация о нормальной к плоскости измерения компоненте скорости. Для двумерных потоков конфигурация эксперимента с одной камерой дает достоверный результат. Сохраняя оптическую ось перпендикулярно плоскости лазерного ножа, область измерения будет в фокусе, даже при большой апертуре, и перспективные искажения будут минимальны. Без перспективных искажений коэффициент увеличения является однородным по всему полю изображения, поэтому процедура калибровки для 2D системы включает в себя только расчет масштабного коэффициента путем измерения соответствующих масштабов тестового объекта в измерительной области потока и на изображении.

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 (см. Рис. 1-20, слева). Основная сложность теперь состоит в том, что изображение, полученное камерой расположенной под углом к измерительной плоскости потока, содержит искажения перспективы. Такие искажения влекут за собой изменение масштабного коэффициента от точки к точке изображения. Чтобы найти зависимость масштабного коэффициента от координаты в плоскости изображения применяется калибровка камеры.

1.4.1. Принцип метода

Существует две основные конфигурации для стереоскопических измерений методом PIV: трансляционный метод (см. Рис. 1-18 (a)) и угловой метод (см. Рис. 1-18 (b)).

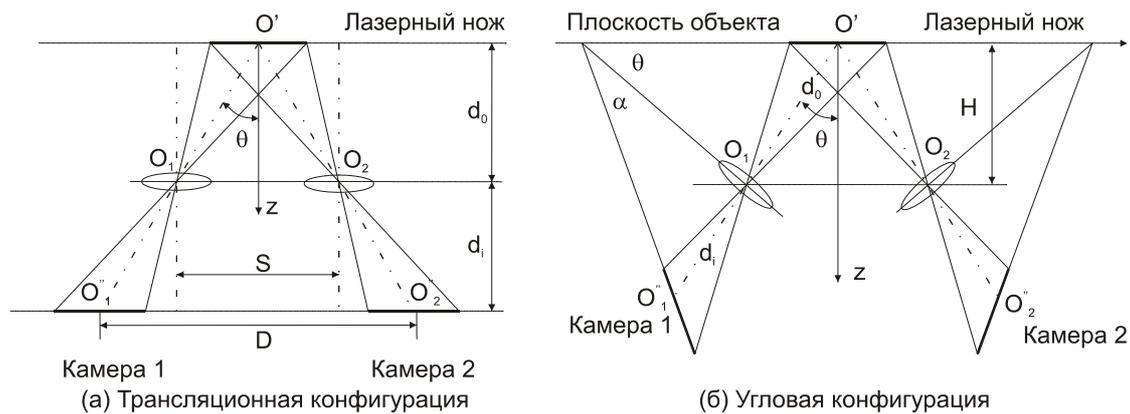


Рис. 1-18 Конфигурации стереоскопических измерений

В трансляционном методе оптические оси обеих камер параллельны, таким образом, коэффициент увеличения изображения остается постоянным. Недостатком данной конфигурации является то, что стереоскопический угол наблюдения должен оставаться небольшим (менее 30 градусов) для того, чтобы избавиться от перспективных искажений. Угловой конфигурационный метод может быть использован с более широким диапазоном стереоскопических углов (до 45-60 градусов между оптической осью камеры и нормалью к плоскости измерения). Таким образом, во второй конфигурации может быть достигнута более высокая точность измерения нормальной компоненты скорости. Как уже упоминалось выше, для углового метода масштабный коэффициент не является постоянным по всему полю изображения, поэтому в этом случае необходимо использовать калибровку системы при помощи специальных калибровочных мишеней. Калибровочная мишень представляет собой набор маркеров расположенных в узлах прямоугольной координатной сетки (см. Рис. 1-19).

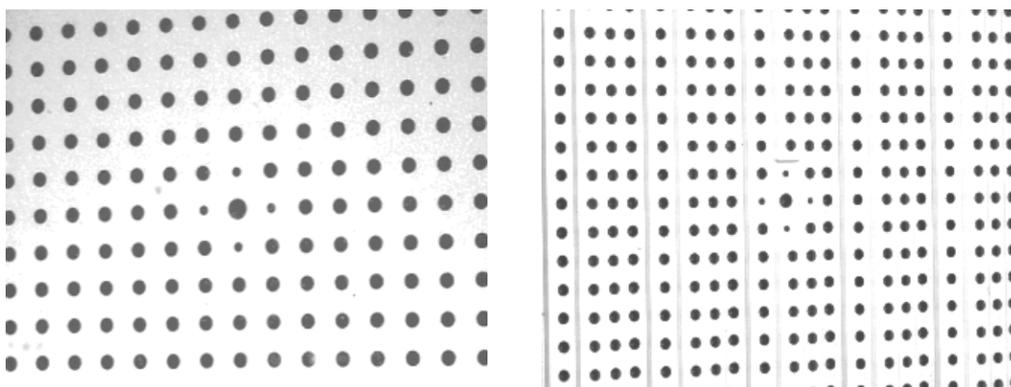


Рис. 1-19 Пример изображения плоской калибровочной мишени (слева) и 3-х уровневой калибровочной мишени (справа)

Несколько маркеров в этом наборе отличается от всех остальных. Они определяют начало координат и расположение координатных осей в плоскости измерения. Изображение калибровочной мишени записывается камерой. Если камера была расположена под углом к мишени, маркеры на изображении мишени больше не будут

находиться в узлах прямоугольной координатной сетки, вследствие искажения перспективы. Необходимо произвести коррекцию искажений. Для этого с использованием одной из моделей, например, проективного преобразования, находится преобразование действительных координат в области измерения, заданных сеткой из маркеров мишени, в координаты изображения. Трехкомпонентное поле скорости в плоскости измерения находится в процессе реконструкции, с использованием найденного преобразования координат.

1.4.2. Оптическая конфигурация в условии Шаймпфлюга (Sheimpflug condition)

Основная сложность при использовании угловой конфигурации состоит в том, что плоскость наилучшей фокусировки, расположенная параллельно сенсору изображения, не лежит в плоскости лазерного ножа. Для совмещения этих двух плоскостей применяется коррекция Шаймпфлюга. Это такое размещение, где плоскость объекта, плоскость изображения и плоскость оптической системы линз пересекаются по прямой, при этом измерительная плоскость потока фокусируется на ПЗС матрицу наилучшим образом (см. Рис. 1-20, справа).

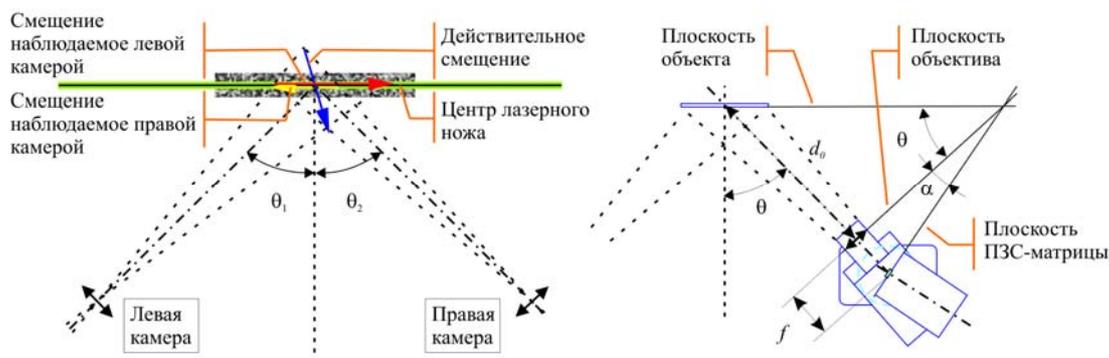


Рис. 1-20 Схема метода измерения (слева), оптическая конфигурация в условиях Шаймпфлюга (справа)

Угол для условия Шаймпфлюга может быть вычислен по формуле: $\alpha = \arctan(f \tan \theta / d_0)$, где f – фокусное расстояние линзы, θ - угол расположения камеры относительно измерительной плоскости, d_0 - расстояние от центра измерительной плоскости до центра линзы оптической системы (см. Рис. 1-20, справа). Если коррекция фокусировки Шаймпфлюга не использована и фокусировка была проведена по центральной части изображения, результатом расчета будет поле скорости с плохими векторами по краям.

1.4.3. Калибровка камеры

Чтобы найти параметры модели отображения $\vec{x} = F(\vec{X})$ из системы координат эксперимента $OXYZ$ в систему координат изображения oxy применяется калибровка камеры. Калибровка осуществляется по набору опорных точек (по изображениям мишени). В зависимости от расположения опорных точек в системе координат эксперимента используется 2D или 3D калибровка камеры.

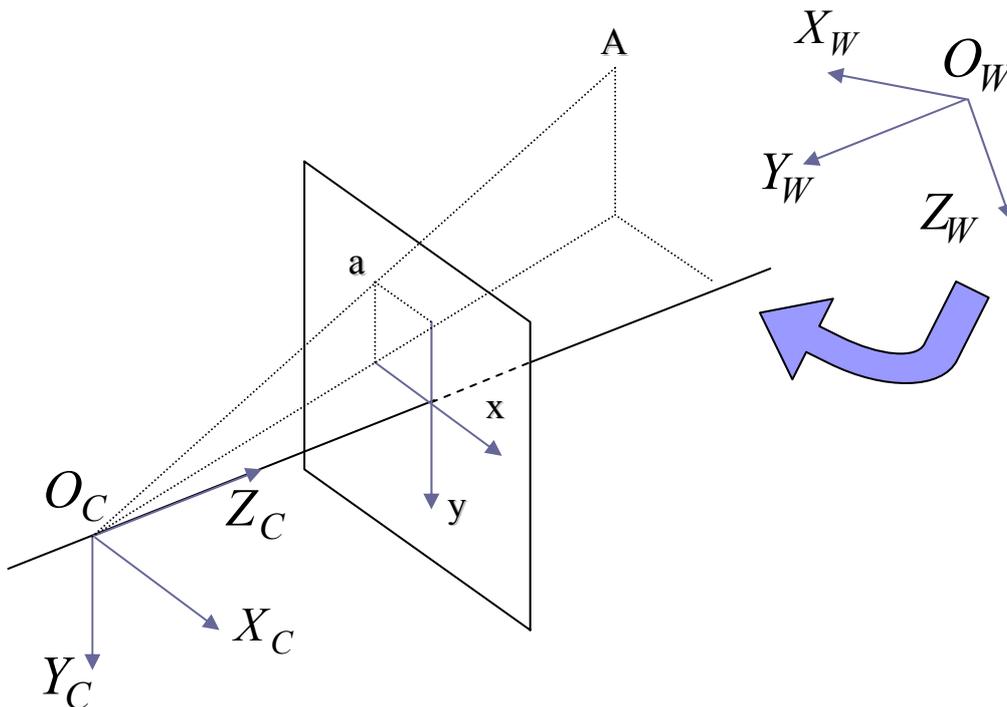


Рис. 1-21 Преобразование систем координат при проецировании объекта на матрицу камеры

2D калибровка применяется при компланарном расположении, когда все Z координаты опорных точек равны. Это самый простой метод калибровки камеры, он требует оценки наименьшего количества параметров и проводится по одному изображению плоской калибровочной мишени. Однако в этом случае обязательным является знание **горизонтальных** и **вертикальных** углов обзора камеры относительно плоскости мишени для проведения геометрической реконструкции итогового поля скорости (см. раздел 1.4.4 далее). Если на оптическом пути между камерой и мишенью встречается граница раздела сред, например, вода-воздух, то **необходимо учитывать преломление лучей** и соответствующее изменение углов обзора мишени камерами в воде. При достаточно сложной геометрической конфигурации границы раздела, определение углов становится нетривиальной задачей, в этом случае стоит обратить внимание на возможность применения 3D калибровки.

3D калибровка применяется в том случае, если опорные точки не расположены в одной плоскости, перпендикулярной оси Z. Для достижения приемлемого уровня погрешности калибровки камеры для плоскостных оптических измерений принято использовать от 3 и более Z плоскостей опорных точек.

Каждая Z плоскость опорных точек соответствует одному изображению плоской калибровочной мишени в положении Z. Таким образом, при использовании 3D калибровки необходимо получить 3 и более изображений плоской калибровочной мишени, перемещая мишень вдоль оси Z в пределах объема засвечиваемого лазерным ножом. Например, если толщина лазерного ножа в эксперименте равна 2мм, то необходимо записать изображения мишени в положениях $Z = -1\text{мм}$, 0 и 1мм. Конструкция мишени должна иметь возможность перемещения мишени в направлении, нормальном к измерительной плоскости, так чтобы мишень оставалась параллельной плоскости лазерного ножа. При этом существуют довольно строгие требования к точности перемещения мишени: порядка $\pm 0.1\text{мм}$ [12, 37]. Существуют также требования к точности изготовления калибровочной мишени. Типичная погрешность положения опорных точек при изготовлении калибровочного объекта с эталонными опорными точками составляет $\pm 0,0015-0,05\text{мм}$.

Несколько Z плоскостей опорных точек можно получить путем регистрации многоплоскостной калибровочной мишени, в этом случае для калибровки камеры используется одно изображение специальной калибровочной мишени (см. Рис. 1-19, справа).

3D калибровка позволяет проводить реконструкцию трехкомпонентного поля скорости в сечении потока двумя методами. Методом реконструкции с использованием геометрических соотношений (см. раздел 1.4.4) и методом реконструкции на основе модели отображения, описанным далее в разделе 1.4.5. Очевидным достоинством метода с применением 3D калибровки вместе с реконструкцией 1.4.5 является то, что он не требует знания углов позиционирования камеры. Это делает его более предпочтительным в случае сложной геометрии границы раздела.

Наиболее часто используемой моделью отображения в 2D калибровке является проективное преобразование или гомография (DLT – Direct Linear Transform) и различные виды его уточнений, например, полиномиальное преобразование второго порядка (SOP – Second Order Polynomial):

$$\begin{bmatrix} wx \\ wy \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (DLT)$$

$$\begin{cases} x = \frac{f_{11}X + f_{12}Y + f_{13} + f_{14}X^2 + f_{15}Y^2 + f_{16}XY}{f_{31}X + f_{32}Y + f_{33} + f_{34}X^2 + f_{35}Y^2 + f_{36}XY} \\ y = \frac{f_{21}X + f_{22}Y + f_{23} + f_{24}X^2 + f_{25}Y^2 + f_{26}XY}{f_{31}X + f_{32}Y + f_{33} + f_{34}X^2 + f_{35}Y^2 + f_{36}XY} \end{cases} \text{ (SOP)}$$

Эти преобразования переводят точку в плоскости системы координат эксперимента (X, Y) в точку в плоскости изображения (x, y) .

В 3D калибровке используется трехмерный аналог DLT модели и полиномиальное преобразование PLN3D:

$$\begin{bmatrix} wx \\ wy \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \text{ (DLT3D)}$$

$$\begin{aligned} \bar{x} = & \bar{f}_{000} + \bar{f}_{100}X + \bar{f}_{010}Y + \bar{f}_{001}Z + \bar{f}_{200}X^2 + \bar{f}_{110}XY + \bar{f}_{020}Y^2 + \bar{f}_{101}XZ + \\ & + \bar{f}_{011}YZ + \bar{f}_{002}Z^2 + \bar{f}_{300}X^3 + \bar{f}_{210}X^2Y + \bar{f}_{120}XY^2 + \bar{f}_{030}Y^3 + \bar{f}_{201}X^2Z + \\ & + \bar{f}_{012}XYZ + \bar{f}_{021}Y^2Z + \bar{f}_{102}XZ^2 + \bar{f}_{012}YZ^2 \end{aligned} \text{ (PLN3D)}$$

Полиномиальные модели более чувствительны к отклонению параметров оптической конфигурации, поэтому в некоторых случаях получить верную калибровку с использованием этих моделей не удастся. Полиномиальные модели могут более точно приблизить модель отображения при наличии нелинейных искажений оптической системы в процессе регистрации изображений (абберации – главным образом дисторсии), однако они также увеличивают случайный шум, не связанный с физической моделью проецирования на плоскость изображения, который варьируется от снимка к снимку. Поэтому полиномиальные модели следует использовать там, где ошибка, связанная с дисторсией оптической системы, много больше случайной погрешности [34, 37].

Таблица 1-2 Модели отображения и необходимое количество опорных точек для оценивания их параметров

Модель отображения	Количество параметров	Минимальное количество опорных точек для расчета калибровки
DLT	8	4
SOP	17	9
DLT3D	11	6
PLN3D	38	19
Tsai model	19	*

Для нахождения преобразования требуется найти все параметры модели отображения, от которых они зависят (см. Таблица 1-2). Определение параметров нелинейных моделей (относительно параметров) осуществляется в 2 этапа. На первом шаге находится приближение к истинным значениям параметров методом наименьших квадратов для линейризованных моделей DLT, SOP, DLT3D. Это приближение является начальным значением для нелинейной оптимизации параметров, которая осуществляется методом Левенберга-Марквардта. При оценивании параметров модели PLN3D достаточно использовать метод наименьших квадратов.

1.4.4. Геометрическая реконструкция 3-х компонентного поля скорости

Для проведения геометрической реконструкции 3-х компонентного поля скорости необходимо получить параллельные проекции поля скорости в плоскости измерения в направлении каждой камеры (см. Рис. 1-20, слева). Параллельную проекцию можно получить двумя путями:

1. Кросскорреляционным алгоритмом рассчитать 2D поле скорости по исходному содержащему перспективные искажения изображению, а затем реконструировать поле скорости в плоскость измерения с использованием модели отображения F . Это, так называемый, алгоритм с реконструкцией поля скорости.
2. Реконструировать изображение содержащие перспективные искажения в плоскость измерения и по параллельной проекции изображения рассчитать соответствующее поле скорости. Это алгоритм с реконструкцией изображения.

В обоих методах получения параллельной проекции поля скорости применяется восстановление данных в новой системе координат с применением процедуры интерполяции на новую сетку. Интерполяция изображения во втором случае требует больше вычислительных затрат, чем интерполяция поля скорости в первом случае. Поэтому по времени расчета первый метод оказывается более предпочтительным. Однако он уступает второму методу в разрешающей способности мелкомасштабных структур потока.

При реконструкции поля скорости стоит 2 задачи. Во-первых, коррекция перспективных искажений координатной сетки. Во-вторых, коррекция длины найденных смещений частиц от точки к точке изображения в соответствии с изменением масштабного коэффициента внутри изображения посредством решения следующего уравнения:

$$\Delta \vec{x} = \nabla F(\Delta \vec{X}), \text{ где } F \text{ – модель отображения, } (\nabla F)_{ij} = \left. \frac{\partial F_i}{\partial X_j} \right|_{(X=X_k, Y=Y_k, Z=Z_k)}, \Delta \vec{x} -$$

смещение частиц на изображении, $\Delta \vec{X}$ - смещение частиц в системе координат эксперимента, (X_k, Y_k, Z_k) - точка в системе координат эксперимента в которой находится смещение.

В случае реконструкции изображения необходимо скорректировать только перспективные искажения координатной сетки.

После получения параллельных проекций поля скорости в плоскости измерения в направлении обзора обеих камер используются геометрические соотношения (см. Рис. 1-22) для вычисления искомого 3-х компонент смещения в системе координат эксперимента:

$$\begin{cases} dX = \frac{dx_2 \tan \alpha_1 - dx_1 \tan \alpha_2}{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2} \\ dY = \frac{dy_1 + dy_2}{2} + \frac{dx_2 - dx_1}{2} \left(\frac{\tan \beta_1 - \tan \beta_2}{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2} \right), \text{ где } (dx_1, dy_1) \text{ и } (dx_2, dy_2) - \\ dZ = \frac{dx_2 - dx_1}{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2} \end{cases}$$

параллельные проекции смещений частиц в плоскости измерения в направлении первой и второй камеры на прямоугольной сетке, $(dX, dY, dZ) / dt = (U, V, W)$ – компоненты искомого вектора скорости.

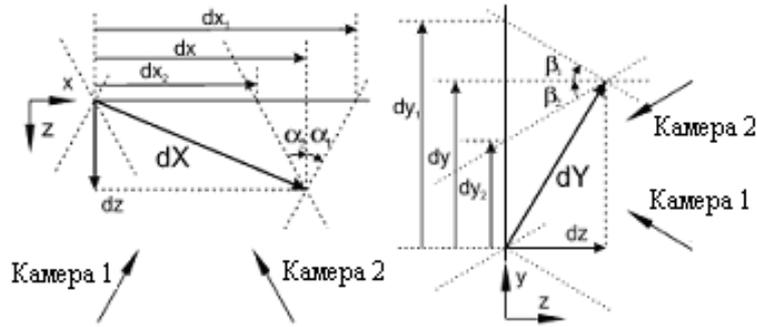


Рис. 1-22 Проекция вектора скорости на направления обзора камер и искомые компоненты скорости

1.4.5. Реконструкция 3-х компонентного поля скорости на основе модели отображения

Данный метод реконструкции аналогичен алгоритму с реконструкцией поля скорости (см. главу 1.4.4). Однако итоговое поле скорости получается из решения следующего уравнения:

$$\begin{bmatrix} \Delta x^{(1)} \\ \Delta y^{(1)} \\ \Delta x^{(2)} \\ \Delta y^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1,1}^{(1)} & F_{1,2}^{(1)} & F_{1,3}^{(1)} \\ F_{2,1}^{(1)} & F_{2,2}^{(1)} & F_{2,3}^{(1)} \\ F_{1,1}^{(2)} & F_{1,2}^{(2)} & F_{1,3}^{(2)} \\ F_{2,1}^{(2)} & F_{2,2}^{(2)} & F_{2,3}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \text{ где } F_{i,j}^{(c)} = \left. \frac{\partial F_i}{\partial X_j} \right|_{(X=X_k, Y=Y_k, Z=Z_k)} ; i = 1, 2; j = 1, 2, 3; c = 1, 2 .$$

Здесь $(\Delta x^{(1)}, \Delta y^{(1)})$, $(\Delta x^{(2)}, \Delta y^{(2)})$ - смещения частиц на изображениях с перспективными искажениями в точке изображения, соответствующей точке (X_k, Y_k, Z_k) в системе координат эксперимента, c - номер камеры, для которой было найдена модель отображения F и $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) / dt = (U, V, W)$ - искомый вектор скорости.

1.4.6. Коррекция рассогласования плоскости калибровочной мишени и плоскости лазерного ножа

Один из экспериментальных источников погрешности метода Stereo PIV связан с рассогласованием плоскости мишени и лазерного ножа [34]. На Рис. 1-23 показаны возможные типы рассогласования связанные с поворотом мишени относительно одной из осей, а также параллельным сдвигом мишени относительно плоскости лазерного ножа.

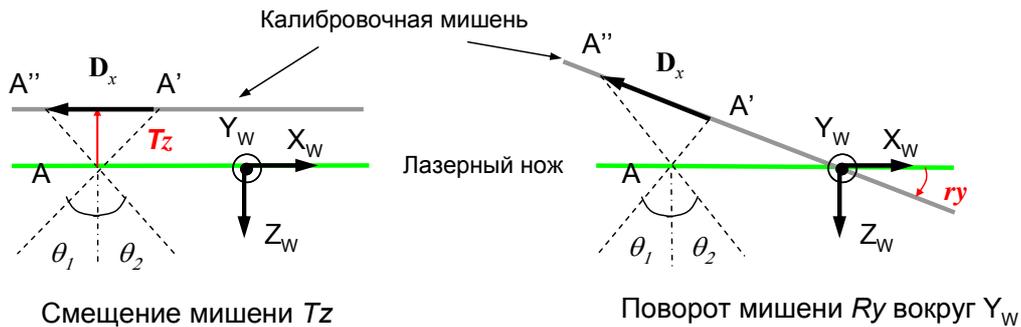


Рис. 1-23 Возможные случаи потери выравнивания калибровочной мишени и лазерного ножа

Коррекция достигается вычислением диспаратности \mathbf{D}_x между сопряженными точками A', A'' , т.е. расстоянием между параллельными проекциями точки A в плоскости измерения на плоскость калибровочной мишени. Далее представлена численная процедура коррекции рассогласования плоскости калибровочной мишени и плоскости лазерного ножа.

Численная процедура коррекции состоит из следующих операций. Стереопара изображений, фиксирующая область потока в один и тот же момент времени, восстанавливается в параллельных проекциях. На следующем шаге кросскорреляционным алгоритмом вычисляется поле значений диспаратности для сопряженных точек на регулярной сетке $\mathbf{D}(x, y)$. Компоненты поля диспаратности аппроксимируются плоскостями $\mathbf{D}(x, y) \approx \mathbf{a}x + \mathbf{b}y + \mathbf{c}$ и по коэффициентам аппроксимации рассчитываются параметры коррекции:

$$\left\{ \begin{array}{l} Ry = \frac{\partial \mathbf{D}_x}{\partial x} \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_1) + \operatorname{tg}(\theta_2)} \\ Rx = \frac{\partial \mathbf{D}_x}{\partial y} \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_1) + \operatorname{tg}(\theta_2)} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} Tz = \frac{\mathbf{D}_x(x_0, y_0)}{\operatorname{tg}(\theta_1) + \operatorname{tg}(\theta_2)} \frac{w_{mdl}}{w_{img}} \\ Ty = \mathbf{D}_y(x_0, y_0) \frac{h_{mdl}}{h_{img}} \end{array} \right.,$$

где (x_0, y_0) - координаты точки $(X, Y, Z) = (0, 0, 0)$ в системе координат изображения (или координаты принципиальной точки), θ_1, θ_2 - горизонтальные углы обзора камер, $w_{mdl}, w_{img}, h_{mdl}, h_{img}$ - ширина, высота изображения в системе координат эксперимента и в системе координат связанной с изображением. В выражении выше смещение Tz, Ty измеряются в метрах, а повороты Ry, Rx в радианах. Применение коррекции рассогласования плоскости калибровочной мишени и плоскости лазерного ножа при калибровке камеры осуществляется поворотом и смещением опорных точек калибровочной мишени в системе координат эксперимента на углы Ry, Rx и расстояния Tz, Ty соответственно.

1.4.7. Погрешность метода

На погрешность метода влияет сразу несколько факторов. Во-первых, это погрешности, связанные с проведением эксперимента: выравнивание плоскости калибровочной мишени параллельно плоскости лазерного ножа, погрешности измерения углов позиционирования камер относительно измерительной области (при использовании геометрической реконструкции 1.4.4), во-вторых, алгоритмические погрешности. Для иллюстрации того, как влияет ошибка выравнивания мишени и лазерного ножа, приведем следующий пример. При повороте мишени на 5 градусов относительно лазерного ножа (см. Рис. 1-23) относительная ошибка определения нормальной компоненты скорости составляет примерно 1.6%. Перейдем теперь к рассмотрению алгоритмической погрешности измерения. Будем считать, что относительная погрешность определения скорости для 2D-PIV системы в плоскости лазерного ножа уже известна и равна $\delta(\Delta x)$. В [20,21] показано, что отношение величин относительных погрешностей нормальной и тангенциальной компонент скорости в центре измеряемого поля равно $\left. \frac{\delta(\Delta z)}{\delta(\Delta x)} \right|_{x=0, y=0, z=0} = \frac{1}{\tan(\theta)}$, где θ - угол позиционирования камеры в горизонтальной плоскости (см. Рис. 1-24)

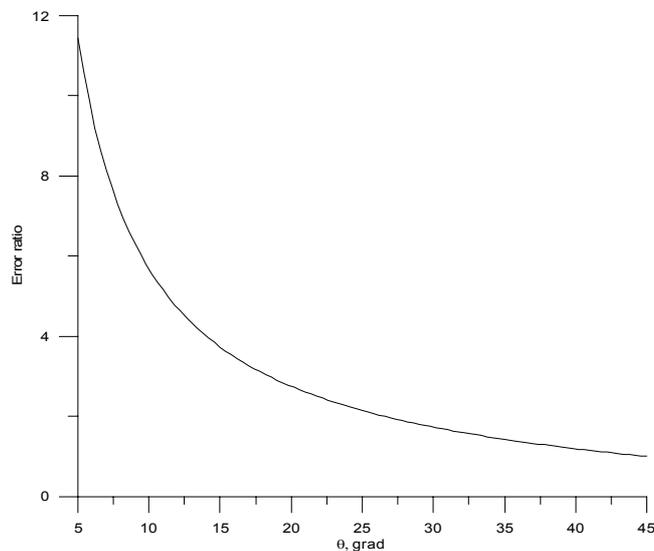


Рис. 1-24 Отношение ошибки компоненты скорости W к U в зависимости от угла позиционирования камеры

Таким образом, не рекомендуется выбирать малые углы обзора, т.к. в этом случае ошибка определения нормальной компоненты скорости возрастает. Известно также, что ошибка калибровки камеры с использованием DLT модели при малых горизонтальных и вертикальных углах обзора возрастает – это связано с сингулярностью модели [37]. Выбор угла θ больше чем 45 градусов тоже является нежелательным из-за значительной неоднородности в масштабных коэффициентах.

2. Описание программного обеспечения ActualFlow

2.1. Введение

Программное обеспечение «ActualFlow» (ПО) используется для автоматизации процесса проведения эксперимента, хранения и обработки данных, а также для визуализации экспериментальных и рассчитанных данных. ПО работает под управлением операционной системы MS Windows XP и выше. Возможности системы могут быть расширены путем добавления новых библиотек обработки, в том числе разработанных пользователями системы, и модулей устройств.

2.2. Установка

2.2.1. Установка алгоритмов

В процессе установки ПО в папке, в которую устанавливается программа (по умолчанию – «**C:\Program Files\ActualFlow**»), создается папка **algorithms**. В нее копируются все библиотеки процедур обработки, выбранные при установке программы. Чтобы процедуры обработки данных из некоторой библиотеки были доступны в диалоге обработки (см. 2.3.3), данная библиотека должна находиться в каталоге **algorithms** и быть зарегистрирована в операционной системе. При установке ПО все библиотеки алгоритмов регистрируются автоматически. Новая библиотека может быть зарегистрирована при помощи утилиты **regsvr32** (входит в стандартную поставку ОС Windows). Для удаления алгоритмов из системы вручную необходимо удалить регистрационную информацию библиотеки из системы командой «**regsvr32 /u имя_библиотеки_алгоритмов**» и удалить файл библиотеки из каталога **algorithms**.

2.3. Основные элементы

2.3.1. База данных

Все данные хранятся в файловой базе данных на диске компьютера. База представляет собой файл, в котором хранится структура данных, и папку, в которой находятся данные и их параметры. Взаимное расположение файла и папки не должно меняться; их расположение в файловой системе может меняться произвольно (например, вы можете перенести базу на другой жесткий диск компьютера, либо записать на компакт-диск или флеш-диск). Доступ к данным в базе выполняется через управляющую панель (Рис. 2-1), содержащую дерево экспериментов и данных. Большинство функций ActualFlow реализованы как операции над узлами базы, и доступ

к ним осуществляется через контекстное меню узла. Организация данных в базе и работа с ними описана в разделе 2.4.

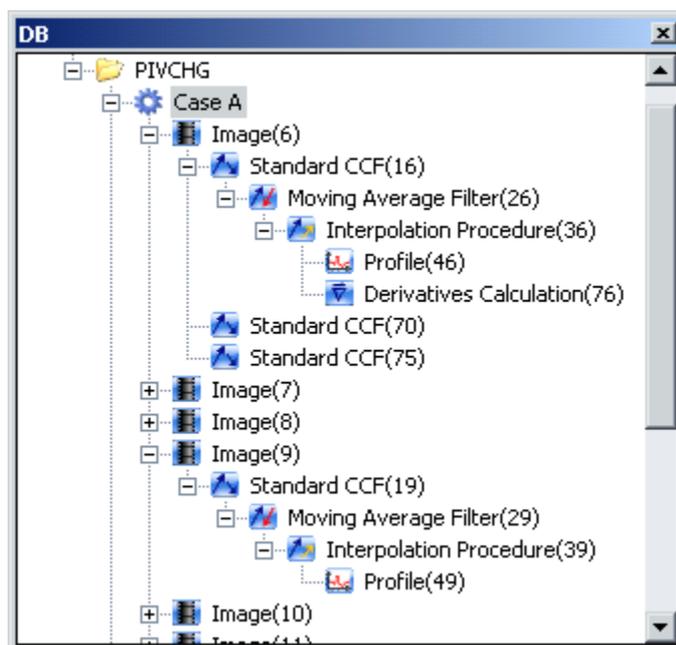


Рис. 2-1 Окно базы данных

2.3.2. Менеджер эксперимента

Менеджер эксперимента управляет запуском и остановкой эксперимента и осуществляет сохранение и визуализацию полученных изображений. Настройка параметров эксперимента и его проведение осуществляется при помощи диалогового окна с закладками. Подробнее см. 2.4.7.

2.3.3. Обработка данных

Система содержит большое количество разнообразных алгоритмов обработки; также вам доступны открытые интерфейсы для создания собственных библиотек алгоритмов. Поддерживается пакетная обработка данных и цепочки алгоритмов. Каждый алгоритм имеет набор параметров, что позволяет гибко настроить его под конкретную задачу. Обработка данных описана в разделе 2.4.3.5, параметры конкретных алгоритмов описаны в разделе 2.6. Выбор данных для пакетной обработки описан в разделе 2.4.3.2.

2.3.4. Отображение данных

Реализована визуализация всех типов данных, включая полученные в ходе эксперимента изображения и результаты обработки таких изображений. Доступны следующие способы визуализации:

- Растровые изображения
- Векторные поля
- Скалярные поля
- Гистограммы
- Stereo-PIV калибровки камер
- Маски
- Графики
- Таблицы данных
- Распределения частиц (пузырей)

Кроме того, допустимы комбинации объектов. Каждый визуализируемый объект имеет ряд параметров, общих для данного способа визуализации, что позволяет гибко настроить отображение объекта в соответствии с вашими предпочтениями. Детальное описание – в разделе 2.7.

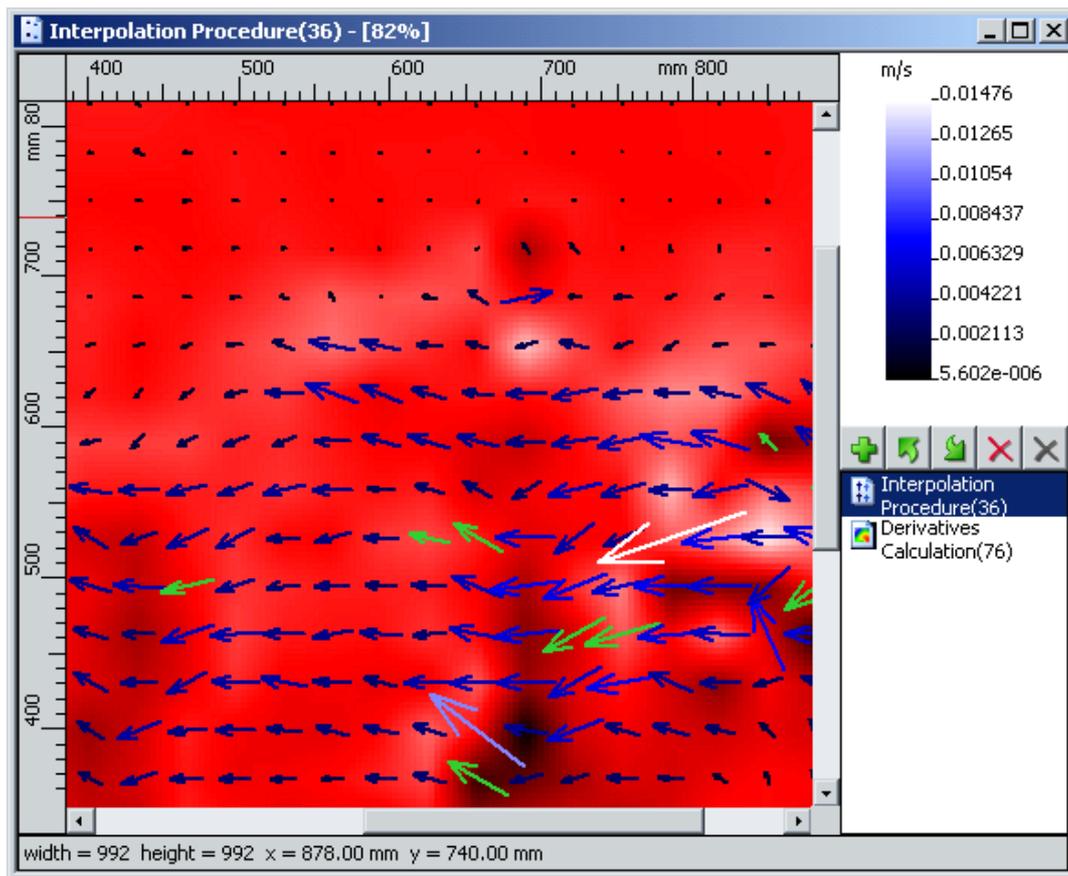


Рис. 2-2 Окно визуализации данных

2.3.5. Панель свойств

Управление свойствами узлов базы (экспериментов и данных) осуществляется через специальную панель **Properties** (см. Рис. 2-3). На панели в левой колонке перечислены названия опций, а в правой – соответствующие им значения. Некоторые значения свойств являются статическими, некоторые можно изменять. Дополнительную информацию о панели свойств смотрите в разделе 2.8.



Рис. 2-3 Внешний вид панели свойств

2.3.6. Журнал событий и исключительных ситуаций

В процессе работы программы могут возникать различные события и исключительные ситуации. Все эти события записываются в специальный журнальный файл **%appdata%\ActualFlow\AF.log** (т.е. в папку **Application Data** текущего пользователя Windows). Каждая новая запись журнального файла отображается в окне сообщений **Output**. Окно вызывается из главного меню программы **View→Output** или сочетанием клавиш **Ctrl+W** (Рис. 2-4).

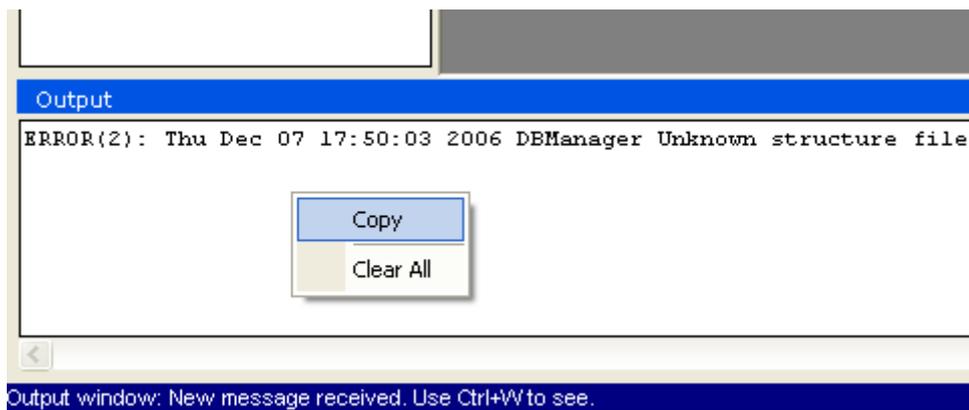


Рис. 2-4 Окно для вывода сообщений

Запись о событии в этом окне содержит его тип, время возникновения, источник события, сообщение, пояснение к сообщению. События делятся на 4 типа: информация, предупреждение, исключительная ситуация и критическая ошибка. Факт получения сообщения отображается подсветкой строки состояния синим цветом. Окно **Output** позволяет копировать текст сообщений в буфер обмена и удалять все сообщения. Эти функции доступны из контекстного меню окна. Типичный пример записей журнального файла выглядит следующим образом:

```

*****
CRITICAL ERROR(3)
Thu Nov 13 17:08:31 2008
Module: ActualFlow
Message: Program is terminated due to the unexpected error
Description: You can save diagnostic dump file for developers
Code: 0
Code Type: NO TYPE
Source file name: .\rPIV_GUI.cpp
Source file line number: 638
*****
ERROR(2)
Thu Nov 13 17:08:40 2008
Module: ActualFlow
Message: Dump was saved to: 'C:\Documents and Settings\user\Application Data\ActualFlow\AFDump_11-13-08_17-08-39.dmp'
Description:
Code: 0
Code Type: SYSTEM error
Source file name: .\rPIV_GUI.cpp
Source file line number: 670
*****
WARNING(1)
Thu Nov 13 17:59:35 2008
Module: ActualFlow
Message: Deleted node has external datafiles
Description: Warning during deleting
Code: 0
Code Type: NO TYPE
Source file name:
Source file line number: 0
*****

```

Трассировка событий, возникающих во время обработки (время начала расчета, времена начала расчета каждым алгоритмом из цепочки), время окончания обработки, статистика обработки) записывается в файл %appdata%\ActualFlow\AFProcReport.log. Типичная трассировка событий обработки выглядит следующим образом:

```
*****
Sun Dec 28 11:16:15 2008
Starting
Sun Dec 28 11:16:16 2008
Iterative CCF
Sun Dec 28 11:17:55 2008
Adaptive Median Filter
Sun Dec 28 11:18:04 2008
Interpolation Procedure
Sun Dec 28 11:18:08 2008
Statistics Fast
Sun Dec 28 11:18:09 2008
Finishing the processing
```

Statistics:

```
- Total working time: 113.657
- Processing time: 108.864
- Total writing time: 16.435
- Input data amount: 100
- Processed data amount: 301
- Output data amount: 100
- Number of algorithms used in processing: 4
Time spent by algorithm :
  - Iterative CCF : 98.484
  - Adaptive Median Filter : 8.813
  - Interpolation Procedure : 2.938
  - Statistics Fast : 0.938
*****
```

2.3.7. Сохранение диагностического файла при аварийном завершении программы

В случае возможного сбоя в работе программного обеспечения на компьютере пользователя при аварийном завершении программы выводится диалоговое окно с подтверждением сохранения последнего состояния процесса перед сбоем см. Рис. 2-5.



Рис. 2-5 Запрос сохранения аварийного дампа памяти на диск

При этом сохраняется стандартный мини-дамп ОС Microsoft Windows размером ~100Кб на диск в папку `%appdata%\ActualFlow\AFDump_**-**-**_**-**-**.dmp` (см. Рис. 2-6), где вместо символов * указаны дата и время аварийного завершения программы. Настоятельно рекомендуем сохранять диагностический файл и отправлять его по электронному адресу электронной почты piv@itp.nsc.ru вместе с текущим журналом (`%appdata%\ActualFlow\AFProcReport.log`) и подробным описанием последовательности действий, которая привела к сбою программы. Это необходимо для повышения надежности программного обеспечения в рамках работ, проводимых группой разработчиков, по постоянному улучшению качества и потребительских

свойств ПО для наших клиентов. Все поступающие отчеты пользователей постоянно анализируются, а исправления дефектов появляются в следующих версиях ПО.

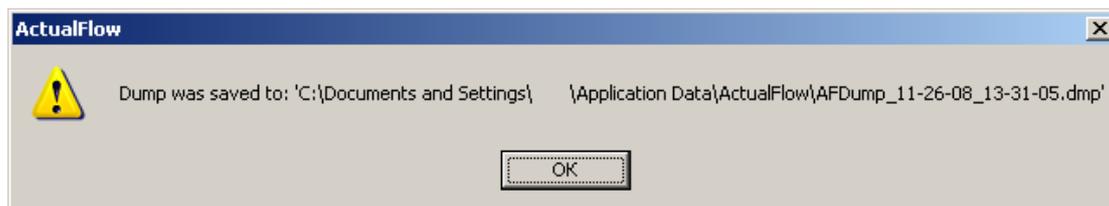


Рис. 2-6 Подтверждение сохранение диагностического дампа

2.4. Менеджер базы данных

2.4.1. Создание, открытие и удаление базы данных

В процессе работы все изменения, вносимые в базу данных, автоматически сохраняются на диск, поэтому для создания новой базы данных необходимо сохранить файл новой базы на жесткий диск компьютера.

Для создания новой базы данных из интерфейса программы нужно выбрать пункт меню **File→Create**, либо воспользоваться комбинацией клавиш **Ctrl-N**. На экране появиться диалог, в котором необходимо выбрать местоположение и имя файла создаваемой базы данных. Кроме файла на диске создается папка с тем же именем, в которой будут храниться все данные: изображения, результаты обработки, параметры данных. Если все было сделано правильно, то будет создана и открыта новая база данных. Вы можете создать произвольное количество баз данных, например по одной базе данных на каждый проект. В программе стоит ограничение на длину пути до файлов базы данных, которая не должна превышать 260 символов. Создание новой базы данных поверх старой с таким же именем запрещено. Для этого надо вручную удалить с диска все файлы старой базы данных.

Для начала работы нужно открыть файл базы данных (**.afdb**), для этого выберите пункт меню **File→Open**, либо нажмите комбинацию клавиш **Ctrl-O**, и в появившемся диалоговом окне выберите файл базы. В результате появится управляющая панель (Рис. 2-1), которая содержит дерево проектов и экспериментов. Все действия над узлами базы данных осуществляются через контекстное меню, вызываемое по щелчку правой кнопкой мыши над узлом дерева базы данных. Открываемый файл базы данных не должен находиться на read-only носителе (например, на CD-R диске) или иметь атрибут только для чтения (read-only).

Для удаления базы достаточно удалить файл и папку базы. Никаких других данных о базе на компьютере не хранится.

2.4.2. Резервное копирование базы

Никто не застрахован от сбоев в работе аппаратного и программного обеспечения, поэтому рекомендуется делать резервные копии важных баз данных (см. также раздел 2.4.6). Также резервные копии полезны, если необходимо освободить место на жестком диске компьютера, записав старые эксперименты на CD или DVD диск.

Для создания резервной копии достаточно скопировать файл (.**afdb**) и папку базы данных на какой-либо носитель (например, на DVD диск); если ваша база содержит ссылки на данные, которые хранятся вне папки базы (например, импортированные с опцией **Use links** изображения, см. 2.4.5.3), то эти данные тоже нужно скопировать.

Для восстановления базы данных из резервной копии достаточно скопировать сохраненные файлы и папки на жесткий диск компьютера, сохраняя при этом их исходное взаимное расположение. Файл и папка базы данных должны находиться в одной папке, путь до этой папки не обязательно совпадает с исходным (до создания резервной копии). Ссылки на данные, хранящиеся вне папки базы, являются абсолютными, поэтому для таких данных путь должен совпадать с исходным.

2.4.3. Управление данными в базе

2.4.3.1. Структура дерева данных

Данные в базе организованы в виде дерева (см. Рис. 2-1). Каждый узел дерева может иметь родителя и потомков. Узел дерева базы данных позволяет получить доступ к соответствующим данным, их параметрам и операциям над ними. Основные виды узлов дерева базы данных:

- Папка (**Folder**)
- Эксперимент (**Experiment**)
- Маска (**Mask**)
- Изображение (**Image**)
- Данные (результат обработки изображения) (**Data**)

Папка служит только для упорядочения экспериментов, каждый эксперимент в базе имеет в качестве родителя папку или корневой узел представляющий базу. Для более удобной ориентации в базе можно создать дерево папок и распределять эксперименты по этим папкам по некоторому логическому принципу.

Эксперимент в базе данных хранит в себе параметры и настройки эксперимента и используется для управления этими параметрами, а также является родителем для узлов изображений, полученных в процессе эксперимента или импортированных, масок и данных, импортированных в базу извне.

Маски являются дочерними узлами эксперимента. Имя такого узла в базе данных строится из постоянной части **Mask** и порядкового номера в базе данных.

Изображение позволяет получать доступ к файлу (паре файлов) растровых изображений, хранящихся на диске. Имя изображения в базе состоит из слова **Image** и порядкового номера узла. Если изображение было получено в результате работы алгоритма, то его имя в базе данных строится аналогично данным (см. ниже). Изображение является родительским узлом для данных, полученных в результате обработки этого изображения. Имя импортированного изображения может быть произвольным (см. 2.4.5.3).

Данные наследуют все свойства изображения, как узла дерева базы данных. Название для данных состоит из названия алгоритма, которым эти данные были получены, и порядкового номера в базе данных. Имя импортированного данного может быть произвольным (см. 2.4.5.1). Все данные имеют свой тип, определяющий структуру файла данных. Например, стереокалибровки, двумерные поля, графики, гистограммы.

Каждый узел дерева базы данных обозначен при помощи иконки, соответствующей его типу. Узлы данных и изображений могут обозначаться иконкой алгоритма, при помощи которого они были получены.

2.4.3.2. Составление выборок данных

Дерево базы данных предлагает несколько способов множественного выделения его узлов для поддержки пакетной обработки данных. Выделенные узлы могут быть обработаны (см. 2.4.3.5), экспортированы (см. 2.4.5) или удалены (см. 2.4.3.3) из базы данных.

2.4.3.2.1. Выделение узлов

Самый простой способ выделить группу данных состоит в следующем: щелчком левой кнопкой мыши установите курсор на первый (верхний в базе) из узлов, которые нужно выделить, и, зажав клавишу **Shift**, щелкните левой кнопкой мыши на последнем узле из выделяемых. При этом выделяются одинаковые узлы между первым и последним узлами (первый и последний узел должны находиться в одном эксперименте и на одной глубине в дереве). Одинаковые узлы – это узлы одного вида, полученные от одной камеры (для узлов изображений и их потомков), имеющие одно имя обработки

(**Processing name**, см. 2.4.3.5) и находящиеся на одном уровне дерева базы. Иначе, можно воспользоваться клавишей **Ctrl** вместо **Shift**, при этом узлы выделяются поштучно и могут находиться на разных уровнях дерева, но должны быть одного вида, то есть нельзя выделить одновременно узлы изображений и данных. Этот способ удобен, когда нужно обработать небольшое количество изображений или полей скорости одним алгоритмом.

При необходимости выделения всех одинаковых узлов в эксперименте следует установить курсор на первый из этих узлов и выбрать в контекстном меню пункт **Select similar** (см. Рис. 2-7). Иногда необходимо добавить к выделению набор узлов того же вида, но находящихся на разных уровнях вложенности или в разных экспериментах, полученные с разных камер, либо имеющие разные имена обработки. В таком случае блоки данных с разными свойствами выделяются последовательно. На первом шаге выделите первый блок данных (например, данные от первой камеры) описанным выше способом. На втором шаге, удерживая клавишу **Shift**, щелкните правой кнопкой мыши на первом узле из следующего блока данных (например, полученном со второй камеры) и выберите в появившемся меню пункт **Select similar**. Второй шаг нужно повторять до тех пор, пока не будет выделен весь массив данных.

2.4.3.2.2. Сортировка выделенных узлов для обработки

Над выделенными таким образом данными можно совершать такие операции как экспорт, удаление, обработка. В случае выбора операции обработки выделенных данных из них формируется отсортированная определенным способом последовательность. Выделенные данные разделяются на наборы, по одному на каждый идентификатор камеры. Каждый набор сортируется по номеру узла (указан в имени в круглых скобках), после чего наборы объединяются один, поочередным выбором узлов из каждого набора. В результате в списке узлов, передаваемых на вход процедуры обработки, чередуются узлы с первой, второй и т.д. камеры. Например, были выделены два набора изображений: полученные с камеры № 1 {image10, image12, image11} и полученные с камеры № 2 {image21, image20, image22}. На вход процедуры обработки данных будет передана последовательность {image10, image 20, image11, image21, image12, image 22}.

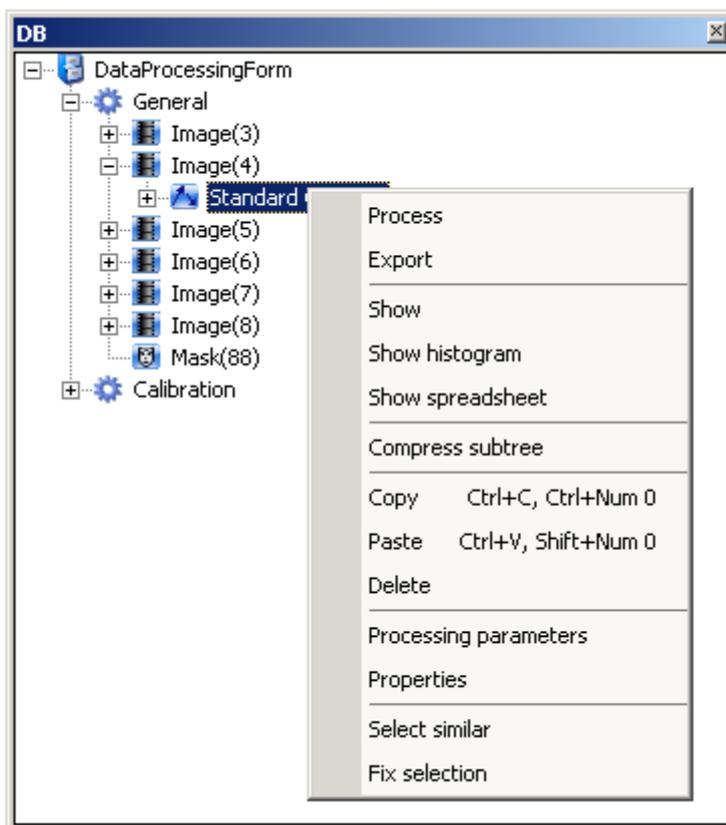


Рис. 2-7 Меню дерева базы данных

2.4.3.2.3. Группы выделения

Описанных выше способов составления выборок данных достаточно для большинства выполняемых операций. Но ряд алгоритмов обработки использует более сложные выборки данных, для составления которых используются группы выделения (**Selection groups**). Для начала рассмотрим два примера использования групп выделения. Процедура восстановления трехкомпонентных полей скорости принимает на вход набор данных, организованных следующим образом (Рис. 2-8): {калибровка левой камеры, рассчитанное по изображению с левой камеры поле скорости, калибровка правой камеры, рассчитанное по изображению с правой камеры поле скорости}. Для пакетной обработки составляются четыре группы: калибровка левой камеры, поля скорости по изображениям с левой камеры, калибровка правой камеры, поля скорости по изображениям с правой камеры. Из этих групп автоматически формируется необходимая последовательность узлов. Процедура расчета поля температуры методом двуцветного PLIF принимает на вход последовательность {калибровка, изображение с первой камеры, изображение со второй камеры}. Для формирования такой последовательности составляются три группы: калибровка, изображения с первой камеры, изображения со второй камеры.

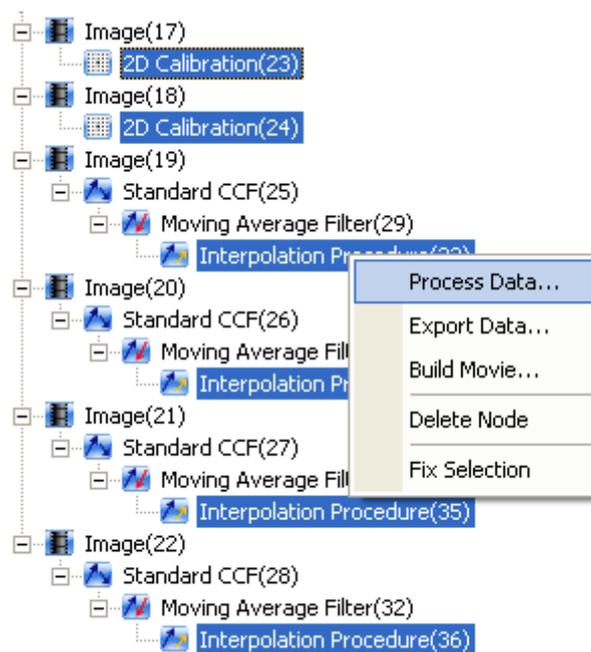


Рис. 2-8. Набор данных для получения трехкомпонентных полей скорости

Новая группа создается по команде **Fix selection**, при этом все узлы из текущего выделения помещаются в создаваемую группу. Зафиксированная группа не может быть изменена. Может быть создано произвольное количество групп выделения. Группы нумеруются, начиная с первой созданной, текущее выделение рассматривается как последняя в списке группа. Узлы добавляются в текущее выделение описанными выше методами, например выделением одинаковых узлов (**Select similar**). Количество узлов, содержащихся во всех группах выделения, отображается в статусной строке, расположенной в нижней части окна программы. Все группы выделения, включая текущее выделение, могут быть удалены командой **Clear fixed selection**.

При запуске обработки узлы в каждой группе выделения сортируются, как описано в разделе 2.4.3.2.2. Далее из групп выделения составляется последовательность путем извлечения верхних узлов поочередно из групп выделения. Проще всего пояснить это на примере. Есть две группы выделения (уже отсортированные): одна содержит пространственные калибровки двух камер {cal_left, cal_right}, вторая (текущее выделение) – двухкомпонентные поля скорости, рассчитанные по изображениям с обеих камер {vel_left_1, vel_right_1, vel_left_2, vel_right_2}. На вход алгоритму будет передана следующая последовательность: {cal_left, vel_left_1, cal_right, vel_right_1, cal_left, vel_left_2, cal_right, vel_right_2}. Процедура реконструкции трехкомпонентного поля скорости возвратит на выходе два поля скорости, которые будут отображаться как дочерние узлы полей скорости vel_right_1 и vel_right_2.

Выборки данных, принимаемые на вход каждой конкретной процедурой обработки, описаны в соответствующих разделах (см. 2.6).

2.4.3.3. Удаление данных

Для удаления узлов базы данных нужно выделить их (см. 2.4.3.2.1) и выбрать в контекстном меню пункт **Delete Node**, либо нажать клавишу **Delete**. Перед удалением выбранных данных система запрашивает подтверждение на удаление узлов данных. Если удаляемый узел содержит потомков, то потомки также удаляются. Если файл данных, соответствующий узлу, является внешним по отношению к базе данных (например, это изображение, на которое в базе хранится только ссылка), то перед удалением такого файла будет запрошено подтверждение. В случае удаления группы узлов это подтверждение выглядит как показано на Рис. 2-9. Таким образом, можно подтверждать удаление каждого узла с внешними данными либо сразу для всех удаляемых узлов.

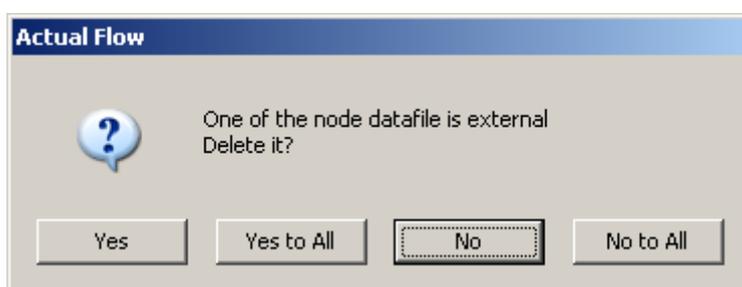


Рис. 2-9 Подтверждение на удаление данных внешних для базы данных (например, изображений импортированных по ссылке)

Невозможно удаление узла базы, открытого в окне визуализации, или при открытом окне обработки.

2.4.3.4. Просмотр данных

Для просмотра данных и их свойств в контекстном меню узлов данных, изображений и масок предусмотрены пункты **Show data**, **Show histogram**, **Show spreadsheet**, **Processing parameters** и **Properties** (см. Рис. 2-7). Пункт **Show data** открывает узел в окне визуализации полей (см. 2.7), графиков или гистограмм, в зависимости от типа данных, при этом используется объект визуализации по умолчанию (например, для полей скорости это векторное поле). Те же действия выполняются по двойному щелчку левой кнопкой мыши на узле дерева базы данных. Пункт **Show histogram** открывает гистограмму, построенную по этому объекту данных (см. 2.7.2), если гистограмма может быть построена. По команде **Show spreadsheet** выбранные данные отображаются в виде таблицы (см. Рис. 2-98). Пункт **Processing parameters** открывает диалог, позволяющий просмотреть параметры алгоритма обработки, при которых получен узел. Если в этом диалоге нажать кнопку **OK**, то текущие значения параметров алгоритма

будут заменены значениями из диалога. Последний пункт (**Properties**) позволяет просмотреть свойства данного узла в окне свойств (см. 2.8).

2.4.3.5. *Обработка данных*

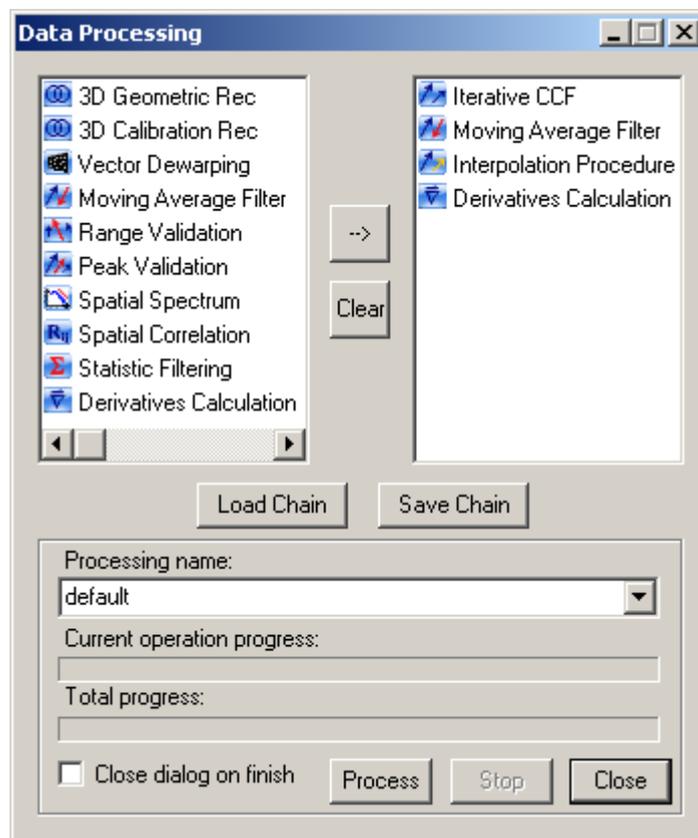


Рис. 2-10. Диалог обработки данных

До начала обработки нужно составить выборку данных для обработки при помощи описанных в разделе 2.4.3.2 функций дерева базы данных. После этого воспользуйтесь командой **Process** из контекстного меню одного из выделенных узлов, открывающей диалоговое окно обработки (см. Рис. 2-10). В левом списке этого окна отображаются доступные для составленной выборки узлы базы алгоритмы, в правом – составленная цепочка алгоритмов. Данные, полученные на выходе первого алгоритма цепочки, передаются на вход второму алгоритму и так далее. Так как тип выходных данных зависит от конкретного алгоритма, то список алгоритмов в левом списке зависит от содержимого правого списка. Для того чтобы добавить алгоритм в цепочку нужно выделить его в левом окне и нажать кнопку →, либо использовать двойной щелчок левой кнопкой мыши по имени алгоритма. В результате алгоритм будет добавлен в конец цепочки, и откроется диалог с его параметрами (в диалоге используются последние использованные значения параметров, хранящиеся в профиле пользователя Windows). Параметры конкретных алгоритмов описаны в разделе 2.6. Кнопка **Clear** позволяет очистить цепочку обработки.

Для удобства работы с результатами обработки (например, для выделения всех результатов данной обработки командой **Select similar**, см. 2.4.3.2.1) следует задать уникальное имя обработки (**Processing name**). Если выбрана опция **Close dialog on finish**, то по завершении обработки диалог закрывается автоматически.

Для начала обработки нужно нажать на кнопку **Process**. Обработка может быть остановлена (кнопка **Stop**) или переключена в режим паузы (**Pause**) (см. Рис. 2-11). Как при остановке, так и при паузе программа сначала заканчивает обработку тех данных из заданной вами выборки, которые обрабатываются в данный момент (это требует некоторого времени), после чего останавливает дальнейшую обработку или переключается в режим паузы. Если в памяти есть еще не сохраненные на диск результаты обработки, то после остановки обработки или переключении в режим паузы программа продолжит их запись на диск до опустошения буфера (в отдельных случаях может потребовать нескольких минут).

Два индикатора (**Current operation progress** и **Total progress**) показывают долю выполненных операций обработки данных. Верхний индикатор отражает долю операций по обработке одной из порций данных, обрабатываемых в данный момент, например, долю обработанных процедурой Standard CCF ячеек изображения. Нижний индикатор показывает долю выполненных операций по обработке всей заданной выборки данных. Скорость движения индикаторов не соответствует затрачиваемому времени, верхний индикатор, как правило, двигается рывками.

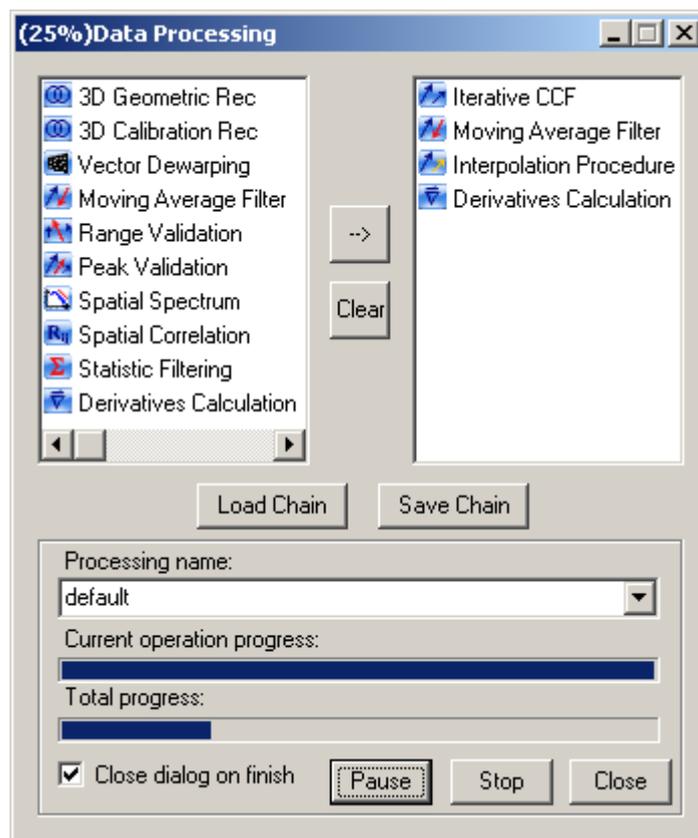


Рис. 2-11 Процесс обработки

2.4.3.5.1. Сохранение и загрузка цепочек обработки

Цепочка алгоритмов с удачно подобранными параметрами обработки ценна сама по себе. Такую цепочку удобно использовать для обработки сходных данных в других экспериментах. Окно обработки позволяет сохранить цепочку алгоритмов в файл и загрузить ранее сохраненную цепочку из файла. Для сохранения составленной цепочки алгоритмов нужно нажать кнопку **Save Chain** и в открывшемся диалоге выбрать имя и путь до файла, в который будет сохранена цепочка. Сохраненную ранее цепочку можно загрузить, нажав кнопку **Load Chain**. В открывшемся диалоге нужно выбрать файл цепочки алгоритмов (**.alg**). Если файл цепочки подходит для обработки выбранных данных, то цепочка будет загружена, и вам будет предложено подтвердить, либо изменить параметры алгоритмов, входящих в цепочку. Если же формат файла не верен, либо тип входных данных цепочки не совпадает с типом данных, выбранных для обработки, то будет выведено сообщение об ошибке.

2.4.4. Копирование/вставка узлов базы

Копирование узлов удобно использовать, например, для создания новых экспериментов, повторяющих все свойства уже существующих: параметры оборудования, масштабный коэффициент.

Копирование и вставка реализованы через буфер обмена операционной системы Windows, поэтому эти функции доступны как внутри одной базы, так и между разными базами данных. Копирование узла базы осуществляется по команде **Copy** контекстного меню выбранного в дереве узла. Вставка скопированного узла из буфера обмена осуществляется командой **Paste** из контекстного меню узла, который должен стать родительским для нового узла. Перед вставкой проверяется, не нарушена ли структура дерева базы, например маска не может быть дочерним узлом изображения (подробно структура базы описана в 2.4.3.1).

Операция копирования узлов по сочетанию клавиш **Ctrl-C** не работает в случае, если открыто окно визуализации.

2.4.5. Импорт/экспорт

2.4.5.1. Импорт данных

В качестве базового формата для экспорта и импорта данных используется текстовый файл с разделенными символом табуляции столбцами. Каждая строка в файле соответствует, например, одному вектору скорости или одной точке профиля. Для корректного импорта файл должен содержать заголовок с названиями столбцов и размерностями следующего формата: **x[mm]**, где **x** – название поля, а в квадратных скобках указана размерность, в данном случае миллиметры. Размерность является опциональной, если ее нет, то используется размерность **unit** (безразмерная величина). Столбцы в заголовке, аналогично столбцам значений, разделяются символом табуляции. Импортируемые двумерные поля данных обязательно должны содержать поля координат **x** и **y**, графики – **I** или **k**. По-умолчанию такой заголовок вставляется в файл при экспорте данных из ActualFlow. Недоступен экспорт и импорт неструктурированных данных, таких как Stereo-PIV и PLIF калибровки. Для импорта данных нужно проделать следующие действия:

1. В контекстном меню узла эксперимента, в который следует импортировать данные, выберите команду **Import data**, в результате откроется диалог (см. Рис. 2-12).
2. Вы можете импортировать все файлы из папки по маске, либо набор выбранных вами файлов. Импортируемые файлы сортируются по имени.
 - а. Для импорта файлов из папки по маске установите переключатель **Import** в положение **Folder**. Далее:

- i. В поле ввода **from** введите путь до папки, файлы из которой следует импортировать (путь может быть введен вручную, или выбран в диалоге, вызываемом по кнопке ...).
 - ii. Укажите маску файлов (**Wildcard**). Переменная часть имени файла обозначается символом *. Так, при маске data*.txt будут импортированы файлы с именами data00.txt и data-exported01.txt.
 - b. Для импорта отдельных файлов установите переключатель **Import** в положение **Files**. Нажмите кнопку ..., и в открывшемся диалоге выделите файлы для импорта и нажмите кнопку **OK**. В поле ввода **from** отображается папка, файлы из которой вы выбрали, поле **Wildcard** не используется.
3. Выберите тип импортируемых данных в выпадающем списке **Data type**. Это может быть поле с регулярной сеткой (**Regular field**, например, поле скорости, полученное методом PIV), поле без сетки (**Irregular field**, например, поле скорости, полученное методом PTV), либо график (**Profile**).
4. Укажите имя для создаваемых узлов (**Data name**), уникальное имя обработки (**Processing name**) и, при необходимости, идентификатор камеры (**Camera ID**). Идентификатор камеры необходимо указывать, например, в случае импорта полей скорости и полей температуры, для регистрации которых использовались разные камеры.
5. Нажмите кнопку **OK** для начала импорта данных. Операция может быть прервана в любой момент. Если при импорте одного из файлов произошла ошибка, то сообщение выводится в окно сообщений (см. 2.3.6), но процесс не прерывается.

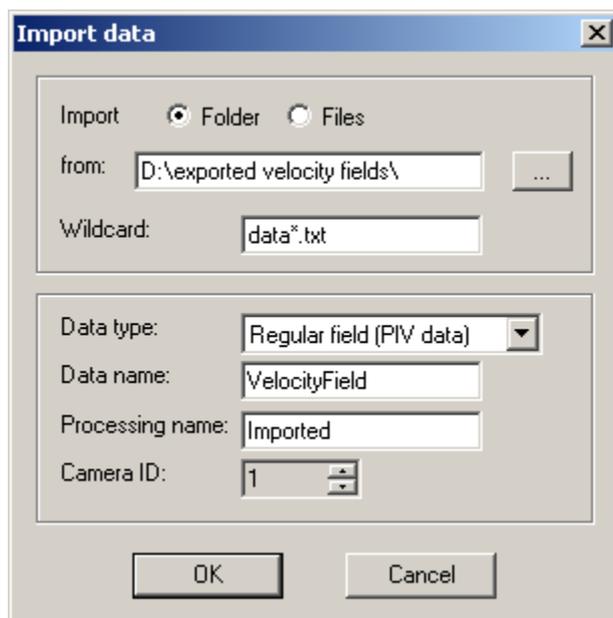


Рис. 2-12 Диалог импорта данных

2.4.5.2. Экспорт данных

Для экспорта данных нужно проделать следующие действия:

1. Выделите в дереве базы данных узлы данных для экспорта. За один раз можно экспортировать данные одного типа, то есть полученные от одного алгоритма. Например, только поля скорости или только профили, построенные по полям температуры.
2. В контекстном меню одного из выделенных узлов выберите команду **Export**, в результате откроется диалоговое окно, показанное на Рис. 2-13.
3. В диалоге выберите список экспортируемых полей из числа содержащихся в данных.
4. Укажите путь до папки, в которую следует экспортировать данные. Путь может быть введен вручную в поле ввода **Export to folder**, либо выбран в диалоге вызываемом по кнопке
5. Введите шаблон имен файлов (**File name template**) для экспортируемых данных. Шаблон включает имя файла и его расширение. На место символа * подставляется уникальный для каждого файла номер. Задайте номер, с которого начинается нумерация файлов в последовательности (**Start number**) и минимальное число цифр в номере (**Number of digits**). Недостающие цифры в номере заполняются нулями, например файл с номером 5 при минимальном числе цифр, равном 4, будет иметь имя data0005.txt. Необходимое для

правильной сортировки файлов число цифр определяется автоматически при открытии диалога, но если начальный номер был изменен, то следует изменить и число цифр.

- По умолчанию при экспорте данные конвертируются в метрическую шкалу. Установив флажок **Do not convert**, вы можете экспортировать данные в той же размерности, в какой они хранятся в базе данных. Если необходимо не включать заголовок в файл, то выберите опцию **No header**. В заголовке файла указываются имена полей и их размерности (формат заголовка описан в 2.4.5.1).
- Нажмите кнопку **OK** для начала экспорта.

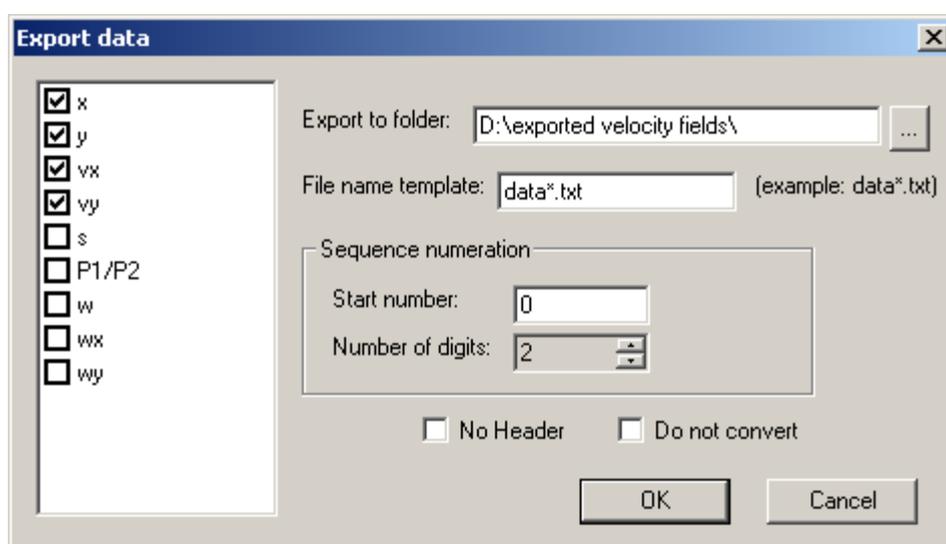


Рис. 2-13 Диалог экспорта данных

2.4.5.3. Импорт изображений

Импорт изображений во многом аналогичен импорту данных (см. 2.4.5.1). Существенное отличие – существование двухкадровых изображений, каждый кадр которого хранится в отдельном файле. Однокадровое изображение считается изображением, имеющим только один кадр – первый. Для импорта изображений нужно проделать следующие действия:

- В контекстном меню узла эксперимента, в который следует импортировать изображения, выберите команду **Import images**, в результате откроется диалог (см. Рис. 2-14).
- Если необходимо импортировать двухкадровые изображения, то установите опцию **Double Frame**.

3. Вы можете импортировать все файлы из папки по маске, либо набор выбранных вами файлов. Файлы сортируются по имени перед их импортом в базу.
 - a. Для импорта всех файлов из папки по маске установите переключатель **Import** в положение **Folder**. Далее:
 - i. В группе параметров **First frame** введите в поле ввода **Path** путь до папки с файлами первых кадров изображений и укажите маску (**Wildcard**) этих файлов. Подробнее см. пункт 3.а в 2.4.5.1.
 - ii. Если импортируются двухкадровые изображения, то повторите шаг i для второго кадра (группа параметров **Second frame**). Как правило, пути до папок с первыми и вторыми кадрами совпадают.
 - b. Для импорта отдельных файлов установите переключатель **Import** в положение **Files**. Далее: Нажмите кнопку ... в группе параметров **First frame**, и в открывшемся диалоге выделите файлы первых кадров для импорта и нажмите кнопку **OK**. В поле ввода **from** отображается папка, файлы из которой вы выбрали, поле **Wildcard** не используется. Если импортируются двухкадровые изображения, то эти действия следует повторить для файлов второго кадра (группа параметров **Second frame**).
4. Укажите имя создаваемых узлов (**Data name**), имя обработки (**Processing name**) и идентификатор камеры (**Camera ID**). Идентификатор камеры необходимо указывать, например, при импорте пар изображений, полученных методом StereoPIV или PIV/PLIF.
5. Для ускорения импорта можно воспользоваться опцией **Use links**, при этом копирования файлов изображений не происходит, а в базе сохраняются ссылки на внешние файлы. Следует быть осторожным при удалении импортированных таким образом узлов, чтобы не удалить файлы изображений.
6. Нажмите кнопку **OK** для начала импорта изображений.

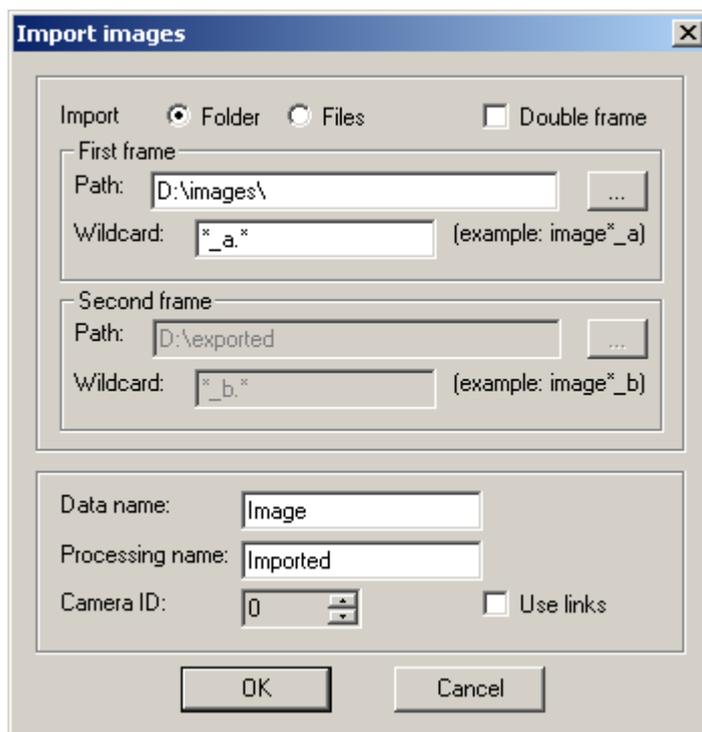


Рис. 2-14 Диалог импорта изображений

2.4.5.4. Экспорт изображений

При экспорте изображений необходимо задать аналогичные экспорту данных параметры (см. 2.4.5.2). Основные отличия – отсутствие возможности контроля формата экспортируемых изображений (и, соответственно, расширения файла) и существование двухкадровых изображений. Изображения экспортируются в том же формате, в котором они хранятся в базе (BMP, PNG и др.). Для экспорта изображений нужно сделать следующие действия:

1. Выделите в дереве базы данных узлы изображений для экспорта.
2. В контекстном меню одного из выделенных узлов выберите команду **Export**, в результате откроется диалог, показанный на Рис. 2-15.
3. Укажите путь до папки, в которую следует экспортировать изображения. Путь может быть введен вручную в поле ввода **Export to folder**, либо выбран в диалоге выбора папки, вызываемом по кнопке
4. Введите шаблон имени файлов (**File name template**, **Start number** и **Number of digits**, подробнее см. п. 5 в 2.4.5.2) для экспортируемых изображений. Формат файла и его расширение при экспорте не изменяются. Необходимо задать различные шаблоны для первого и второго кадров узла изображения (**First**

frame и **Second frame**). Если экспортируются однокадровые изображения, то шаблон имени второго кадра не используется.

5. Нажмите кнопку **OK** для начала экспорта.

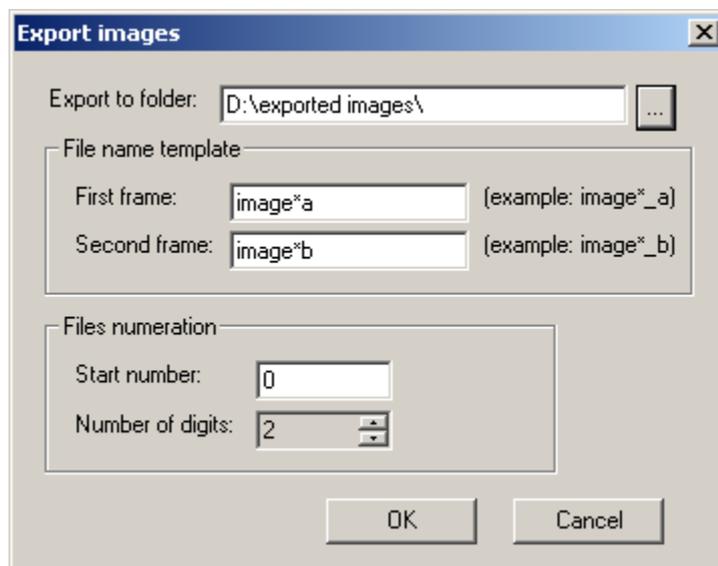


Рис. 2-15 Диалог экспорта изображений

2.4.5.5. Импорт масок

Объект данных «маска» создается в базе методом импорта специально подготовленного изображения в формате **bmp** (см. Рис. 2-16, подготовка такого изображения описана ниже). Для импорта изображения в виде маски нужно выбрать пункт меню **Import Mask** в контекстном меню узла эксперимента, и в открывшемся диалоговом окне выбрать файл изображения. После конвертирования изображения будет выведено сообщение **Mask saved** и узел маски будет добавлен в дерево базы данных.

Маска предназначена для маскирования изображений и полей данных (подробнее про наложение масок см. 2.6.8), поэтому размер маски в пикселях должен совпадать с размером изображений, на которые планируется накладывать сгенерированную маску; для двумерных полей это будет размер изображений, на основе которых были получены эти поля данных. Точка маски может иметь два значения: годная (**normal**) и подлежащая маскированию (**masked**). Области, соответствующие значению **masked**, обозначаются на импортируемом изображении красным цветом (в палитре RGB – Red=255, Green=0, Blue=0). Все остальные цвета расцениваются как **normal**.



Рис. 2-16 Изображение-маска (фрагмент). Красным цветом закрашен неподвижный объект

Приведем один из возможных алгоритмов создания маски:

1. Откройте изображение, на основе которого предполагается создать маску, в окне визуализации (см. 2.4.3.4) и скопируйте содержимое этого окна в буфер обмена при помощи команды контекстного меню **Copy screen** (см. 2.7.1.1), либо сочетания клавиш **Ctrl-C**.
2. Вставьте содержимое буфера обмена в документ какого-либо графического редактора, например MS Paint, при помощи команды **Paste (Вставка)**, либо сочетания клавиш **Ctrl-V**. При этом нужно проследить, чтобы размер холста в редакторе совпадал с размером вставляемого из буфера обмена изображения (MS Paint автоматически увеличивает размер холста до размера вставляемого изображения, если исходный размер холста слишком мал).
3. Теперь в графическом редакторе открыто изображение, идентичное хранящемуся в базе данных. Закрасьте красным цветом (в палитре RGB – Red=255, Green=0, Blue=0) области, подлежащие маскированию, при помощи инструментов, предоставляемых вам графическим редактором.
4. Сохраните полученное изображение на диск в формате 24-bit Windows Bitmap (**bmp**)
5. Импортируйте полученный файл в базу ActualFlow, выбрав пункт меню **Import mask** в контекстном меню узла эксперимента.

Если вы имеете прямой доступ к файлу изображения, хранящемуся в базе, то вместо шагов 1 и 2 вы можете сразу открыть этот файл в графическом редакторе.

2.4.5.6. Экспорт анимации

Один из видов экспорта – это экспорт набора изображений или данных в виде видеоролика. Этот видеоролик в последствии можно посмотреть в любом видеопроигрывателе, при наличии необходимых кодеков. В качестве исходного набора данных могут быть как изображения, так и поля скоростей.

Для того чтобы создать анимацию нужно выбрать несколько узлов одного типа с совпадающими размерами, тогда в контекстном меню появится пункт **Build Movie** (см. Рис. 2-17). При выборе этой команды откроется диалоговое окно (см. Рис. 2-18) с настройками анимации.

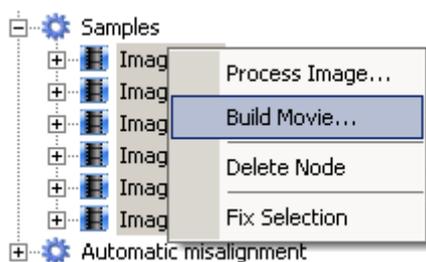


Рис. 2-17 Выделение данных для построения видеоролика

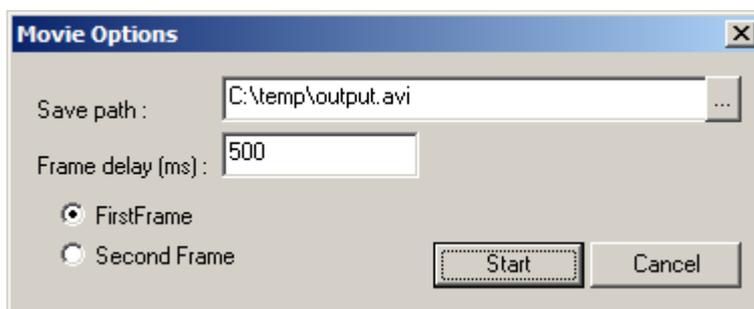


Рис. 2-18 Параметры экспорта данных в виде видеоролика

В первом поле указывается путь, куда нужно сохранить полученный файл. Во втором поле задается временная задержка между сменой видео кадров. Последняя опция имеет смысл, если исходные данные – это изображения, и в этом случае позволяет переключаться между первым и вторым кадром у каждого из узлов изображения, по которым будет построен видео ролик.

По нажатию кнопки **Start** появится окно с выбором кодека для сжатия данных (см. Рис. 2-19). В списке перечислены все кодеки для видео, установленные в вашей системе.

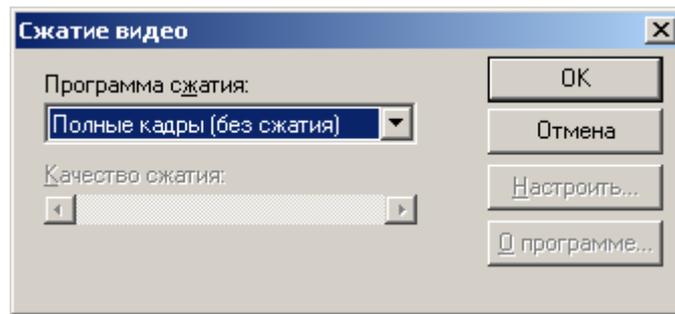


Рис. 2-19 Настройки кодека для сжатия данных

По умолчанию будет предложен вариант **Uncompressed** (без сжатия). Если вы хотите, чтобы полученная анимация гарантированно проигрывалась на всех платформах, без требования предустановленных кодеков, то стоит выбрать вариант «без сжатия». Если же вы хотите уменьшить размер конечного файла, то нужно выбрать подходящий кодек. В виду большого количества возможных кодеков, описание опций кодирования выходит за рамки данного руководства.

Так как параметры отдельных полей отличаются, то перед построением видеороликов рекомендуется отключить автоматическое определение пределов палитры в параметрах отображения (см. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

2.4.5.7. Импорт/экспорт эксперимента

В процессе работы с данными иногда бывает необходимо перенести большую группу данных из одной базы в другую, или временно удалить часть данных из базы, например, связи с исчерпанием места на диске, где находятся данные. Выполнить эти операции помогает импорт/экспорт эксперимента.

Сначала рассмотрим экспорт эксперимента. В контекстном меню узла эксперимента выберите команду **Export experiment**, при этом будет открыт диалог выбора папки, в которую будут сохранены данные эксперимента. Папка может находиться как на локальном, так и на сетевом диске. Операция экспорта не изменяет состояние текущей открытой базы данных, а только создает копию выбранных данных. После успешного завершения операции в выбранной вами папке появляется файл описания экспортированных данных эксперимента (.afee, ActualFlow Exported Experiment), xml файл свойств эксперимента и папка с данными – дочерними узлами экспортированного эксперимента. Все вновь созданные объекты на диске, относящиеся к эксперименту, имеют одинаковое имя (не путать с расширением).

Импорт эксперимента производит обратную операцию, заключающуюся в добавлении экспортированного эксперимента в текущую открытую базу данных. Для импорта эксперимента выберите в контекстном меню корневого узла базы данных или узла

папки команду **Import experiment**. После подтверждения операции, необходимо указать файл, содержащий список экспортированных узлов (*.afee). Во время импорта эксперимента происходит активное обновление структурного файла текущей базы, поэтому во избежание повреждения основного файла базы данных в результате системного сбоя рекомендуется сделать его резервную копию. Резервная копия позволит восстановить состояние базы как до операции импорта.

2.4.6. Восстановление базы данных

Серьезный сбой в работе программы или компьютера может привести к порче файла структуры базы данных. Специально для таких случаев в программе предусмотрена возможность восстановления файла структуры данных по набору файлов, находящихся в папке базы данных. В процессе восстановления сканируется папка базы данных, включая вложенные в нее папки, и по содержащейся в ней информации восстанавливаются связи между элементами дерева базы данных. После восстановления в файле структуры содержится связанное дерево элементов базы с корневым узлом базы. Вишечные узлы, для которых не было найдено родителей, отбрасываются. Во время восстановления происходит проверка всех ссылок на файлы с данными, на которые ссылаются узлы базы. В случае отсутствия необходимых данных в окне сообщений (см. раздел 2.3.6) выводится дополнительная информация.

Функция восстановления вызывается из главного меню программы по команде **File→Database recovery** или комбинацией клавиш **Ctrl-R**. В открывшемся диалоге следует ввести путь до папки восстанавливаемой базы **Recovery path** и название нового файла структуры **Recovered database name** (см. Рис. 2-20). По-умолчанию поля ввода диалогового окна заполнены данными, указанными при последнем открытии этого диалога.



Рис. 2-20 Диалоговое окно функции восстановления файла структуры данных базы

Программное обеспечение сохраняет файл структуры в формате, поддерживаемом данной версией программы. После завершения операции восстановления в окно сообщений программы выводится информация о количестве прочитанных и

восстановленных элементов базы данных и предлагается открыть восстановленную базу данных в программе.

2.4.7. Дефрагментация базы данных

В процессе длительной работы с базой данных файл структуры базы данных постепенно фрагментируется в файловой системе, т.е. разбивается на несколько разрозненных фрагментов. Фрагментация файла структуры может приводить к увеличению времени загрузки базы в программу. Для устранения дефрагментации возможно вызвать команду в главном меню **File->Defragment database** или инициировать ее нажатием комбинации клавиш **Ctrl-F**. Дефрагментация проводится либо для открытой в данный момент базы либо, если в ActualFlow не открыто ни одной базы, выводится стандартное диалоговое окно для выбора файла структуры, который необходимо дефрагментировать. Степень фрагментированности файла можно проверить бесплатной утилитой **contig** (www.sysinternals.com) или внешним модулем **NTFSInfo** для программы **FAR**.

2.5. Проведение эксперимента

2.5.1. Создание эксперимента

Для создания эксперимента выберите узел папки, в которой будет находиться эксперимент, и с помощью пункта **Add Experiment** контекстного меню вызовите окно добавления эксперимента (см. Рис. 2-21). В предложенные поля введите название эксперимента и произвольный комментарий к эксперименту. В этом же окне выберите устройства, которые будут участвовать в эксперименте. Для этого выделите устройство из левого списка и двойным щелчком мыши или нажатием на кнопку **→** добавьте его в правый список. Если устройство допускает предустановленные настройки, то будет показано окно с некоторыми параметрами, которые сохраняются в настройках эксперимента. Если устройство является синхронизируемым от другого устройства, то для добавления его в эксперимент, необходимо предварительно добавить устройство синхронизации. Синхронизируемые устройства при добавлении в эксперимент резервируют управляющие BNC выходы синхронизирующего устройства. По этой причине при попытке добавить, например два лазера или больше 4-х камер будет выведено сообщение, что управляющий выход занят другим устройством. Очистить список выбранных устройств можно кнопкой **Clear**.

Кнопки **Load** и **Save** позволяют загружать и сохранять выбранные наборы устройств (без их параметров) в формате в *.dvc файл. Сохраненная конфигурация позволяет быстро загружать готовые наборы устройств, например, для PIV или Stereo PIV измерений.

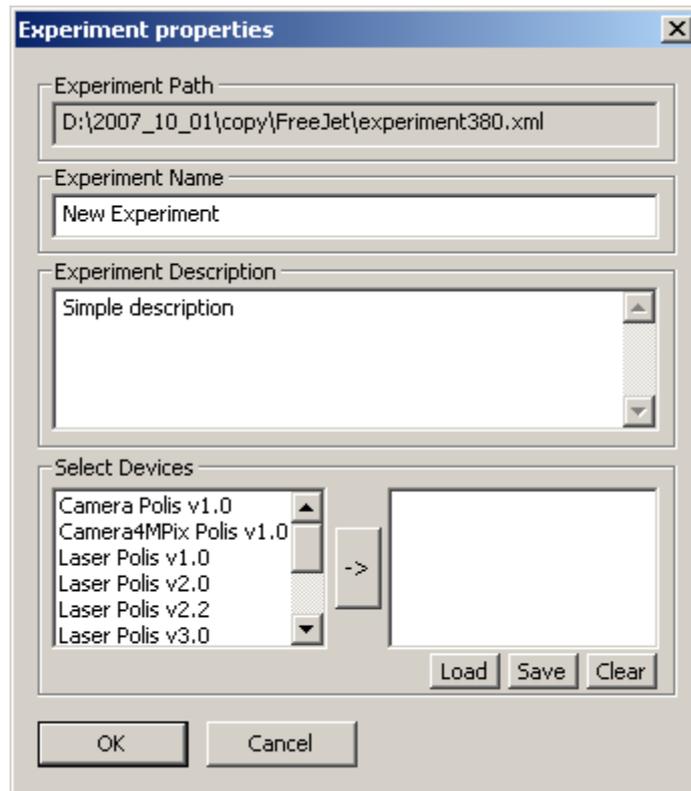


Рис. 2-21 Диалоговое окно добавления эксперимента

2.5.2. Окно управления экспериментом

Управление экспериментом осуществляется при помощи диалогового окна с закладками (см. Рис. 2-22), вызываемого по команде **Run experiment** в контекстном меню узла эксперимента в окне базы, либо по двойному щелчку левой кнопкой мыши по узлу эксперимента. Модуль управления устройством может предоставлять окно для настройки параметров устройства в виде закладки в диалоге проведения эксперимента. Запуск и останов сбора данных осуществляется нажатием кнопок **Run** и **Stop** соответственно. Если в эксперименте есть мастер-устройство, которым в стандартной комплектации является устройство синхронизации, то оно может остановить сбор данных в соответствии со своими настройками. Установив опцию **Show Data**, можно наблюдать на экране последнее снятое камерой изображение. Для сохранения изображений, получаемых с камер, в базу нужно установить опцию **Save to DB**.

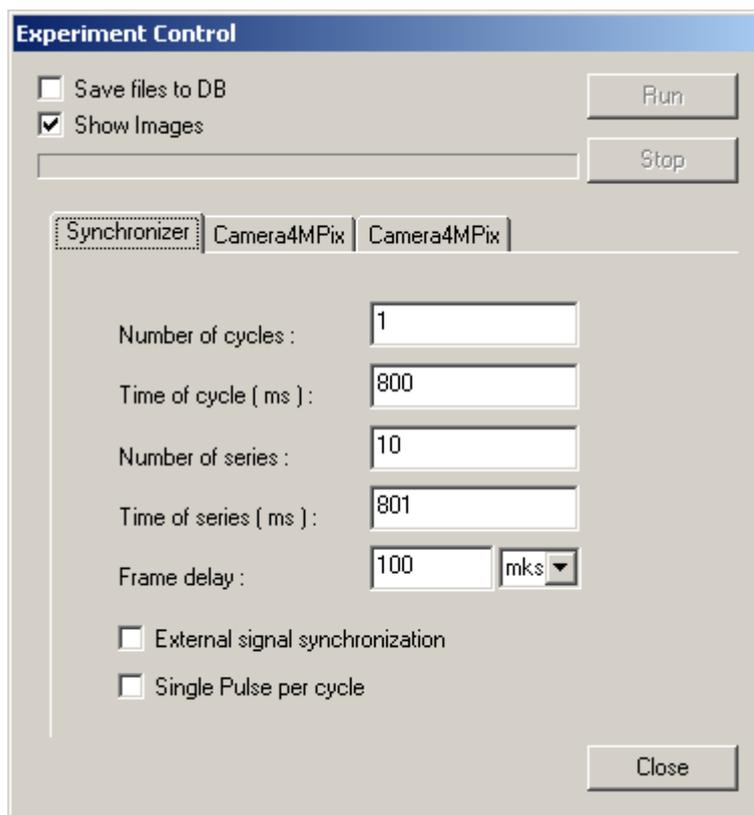


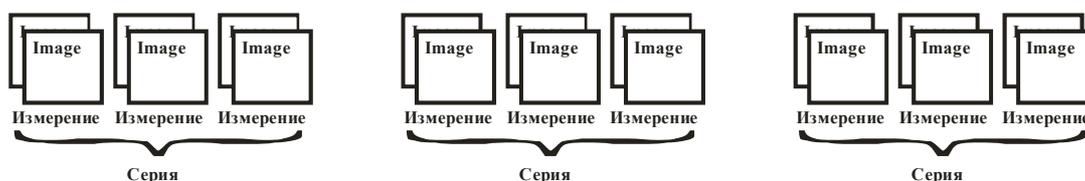
Рис. 2-22 Диалоговое окно проведения эксперимента

2.5.3. Настройка параметров эксперимента

2.5.3.1. Установка временных параметров эксперимента

Если в процессе создания эксперимента было выбрано устройство синхронизации, первой закладкой в диалоге проведения эксперимента будет окно настроек синхронизирующего процессора, которое задает порядок проведения и временные параметры эксперимента. Чтобы понять назначение всех параметров, сначала нужно рассмотреть принцип работы синхронизатора.

Для начала следует обратить внимание, на используемые термины:



Под измерением (или циклом) понимается процедура, при которой синхронизатор обрабатывает полный цикл один раз. Каждый из управляющих выходов может обработать не больше одного раза за время измерения. Время между измерениями

(или циклами) – **Time of cycle** – соответствует длительности цикла, которая задается программно. Строго говоря, она соответствует задержке между двумя запусками цикла.

Под серией понимается последовательный запуск (одни за одним) заданного числа циклов (**Number of cycles**). Для серии также существует время между сериями **Time of series**, и количество серий **Number of series**. В режиме внутренней синхронизации серия запускается сразу по истечению времени **Time of series**.

При работе в режиме внешней синхронизации (**External signal synchronization**) серия запускается по внешнему синхроимпульсу. При этом в течение времени **Time of series** после получения внешнего синхроимпульса все остальные сигналы извне синхронизатором игнорируются. По истечении времени **Time of series** синхронизатор снова переходит в состояние ожидания внешнего сигнала. Синхронизатор заканчивает свою работу только после запуска **Number of series** серий, либо по программному сигналу остановки.

2.5.3.2. Установка параметров камеры

В диалоге управления экспериментом есть возможность задания параметров камеры (см. Рис. 2-23). Параметры **Origin X**, **Origin Y**, **Width**, **Height**, задают начальные координаты, ширину и высоту окна измерения. Ширина изображения (**Width**) должна быть кратна двум. Можно также задать разрядность АЦП камеры (**Bit depth**). При разрядности 8 бит полученные изображения сохраняются в 256-цветный *.bmp файл, если разрядность равна 10 битам, то изображения сохраняются в *.png файле с 16 битами на канал. При выборе разрядности АЦП нужно помнить, что увеличение разрядности больше 8 бит не оказывает значимого влияния на точность расчета поля скорости методом PIV. В то же время, увеличение разрядности изображения приводит к увеличению нагрузки на процессор во время сбора изображений и увеличивает время их записи, что вынуждает уменьшать частоту измерений.

Также можно управлять ориентацией изображения, для этого в группе параметров **Flip image** нужно отметить галочки **Horizontal** или **Vertical**, чтобы отразить изображение относительно горизонтальной или вертикальной оси соответственно. Необходимо отметить, что перед отражением изображение обрезается согласно заданному размеру окна (группа параметров **Window**).

Перед оцифровкой аналоговый сигнал с матрицы аппаратно усиливается. Коэффициент усиления (**Amplifier**) задается при помощи бегунка, либо указывается в поле ввода, и определяет чувствительность камеры. Коэффициент усиления должен выбираться таким образом, чтобы как можно более полно использовать диапазон возможных значений яркости изображения. Например, если мы регистрируем изображения частиц, максимальная яркость которых соответствует половине

возможного диапазона, это означает что коэффициент усиления можно увеличить. При этом не следует допускать пересвечивания изображений частиц, так как это влияет на точность расчета поля скорости. Пересвеченное изображение частицы имеет «полочку» из максимально светлых значений в центре, где должен находиться пик.

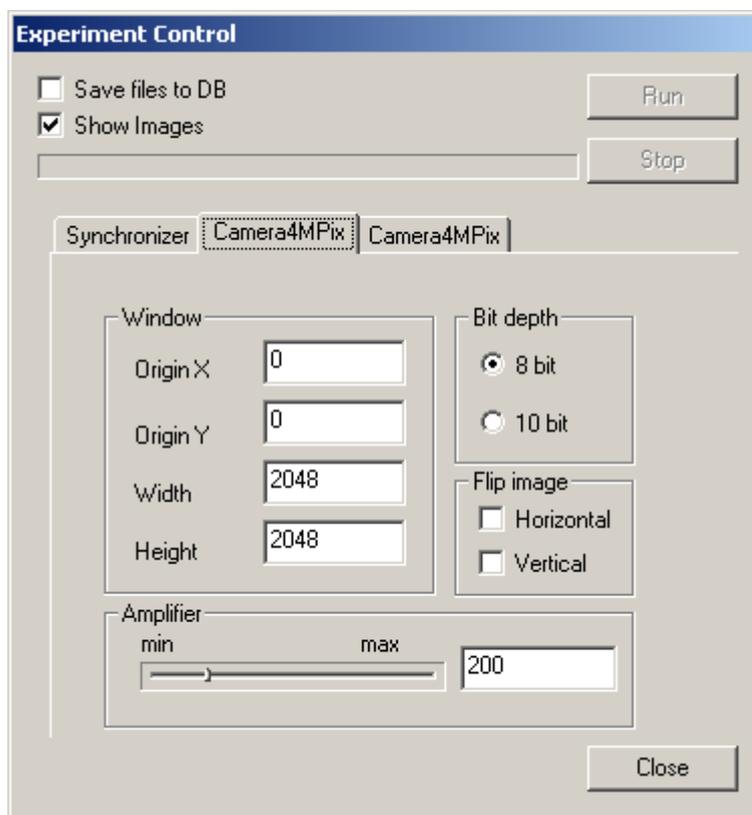


Рис. 2-23 Настройка параметров камеры

2.5.3.3. *Запуск системы по внешнему событию*

В некоторых случаях может возникнуть необходимость запуска эксперимента от внешнего события; для этих случаев предусмотрена возможность внешней синхронизации. Чтобы запустить эксперимент в режиме внешней синхронизации нужно выбрать опцию **External signal synchronization** в закладке управления синхронизирующим устройством. Причем внешний синхронизирующий сигнал запускает серию, а не цикл. Если сигнал приходит до окончания предыдущей серии, то он игнорируется.

2.5.3.4. *Однокадровый режим*

Измерительная система «ПОЛИС» позволяет регистрировать изображения частиц в два момента с временной задержкой от десятков микросекунд, что позволяет измерять потоки с околосвуковыми скоростями. Однако если измеряемые скорости

соответствуют временным задержкам между кадрами больше чем минимально возможное время между сериями, то удобнее регистрировать однокадровые изображения. В этом режиме результатом каждого измерения является один кадр изображения частиц. Любые два последовательных измерения формируют необходимую для расчета поля скорости пару изображений. Таким образом, для расчета n полей скорости необходимо $n + 1$ изображений в однокадровом режиме и $2n$ изображений в двухкадровом режиме.

Для включения однокадрового режима выберите опцию **Single Pulse per cycle**, после чего доступными для редактирования останутся только поля **Number of series** и **Time of series**, которыми можно регулировать количество кадров и время между однокадровыми изображениями, соответственно. Время между сериями (**Number of series**) в однокадровом режиме будет интерпретироваться как время между кадрами.

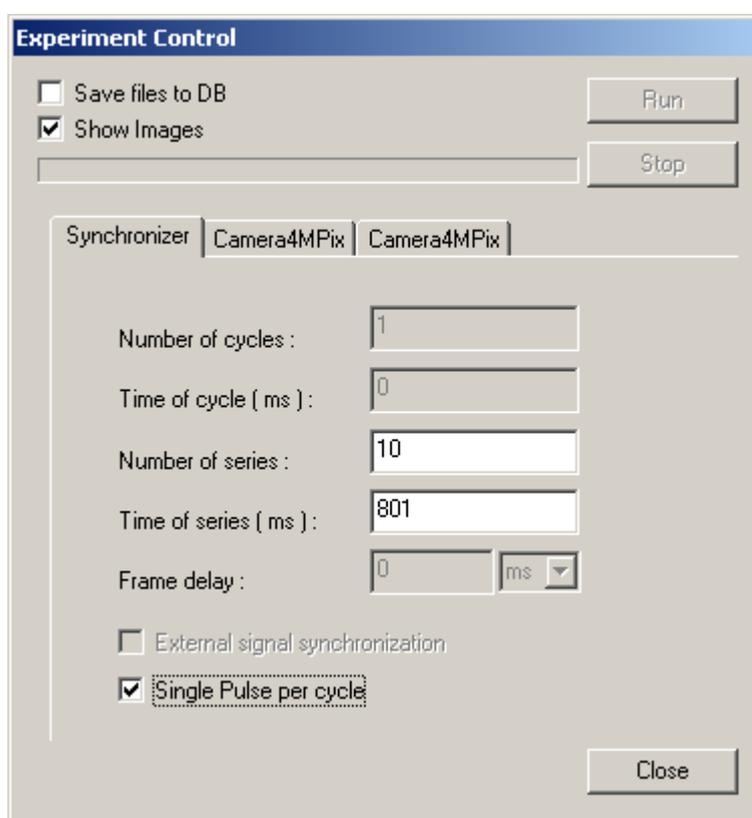


Рис. 2-24 Параметры эксперимента в однокадровом режиме

2.5.4. Проведение эксперимента

После того как были установлены все параметры, можно запустить эксперимент кнопкой **Run**. Если вам нужно остановить эксперимент, нажмите кнопку **Stop**.

В случае выбора опции **Save to DB** полученные данные сохраняются в базе данных. Опция **Show Data** позволяет визуализировать полученные данные в режиме реального

времени. Если в эксперименте участвуют несколько камер, то для каждой из них откроется отдельное окно визуализации. Окно визуализации реального времени позволяет, как и в случае обычной визуализации, переключаться между кадрами, увеличивать изображение и т.д. (см. 2.7.1.1).

До проведения эксперимента необходимо настроить оптическую схему установки, в которой будут проводиться измерения. Необходимо завести лазерный нож в нужную плоскость, сфокусировать объектив камеры, добиться нужной концентрации частиц в изображении на элементарную область. Наблюдаемое на изображении число частиц можно регулировать, изменяя диафрагменное число объектива камеры и мощность лазера, либо увеличивая концентрацию частиц в растворе. На время настройки системы экспериментатору необходимо в режиме реального времени отслеживать получаемое камерой изображение потока. Эти данные нужны лишь на время настройки системы и не должны сохраняться в базу данных, поэтому, в режиме настройки удобно ввести большое (например, 10000) количество серий измерений (**Number of series**), установить опцию **Show Images** и отключить **Save files to DB**. По окончании процесса настройки можно остановить эксперимент, нажав кнопку **Stop**.

Когда в эксперименте участвуют более одной камеры, то регистрируемые ими изображения сохраняются строго последовательно, порциями. Одна порция включает по одному изображению с каждой камеры, все изображения в порции сняты в один момент времени. Запись очередной порции происходит только в том случае, если каждая из камер передала изображение, при этом порядок чередования изображений от каждой из камер сохраняется одним и тем же.

Если данные в процессе эксперимента сохранялись в базу, то по окончании эксперимента выводится сообщение, которое сообщает, сколько порций изображений было сохранено. Если фактическое количество порций не равно количеству измерений, которое вы хотели провести (**Number of series * Number of cycles**), то это может означать, что во время проведения эксперимента произошел сбой, и несколько изображений были потеряны. Такую серию измерений необходимо переделать, особенно при использовании нескольких камер, так как уже нельзя гарантировать, что изображения в каждой порции соответствуют одному моменту времени.

2.5.4.1. Масштабный коэффициент

Так как все данные получают оцифрованными, и последующая обработка оперирует перемещениями в пикселях и условными единицами временных задержек, то данные в базе хранятся в пересчете на цифровые аналоги физических величин. Для того чтобы получить данные в размерных величинах СИ, нужно знать коэффициенты для каждой из участвующих величин. Так, для получения перемещения или координат в метрах или

миллиметрах нам нужен масштабный коэффициент расстояния (**Scale factor**), а для получения скорости используется значение задержки между кадрами (**Frame delay**). Эти коэффициенты хранятся среди параметров эксперимента, и для вновь созданного эксперимента равны 1 мм/пиксель и 1 секунда соответственно. Для корректного отображения значений скорости и координат необходимо задать масштабный коэффициент для каждого узла эксперимента.

Масштабный коэффициент расстояния может быть рассчитан, либо задан напрямую. Для расчета масштабного коэффициента в измерительную область помещается объект, по фотографии которого можно восстановить размеры между двумя, как минимум, точками на объекте, например, этим объектом может быть линейка, а начальной и конечной точками – любые две ее риски. После получения изображения этого объекта в контекстном меню узла отснятого изображения выберите команду **Get Scale Factor**. В появившемся окне (см. Рис. 2-25) установите опцию «задать первый маркер» (**Place marker A**) и кликните мышкой в начальной точке на изображении, затем установите опцию «задать второй маркер» (**Place marker B**) и установите второй маркер в конечной точке. Задав положение двух маркеров, введите значение расстояния между этими маркерами (в миллиметрах) в поле **Distance**, после чего переместите курсор в любое другое поле ввода (поле **Distance** должно потерять фокус ввода), в результате будет рассчитан масштабный коэффициент, и его значение будет выведено в поле ввода **Scale Factor**. Вы можете изменять значение расстояния и положение маркеров, при этом поле **Scale Factor** будет автоматически обновляться. Чтобы сохранить рассчитанный коэффициент в базе, нажмите кнопку **Save**. Иначе, можно ввести известное вам значение масштабного коэффициента в поле ввода **Scale Factor** и сохранить это значение кнопкой **Save**.

При открытии окна определения масштабного коэффициента (см. Рис. 2-25) в поле ввода **Scale Factor** выводится текущее его значение.

Заметим, что для трехкомпонентных полей скорости масштабный коэффициент рассчитывается из калибровки автоматически, и такие поля хранятся в метрической шкале.

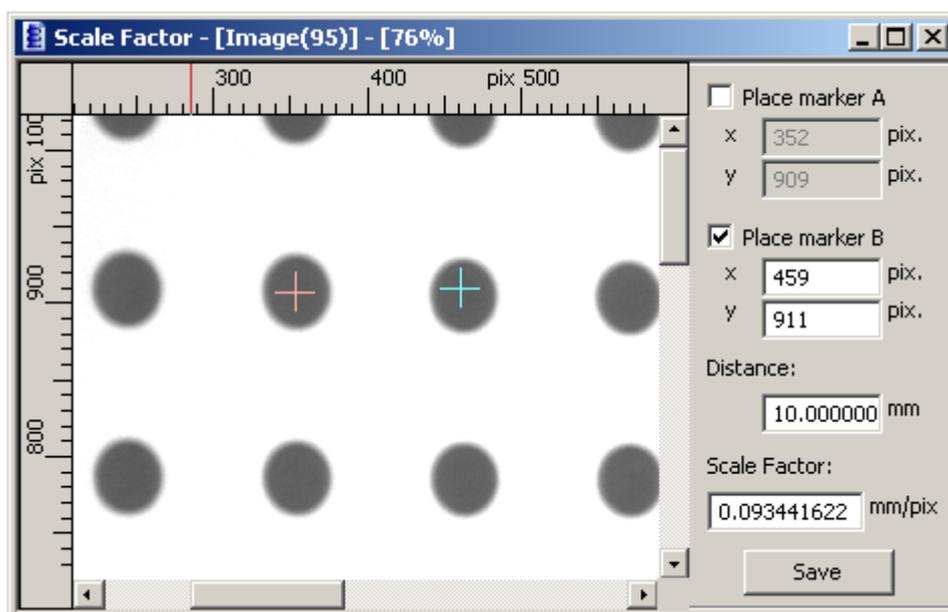


Рис. 2-25 Окно для определения масштабного коэффициента.

2.6. Процедуры обработки данных

2.6.1. Корреляционные алгоритмы обработки изображений

Описание алгоритмов данного раздела соответствует версии 1.0.0.22 библиотеки PIV алгоритмов ProcLib.dll.

2.6.1.1. Стандартный кросскорреляционный метод

Реализованный в программном обеспечении ActualFlow стандартный кросскорреляционный алгоритм описан в главе 1.2.1. Алгоритм может применяться к одному двухкадровому и паре однокадровых изображений, как полученных в процессе эксперимента, так и импортированных. Результатом работы алгоритма является двухкомпонентное поле скорости.

Установка параметров алгоритма осуществляется в диалоговом окне, изображенном на Рис. 2-26, Рис. 2-27, Рис. 2-28.

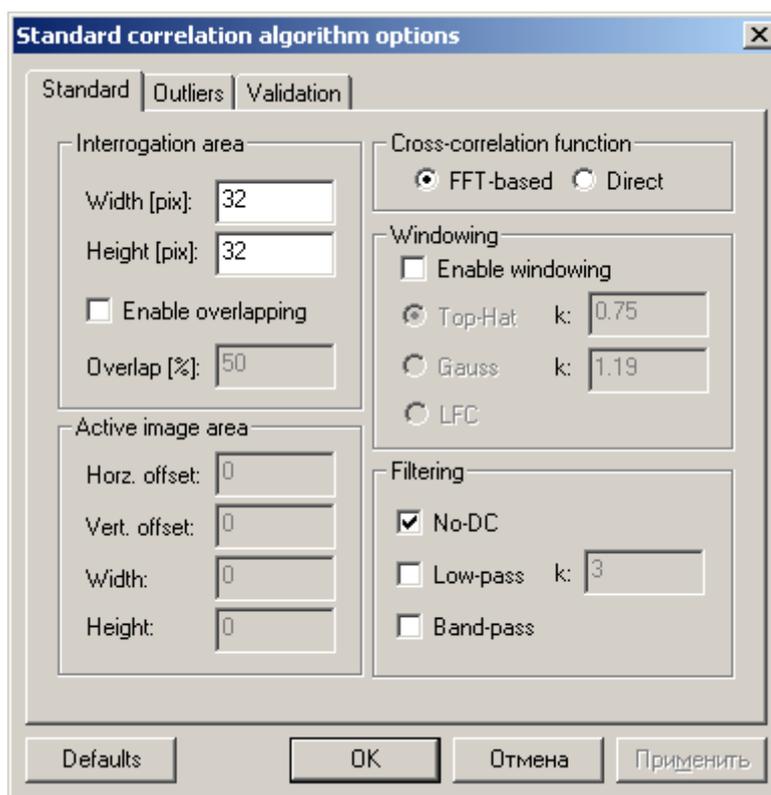


Рис. 2-26 Окно параметров расчета корреляционной функции для кросскорреляционных алгоритмов

В разделе **Interrogation area** указываются конечные размеры расчетной области по горизонтали и вертикали, а так же процент перекрытия областей. Размер расчетной области должен быть кратным степени двойки. Ограничение на размер области снизу – 8 пикселей.

Раздел **Cross-correlation function** предназначен для выбора метода расчета кросскорреляционной функции через преобразование Фурье – **FFT-based**, либо прямым вычислением свертки – **Direct**. При выборе опции **FFT-based** алгоритм работает быстрее, чем с опцией **Direct**. Выбор опции **Direct** позволяет избежать нежелательных эффектов, присущих преобразованию Фурье [2], в частности систематической ошибки определения смещения частиц. При выборе опции **Direct** снимаются жесткие ограничения на размеры расчетной области **Width** и **Height**. Становится возможным устанавливать любые четные значения **Width** и **Height**, большие либо равные 4 пикс, например **Width=12**, **Height=10**. В случае выбора опции **Direct** применение фильтрации в частотной области невозможно, поэтому элементы управления в области **Filtering** блокируются.

В разделе **Windowing** указываются параметры оконных функций, применяемых при расчете (см. 1.2.1.1).

В разделе **Active image area** пользователь указывает размер области от изображения, к которой будет применен алгоритм.

В разделе **Filtering** выбираются фильтры, применяемые в пространстве Фурье при расчете корреляционной функции. Может быть использовано одновременно несколько фильтров (см. 1.2.1.2).

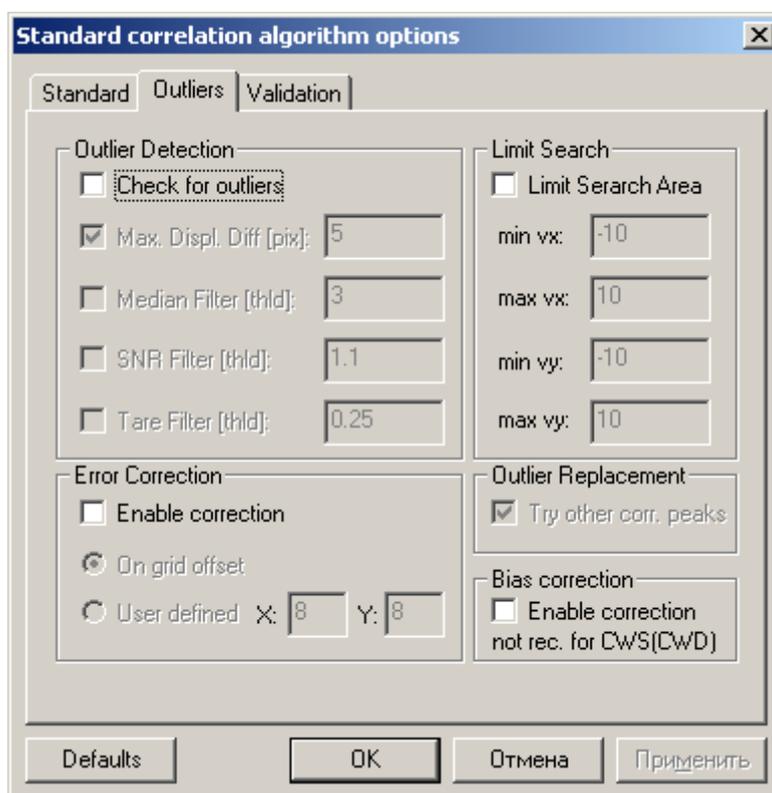


Рис. 2-27 Окно отсева неверных пиков на корреляционной плоскости

На Рис. 2-27 изображено окно установки параметров отсева неверных пиков корреляционной функции.

Limit Search: здесь пользователь указывает область на корреляционной плоскости, в которой следует искать пик. Ограниченная область поиска пика позволяет уменьшить вероятность появления неверных векторов.

Error Correction: здесь используется алгоритм Correlation Based Correction, описанный в главе 1.2.3. Опция **Enable correction** определяет, будет ли применяться алгоритм коррекции ошибок. Переключатель **On grid offset** и **User defined** указывает тип смещения между перемножаемыми корреляционными функциями: смещение либо задается автоматически, основываясь на размере сетки, либо вводится пользователем вручную. Не стоит задавать величину смещения больше размера окна в соответствующем направлении.

В случае не выполнения критериев **Outliers Detection** для максимального пика при использовании опции **Outliers Replacement: Try another corr. Peaks** исследуется следующий по значению пик, и т.д. В критерии **Outliers Detection** входят:

Max. Displ. Diff. – критерий не выполняется, если разница между значением скорости в данном узле, а так же более чем в четырех соседних узлах (из восьми непосредственных соседей), выше указанного значения. Разница указывается в ρ изображения.

Применение **Median filter** для данного узла и соседних узлов.

SNR Filter – метод отсева по отношению сигнал/шум, описанный в главе 1.2.4.1.

Tare Filter – критерий на величину поправки к скорости на текущей итерации по отношению к модулю скорости на предыдущей итерации.

Флажок **Enable correction** в области **Bias correction** позволяет включать и выключать коррекцию систематической ошибки, связанной с неявным умножением корреляционной функции на весовую функцию свертки ограниченных по размерам окон [2]. Активация данной опции предполагает дополнительные вычисления, поэтому алгоритм начинает работать немного медленнее, чем без ее активации. Также иногда наблюдается небольшое увеличение ошибочных векторов в результирующем поле скорости, однако верные вектора освобождены от систематической ошибки.

В окне, изображенном на Рис. 2-28, задаются параметры отсева векторов на каждой итерации, кроме последней. Методы отсева применяются в следующей последовательности: **Range Validation, Peak Validation, Moving Average**.

Range Validation – отсев векторов по абсолютному значению скорости, описанный в разделе 1.2.4.3.

Peak Validation – отсев векторов по критерию сигнал/шум, описанный в разделе 1.2.4.1.

Adaptive Median Validation – отсев векторов по локальному медианному значению. Все управляющие элементы данной области в точности соответствуют управляющим элементам алгоритма, который описан в разделах 1.2.4.3, 2.6.3.3.

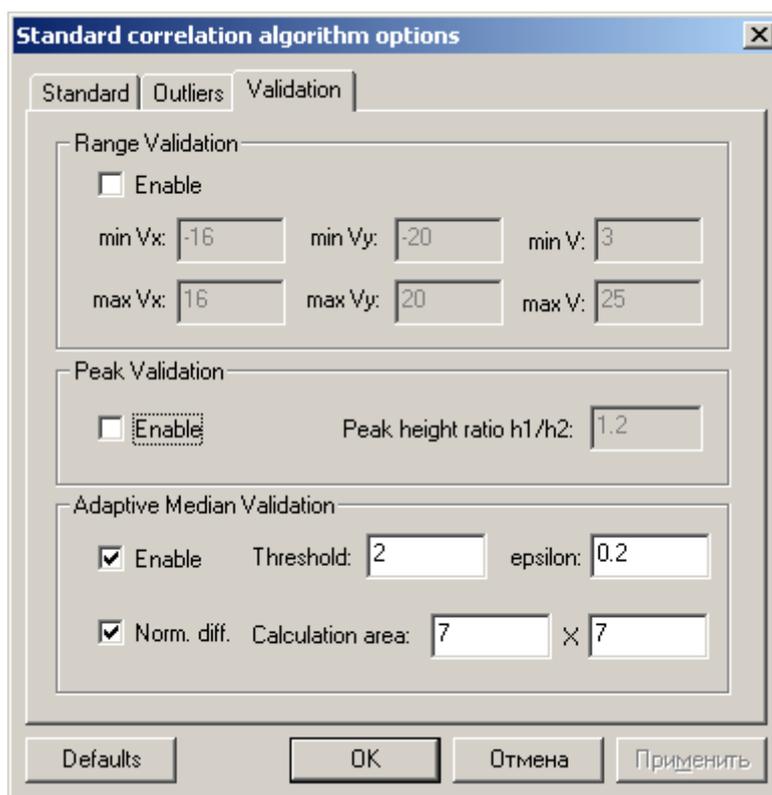


Рис. 2-28 Окно отсева неверных векторов по различным критериям на каждой итерации

2.6.1.2. Итерационный кросскорреляционный метод

Итерационный кросскорреляционный алгоритм является расширением стандартного кросскорреляционного алгоритма (см. раздел 1.2.2).

В итерационном алгоритме объединены адаптивные подходы multiple-pass и multigrid. Multiple-pass подход представляет собой последовательную обработку-уточнение поля скорости. Он позволяет расширить динамический диапазон измеряемых скоростей, увеличить соотношение сигнал/шум результата за счет большего количества коррелированных частиц и, одновременно, уменьшить ошибку расчета поля скорости. Multigrid подход состоит в последовательном уменьшении размера расчетной области, что позволяет увеличить пространственное разрешение результата расчета. При использовании данного алгоритма указывается количество итераций (Рис. 2-29 и Рис. 2-30):

Number of iterations: n = – количество итераций, проводящихся без переразбиения расчетной области.

Number of refinement steps: N = – количество шагов уточнения сетки, между которыми проводятся итерации без переразбиения.

Total number of iterations: $n*(N+1)$ = – полное количество итераций в обработке итерационным алгоритмом.

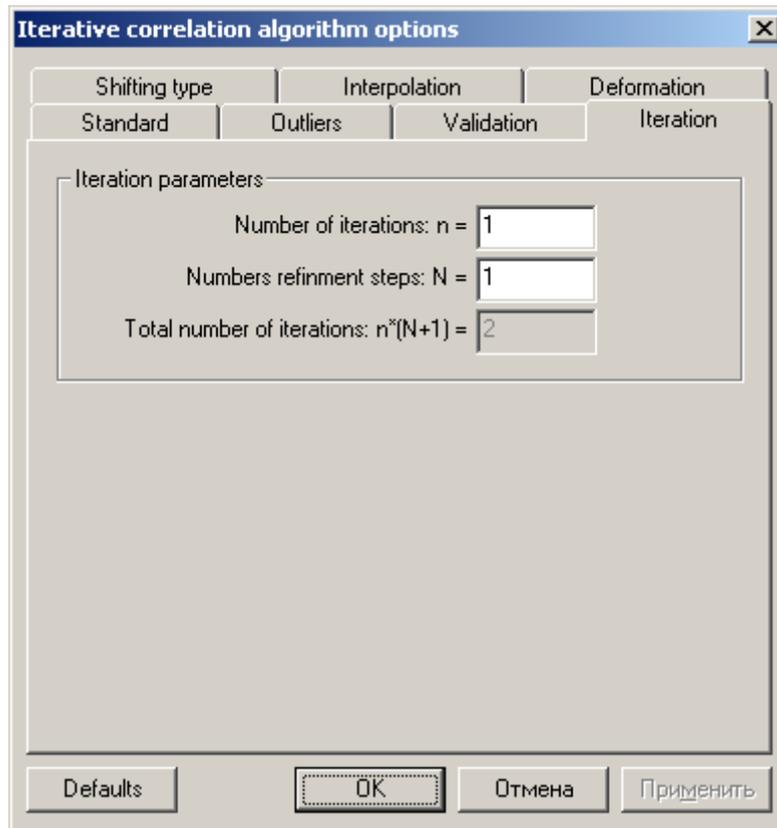


Рис. 2-29 Задание количества итераций при использовании итерационного кросскорреляционного алгоритма

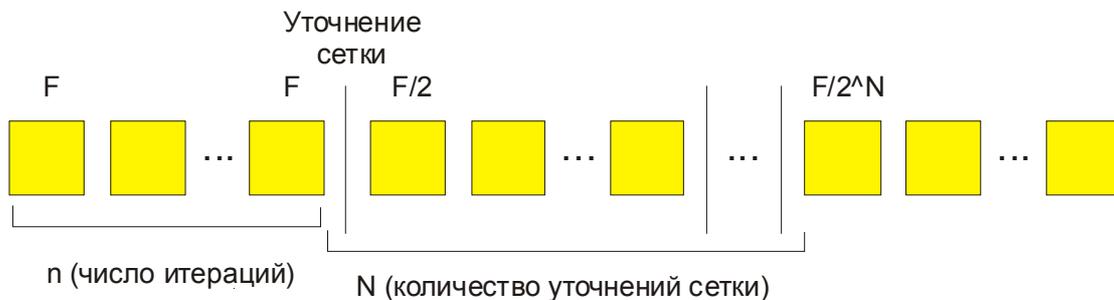


Рис. 2-30 Схема обработки для итерационного алгоритма

Так же данный алгоритм реализует 3 варианта итерационной процедуры:

- Целое смещение областей (название в англоязычной литературе – Discrete Window Shifting (DWS))
- Непрерывное смещение областей (Continuous Window Shifting (CWS))
- Непрерывное смещение областей с деформацией (Continuous Window Shift with an Image Deformation (CWD))

Выбор первых двух вариантов алгоритма осуществляется в диалоге выбора параметров алгоритма (см. Рис. 2-31).

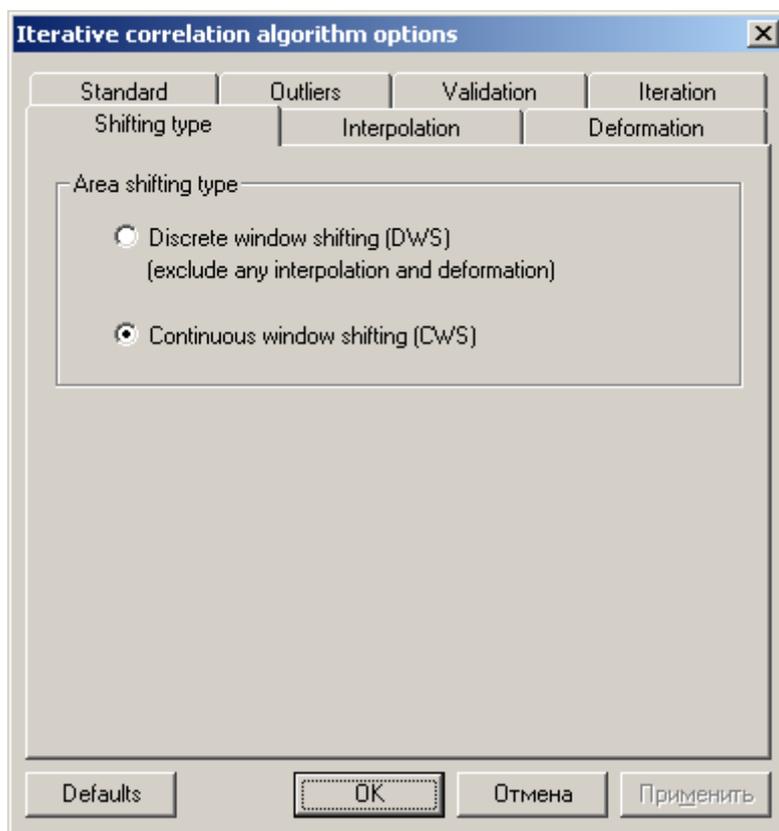


Рис. 2-31 Выбор типа смещения исследуемой области целое или непрерывное

Наиболее быстрая (по времени) процедура обработки изображений, после стандартного кросскорреляционного алгоритма, – это итерационный алгоритм с целым смещением областей, т.к. он не требует интерполяции изображения в точке с дробными координатами, в отличие от варианта с непрерывным смещением областей. Целому смещению присущи такие нежелательные эффекты, как высокая систематическая ($\max 0.1 \text{ pix}$) и полная ошибка ($\max 0.12 \text{ pix}$), а также выраженный эффект *reak-locking*. По сравнению со стандартным кросскорреляционным алгоритмом он имеет такие преимущества, как уменьшение систематической и полной ошибки для смещений больше 1 pix и расширенный динамический диапазон определяемых смещений за счет техники смещения областей. Процедура обработки изображений с непрерывным смещением подразумевает использование интерполяции изображения. Систематическая и полная ошибки в этом случае существенно зависят от типа интерполяции. Используемая схема интерполяции выбирается на вкладке **Interpolation** (см. Рис. 2-32).

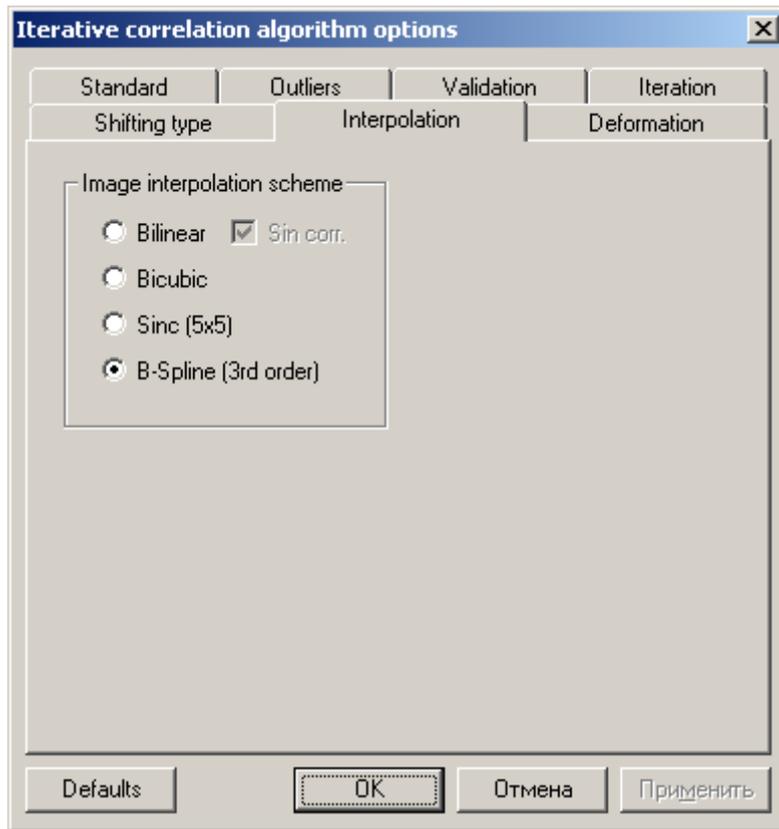


Рис. 2-32 Выбор типа интерполяции изображения

Параметр типа интерполяционной схемы имеет смысл, если только выбран непрерывный тип смещения **Continuous window shifting**. На данный момент доступно 5 возможных схем интерполяции: **Bilinear**, **Bilinear Sin corr.**, **Bicubic**, **Sinc (5x5)**, **B-Spline (3rd order)**. По уровню систематической и полной ошибок их можно расположить в следующем порядке: **Bilinear**, **Bicubic**, **Bilinear Sin corr.**, **Sinc (5x5)**, **B-Spline (3rd order)**.

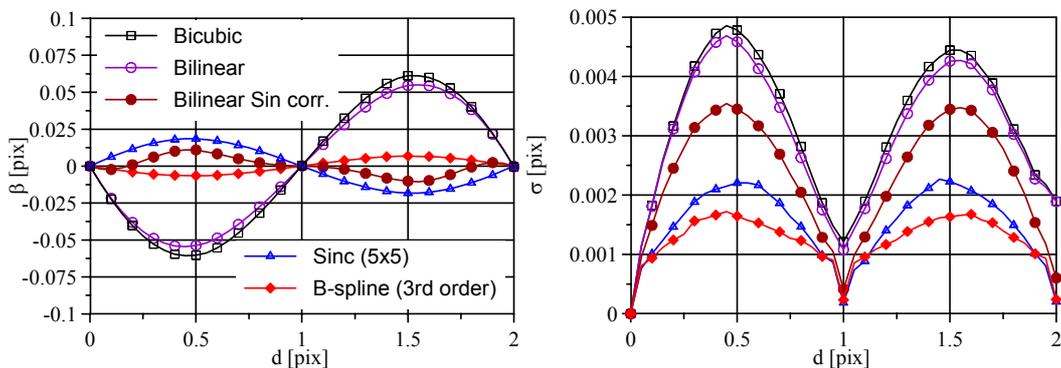


Рис. 2-33 Систематическая погрешность (слева) и случайная погрешность (справа) итерационного алгоритма CWD в зависимости от величины дробного смещения частиц в диапазоне от 0 до 2pix для различных интерполяционных схем

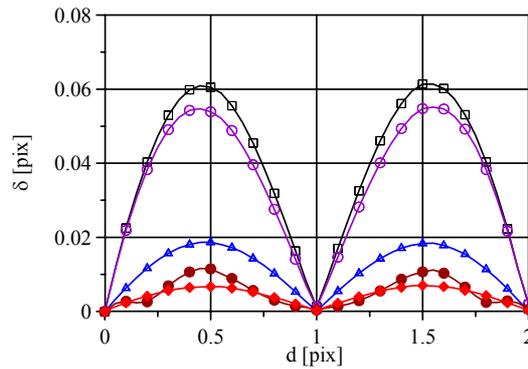


Рис. 2-34 Полная ошибка итерационного алгоритма CWD в зависимости от величины дробного смещения частиц в диапазоне от 0 до 2 pix для различных интерполяционных схем (тип схемы отмечен на Рис. 2-33)

По времени, затрачиваемом на обработку изображения с применением интерполяции, схемы располагаются в таком порядке (чем меньше порядковый номер, тем медленнее работает алгоритм): **Sinc (5x5)**, **B-Spline (3rd order)**, **Bilinear Sin corr.**, **Bicubic**, **Bilinear**.

Непрерывное смещение области позволяет существенно уменьшить эффект реак-локинг, по сравнению с целым смещением в области. Уровень ошибки (как систематической, так и полной) также уменьшается для схем **Bilinear Sin corr.**, **Sinc (5x5)**, **B-Spline (3rd order)**.

В случае присутствия градиента скорости на уровне 0,1 pix/pix (в терминах смещения) на изображении, рекомендуется использовать алгоритм непрерывного смещения области и деформацией. Целью деформации является более точное восстановление поля скорости при наличии на изображении областей с градиентом, когда главный корреляционный максимум вытягивается перпендикулярно направлению градиента. Деформация области осуществляется путем смещения каждого элемента изображения внутри области на разную величину, которая рассчитывается оценкой градиента скорости в центре области. Если для деформации области используется только первые производные скорости, то она будет являться поправкой первого порядка, если используются производные второго порядка и смешанная производная, то второго порядка.

В данном алгоритме параметрами деформации области можно управлять на вкладке **Deformation** (см. Рис. 2-35). Значение **None** соответствует отсутствию деформации. Значение **Gradient** указывает на деформацию с оценкой градиента скорости с помощью центральной разностной схемы. Помимо возможности более точной оценки скорости в потоках с ненулевым градиентом скорости, данный алгоритм позволяет снизить нежелательный эффект реак-локинг по сравнению с алгоритмом с непрерывным смещением окна, но без деформации.

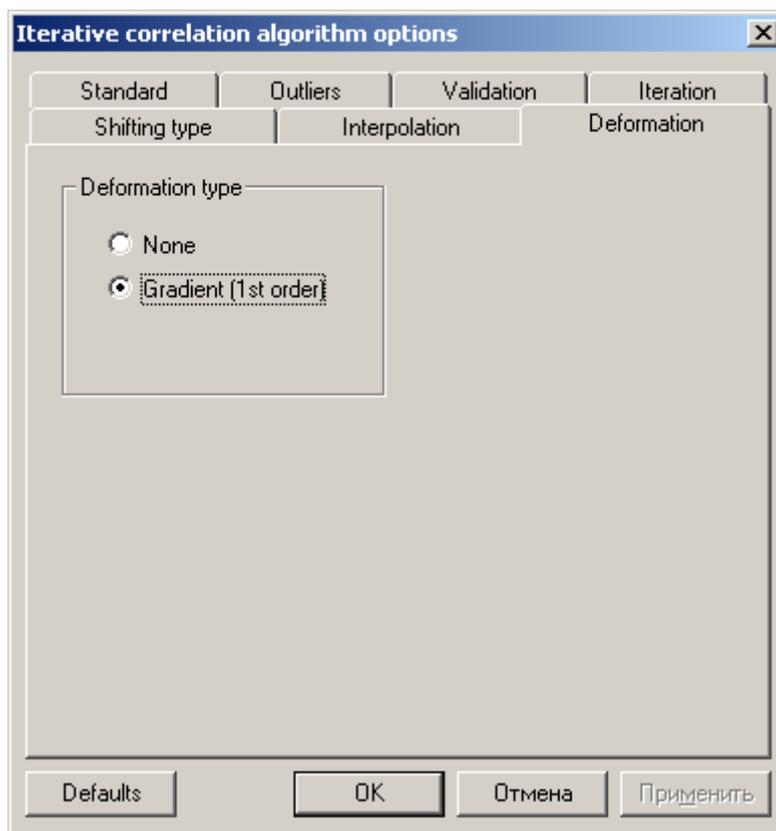


Рис. 2-35 Выбор типа деформации области

2.6.1.2.1. Поиск максимумов

Процедура поиска максимумов аналогична описанной в 1.2.1.3. Область поиска максимума может быть ограничена прямоугольной областью внутри расчетной области (см. Рис. 2-27, раздел **Limit Search**). Для итерационных алгоритмов область поиска пика, заданная пользователем, применяется только на первой итерации, для последующих итераций поиск пика на корреляционной плоскости ведется в пределах $x \in [-5,5], y \in [-5,5]$.

2.6.1.2.2. Подпиксельная интерполяция

Для всех кросскорреляционных алгоритмов реализован один тип подпиксельной интерполяции – это 3-х точечная оценка кривой Гаусса (см. раздел 1.2.1.3). Считается, что по совокупности параметров (точность, сложность получения оценки) интерполяция кривой Гаусса является оптимальной. Одновременно с вычислением точного положения пика производится расчет высоты пика и ширины на полувысоте. Эти параметры используются в ряде критериев по отсеву векторных полей.

2.6.1.2.3. Оконные функции

Оконные функции позволяют уменьшить вклад в корреляционную функцию частиц, находящихся на границе, которые обычно приводят к ложным корреляционным пикам за счет того, что велика вероятность выхода парной частицы на втором кадре изображения за пределы расчетной области. Оконная функция применяется к расчетной области изображения непосредственно перед расчетом корреляционной функции. Подробнее про оконные функции Вы можете прочитать здесь 1.2.1.1. Параметры оконных функций задаются в разделе **Windowing** (см. Рис. 2-36) вкладки **Standard**. Фиксирующийся переключатель **Enable windowing** позволяет применить одно из двух окон, выбранных кнопками переключателями **Top-Hat** и **Gauss**, а также задать параметр **k** – эффективную ширину окна.

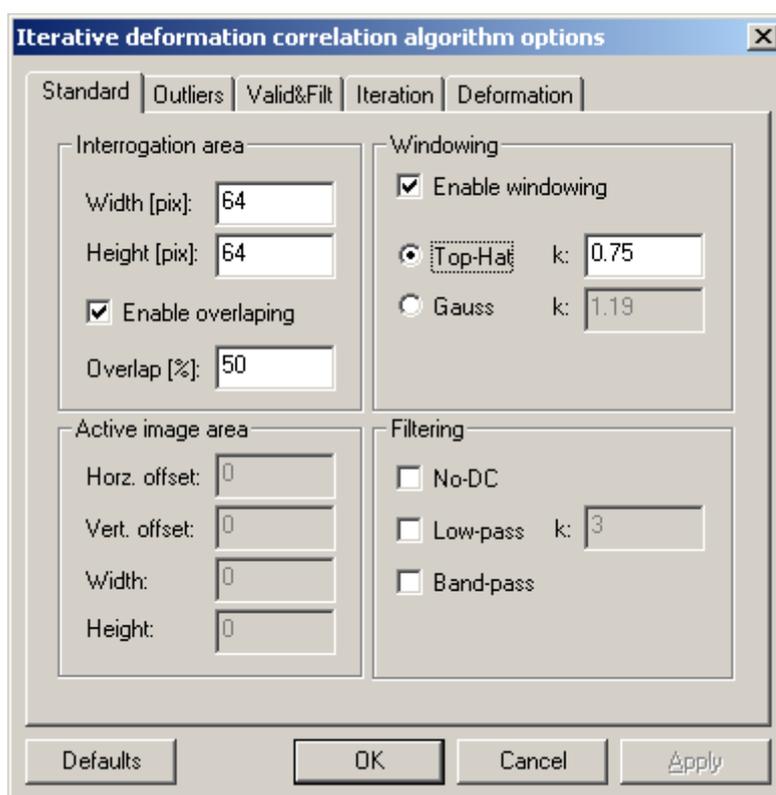


Рис. 2-36 Использование оконных функций и фильтрации

2.6.1.2.4. Частотная фильтрация корреляционных функций

В основной библиотеке алгоритмов для методов корреляционной обработки изображений возможно применение частотной фильтрации. Фильтрация корреляционной функции в частотном диапазоне позволяет поправить форму корреляционных пиков (см. раздел 1.2.1.2). В библиотеке реализовано три частотных фильтра: **No-DC**, **Low-pass**, **Band-pass**. Настройка параметров частотных фильтров осуществляется в разделе **Filtering** закладки **Standard** (см. Рис. 2-36), фиксирующиеся переключатели позволяют задавать группы фильтров, которые будут применяться в

процессе обработки. Фильтр **Low-pass** требует задания параметра **k**, который определяет пространственную частоту среза.

2.6.1.2.5. Коррекция ошибок на корреляционной плоскости

Для изображений с низким соотношением сигнал/шум возможно несколько увеличить качество получаемых данных путем применения метода коррекции ошибок на корреляционной плоскости (см. раздел 1.2.3). Настройки метода находятся на вкладке **Outliers** диалога корреляционной обработки изображений в разделе **Error correction** (см. Рис. 2-37). Фиксирующийся переключатель **Enable correction** включает использование коррекции ошибок.

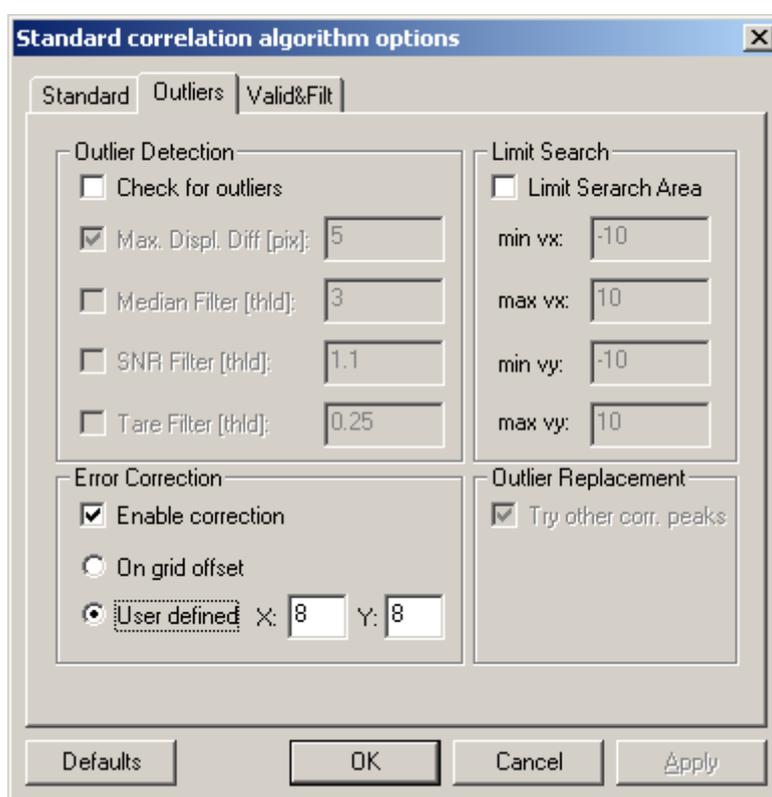


Рис. 2-37 Коррекция ошибок на корр. плоскости

Переключатель **On grid offset** и **User defined** указывает тип смещения между перемножаемыми корреляционными функциями: смещение либо задается автоматически, основываясь на размере сетки, либо вводится пользователем вручную. Не стоит задавать величину смещения большим размером окна в соответствующем направлении. Применение коррекции сопряжено с дополнительными затратами на вычисления сопряженной корреляционной функции, в связи с этим время расчета возрастает в два раза.

2.6.2. Stereo PIV алгоритмы

Описание алгоритмов данного раздела соответствует версии 2.0.0.1 библиотеки StereoPIV алгоритмов 3DLib.dll.

2.6.2.1. Калибровка камеры

В библиотеке по расчету трехкомпонентных полей скорости реализовано 2 метода калибровки камеры: **2D Calibration** и **3D Calibration** (см. раздел 1.4.3).

Основное отличие этих двух методов состоит в размерности измерительной области в системе координат эксперимента, которую переводит модель отображения на плоскость изображения. В случае 2D калибровки плоскость в системе координат эксперимента переводится в плоскость изображения. Поэтому алгоритм **2D Calibration** на входе требует одно изображение плоской калибровочной мишени для одного из положений по оси Z.

Модель отображения в алгоритме **3D Calibration** переводит объемную область в системе координат эксперимента в плоскость в системе координат изображения. На вход алгоритма необходимо подать не менее трех изображений калибровочной мишени в различных положениях по оси Z (например, Z1=0мм и симметричные положения относительно начала координат Z2=2мм и Z3=-2мм).

Рассмотрим параметры в диалоге задания параметров для алгоритмов калибровки камеры **2D Calibration** и **3D Calibration**. Данный диалог изображен на Рис. 2-38, Рис. 2-39, Рис. 2-40, Рис. 2-41, Рис. 2-43. Он состоит из 6-ти закладок: **Marker search**, **Image model**, **Coordinates**, **Calibration target**, **Misalignment correction**, **Parameters**. Первая закладка (см. Рис. 2-38) определяет параметры поиска связных областей и отсева связных областей, не соответствующих маркерам (опорным точкам). На первой вкладке выбирается:

- Область **Filtering**:
 - **Diff. from mean** (=Q) – определяет доверительный интервал на диаметры маркеров, внутри которого связные области на изображении с диаметром D_i считаются маркерами: $\bar{D}/(1+Q) < D_i < \bar{D}(1+Q)$, где \bar{D} – средний диаметр маркеров;
 - **Min dot area** – минимально возможная площадь маркера;
 - **Max dot area** – максимально возможная площадь маркера;

- **Min dot count** – минимальное количество маркеров на изображении калибровочной мишени;
- **Origin area trshld (=Q)** – пороговое значение, определяющее во сколько раз диаметр центрального маркера должен отличаться от среднего диаметра маркеров по полю: $D_{main} > \bar{D} * Q$;
- **Boundary part (=Q)** – определяет активную область по центру изображения, в которой определяются маркеры:
 $w_i Q < x_m < w_i(1-Q), h_i Q < y_m < h_i(1-Q)$;
- Область **Manual** (задание некоторых параметров поиска опорных точек вручную):
 - **Grayscale trshld** – переключатель устанавливает бинаризацию изображений калибровочных мишеней с порогом, заданным пользователем;
 - **Center marker** – переключатель задает поиск центрального маркера вблизи указанной точки **(x,y)** на изображении. Применяется совместно с **Origin area trshld=1.0**, в случае если автоматический поиск прошел неудачно.
 - **Template corr.** – активный флажок устанавливает метод подпиксельного определения центра маркера через корреляцию с шаблоном маркера и дальнейшей подпиксельной подгонкой кривой Гаусса (как в стандартном кросскорреляционном методе 1.2.1.3)

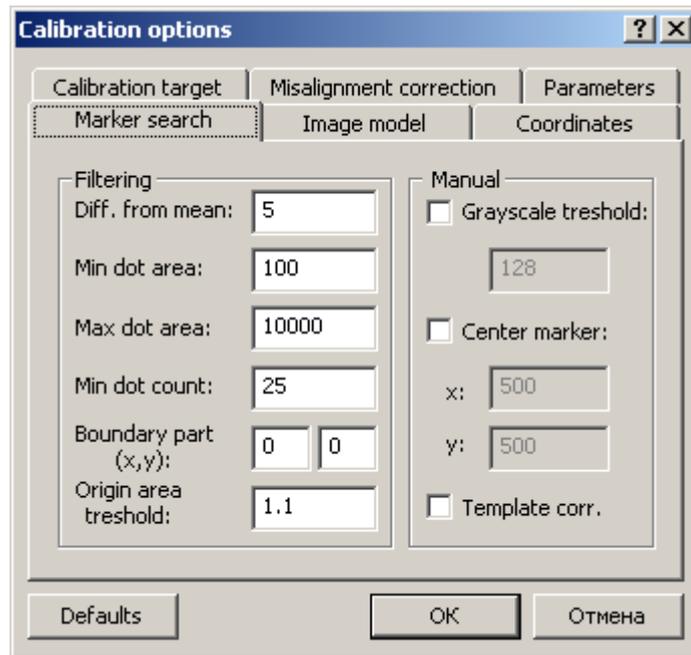


Рис. 2-38 Параметры поиска маркеров для расчета калибровочных коэффициентов

Закладка **Image model** выглядит следующим образом (см. Рис. 2-39). На ней находится выпадающий список выбора используемой модели отображения. Для 2D калибровки доступно 3 модели: **Direct Linear Transform**, **Second Order Polynomial** и **Tsai model** (см. раздел 1.4.3). Вторая модель имеет больший порядок точности, чем первая. В третьей модели производится корректировка радиальной дисторсии на изображении.

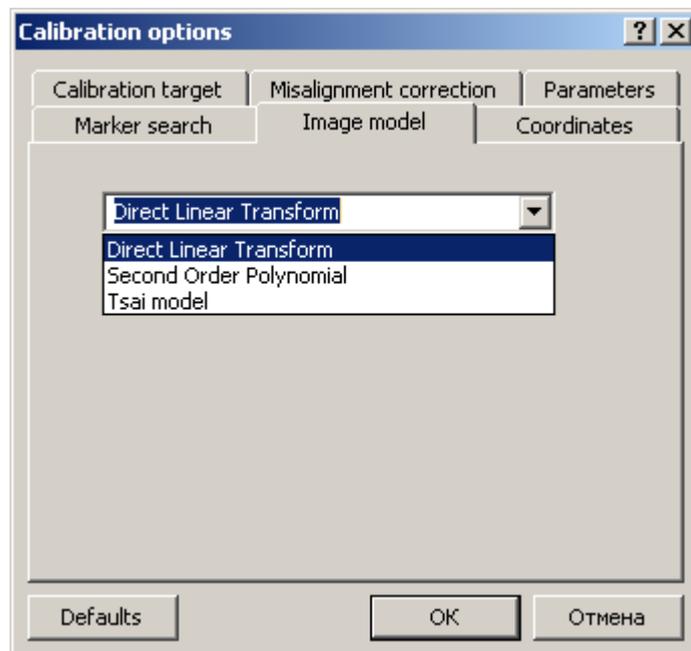


Рис. 2-39 Параметры модели отображения для расчета калибровочных коэффициентов

Вкладка **Coordinates** предоставляет четыре переключателя в области **Coord. direction** для задания направления осей координат **X-Y** в системе координат эксперимента (ось Z всегда направлена в сторону камер). Элементы управления в области **View direction** предназначены для оптимизации калибровки по многоуровневой мишени и используется только в алгоритме **3D Calibration**.

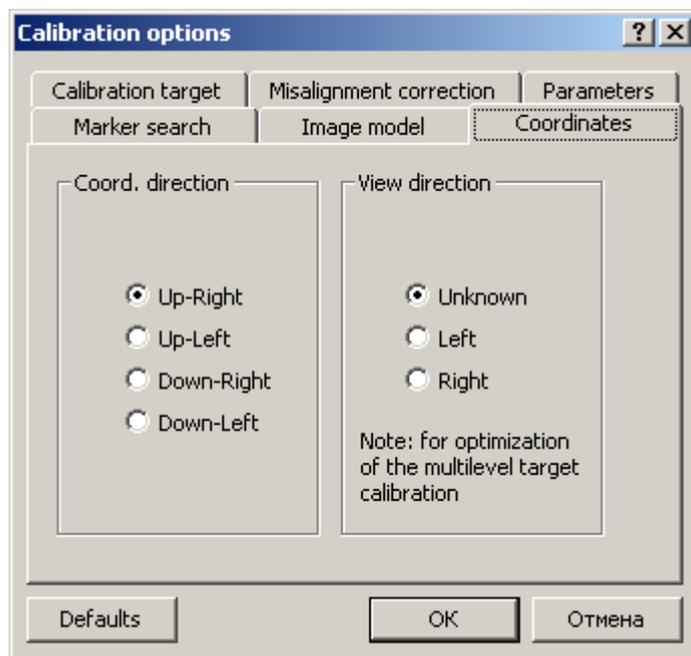


Рис. 2-40 Направление осей координат **X-Y** в системе координат эксперимента для вычисления калибровки камеры

Вкладка **Calibration target** приведена на Рис. 2-41. На этой вкладке в выпадающем списке **Target type** можно выбрать одну из доступных калибровочных мишеней. Калибровочная мишень характеризуется следующими параметрами:

- **Dot spacing** – расстояние между центрами маркеров в миллиметрах;
- **Main marker D** – диаметр основных маркеров;
- **Axis marker D** – диаметр осевых маркеров;
- **Zerro marker D** – диаметр центрального маркера;
- **Multi-level** – указывает многоуровневая мишень или плоская (достоинство мишени с несколькими уровнями положения маркеров по оси z, обычно тремя, состоит в том, что такую мишень не нужно перемещать);
- **Level dist.** – расстояние между уровнями многоуровневой мишени;
- **Black dots** – используются черные маркеры на белом фоне;

- **White dots** – используются белые маркеры на черном фоне;

На практике при проведении эксперимента важно обращать внимание на параметры мишени: **Dot spacing** – задает масштаб осей в системе координат эксперимента (можно проверить на итоговом 3D поле скорости), **Level dist** – задает масштаб в системе координат эксперимента по оси Z при использовании многоуровневой мишени, **Black dots** или **White dots** – определяет тип мишени (белое на черном или черное на белом), чтобы отличить маркеры от фона.

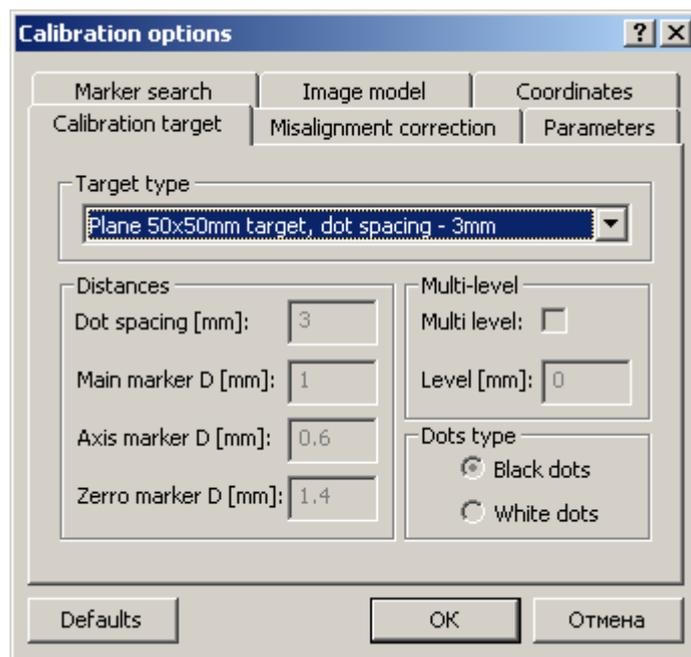


Рис. 2-41 Параметры калибровочной мишени для расчета калибровки камеры

Параметры доступных калибровочных мишеней задаются утилитой **TargetManager.exe**. Этот файл располагается в том же каталоге, что и основной исполняемый файл программы ("C:\Program Files\ActualFlow"), ярлык расположен в меню **Пуск**. Для запуска утилиты необходимо, чтобы в операционной системе был установлен Microsoft .NET Framework v1.1 или выше. В случае использования мишени с параметрами, отличными от параметров предустановленных мишеней (см. список на Рис. 2-42), после установки программы можно добавить свою калибровочную мишень. Данная утилита позволяет создавать, редактировать, удалять записи о доступных калибровочных мишенях, а также создавать векторное изображение мишени в emf формате в масштабе один к одному для дальнейшего нанесения его на бумагу, пленку или металл. Один из удобных способов распечатки изображения мишени на принтере – это вставка векторного emf рисунка в Word документ и распечатка документа.

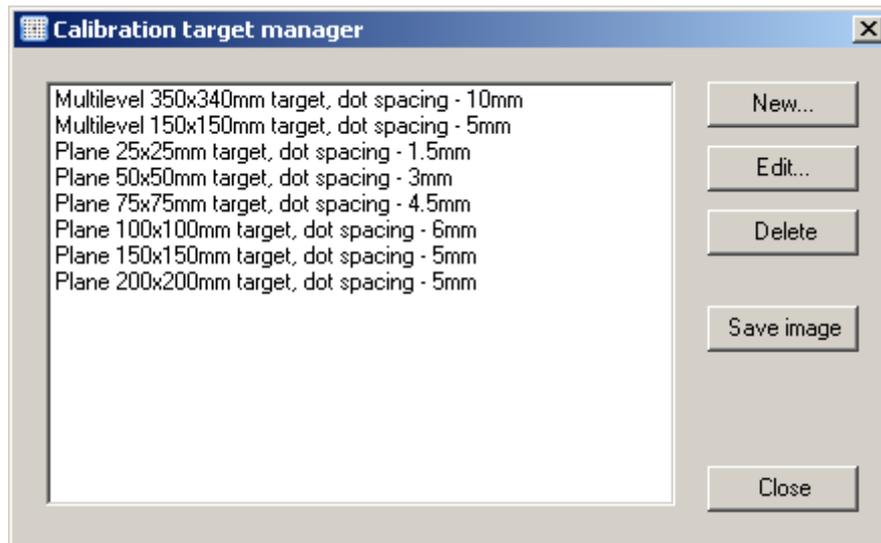


Рис. 2-42 Главное окно редактора калибровочных мишеней

На закладке **Misalignment correction** (см. Рис. 2-43) задаются параметры коррекции выравнивания плоскости калибровочной мишени относительно плоскости лазерного ножа. Параметры коррекции выравнивания **R_x**, **R_y**, **T_z**, **T_y** вычисляются согласно методу, описанному в разделе 2.6.2.5 (**Внимание!!! Только для опытных пользователей**). По умолчанию все эти параметры равны 0 и считается, что плоскость калибровочной мишени полностью совпадает с плоскостью измерения.

Ввод параметров коррекции может осуществляться либо непосредственно в поля ввода, либо из текстового файла, который создается алгоритмом **Calibration Correction** (см. раздел 2.6.2.5). Во втором случае добавление осуществляется по кнопке **Add pars...**, которая открывает диалог выбора файлов и добавляет значения параметров, содержащиеся в файле, к значениям в полях ввода, т.е. суммирует их. Это реализовано для удобства последовательного применения метода коррекции калибровки, когда калибровка камеры корректируется за несколько итераций. Обычно для сходимости достаточно 3-4 итерации. Кнопка **Clear** вызывает обнуление всех полей ввода.

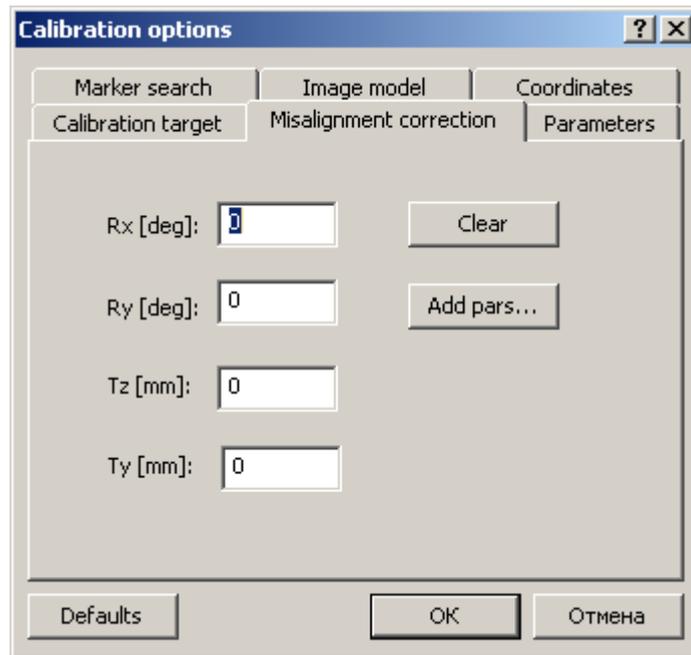


Рис. 2-43 Параметры коррекции выравнивания плоскости калибровочной мишени относительно плоскости лазерного ножа

На вкладке **Parameters** (см. Рис. 2-44) отображаются свойства калибровки камеры, которые оцениваются после расчета. Эти свойства можно посмотреть по команде **Show Data Parameters** для выбранной калибровки в панели базы данных. При запуске алгоритма калибровки любые значения на вкладке **Parameters** не имеют информативной нагрузки. Подробнее рассмотрим назначение свойств. В области **Calibration error [pix]** отображается покомпонентно и в целом среднеквадратичное отклонение положений маркеров, определенных по модели (**DTL**, **PLN3D** и т.д.), от положений маркеров, измеренных по изображению калибровочной мишени:

$$er = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - F(p, X_i)|^2}$$

в пикселях. Поле **Nimg** означает количество изображений,

использованных во время процедуры калибровки. В полях **er [mm]** и **er_max [mm]** содержится информация о среднеквадратичном отклонении положений маркеров в мировой системе координат, связанной с экспериментом:

$$er[mm] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - F^{-1}(p', x_i)|^2}, \quad er_max[mm] = \max_{i=1..N} |X_i - F^{-1}(p', x_i)|$$

в

миллиметрах. Фактически, эти значения связаны с ошибкой рассчитанной калибровки камеры.

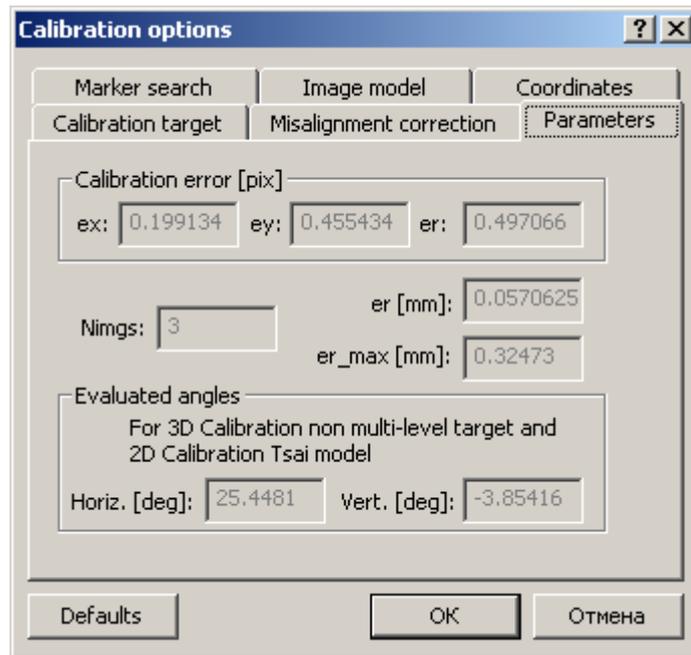


Рис. 2-44 Выходные параметры калибровки камеры

В области **Evaluated angles** расположены значения вертикального и горизонтального углов ориентации камеры в градусах. Значения углов автоматически рассчитываются в алгоритме **3D Calibration** (за исключением многоуровневых мишеней), а также в алгоритме **2D Calibration** с преобразованием **Tsai model**. С помощью автоматически определяемых углов можно контролировать ориентацию камеры, когда прямое измерение ориентировочных углов затруднено. Можно также использовать для верификации калибровки камеры, когда известно приблизительное значение углов ориентации камеры в пространстве. Дополнительно автоматически рассчитанные углы используются в процессе коррекции калибровки камеры (см. раздел 2.6.2.5 далее).

Рассмотрим по шагам последовательность операций, необходимых для запуска расчета калибровки камеры алгоритмом **2D Calibration**.

Шаг 1. Выберите изображение калибровочной мишени в дереве объектов базы данных (выбранный узел изображения подсвечивается синим фоном) и отобразите панель свойств узлов (см. Рис. 2-45) путем нажатия комбинации клавиш **Alt+Enter** или выбором команды **Properties**;

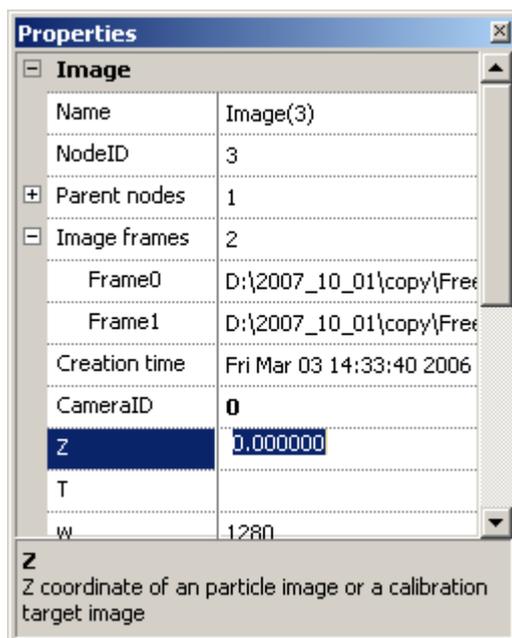


Рис. 2-45 Панель свойств с параметрами изображения

Убедитесь, что в поле **Z** записано верное положение плоскости мишени по оси Z. Если указана правильная информация, то переходите к Шагу 2, иначе скорректируйте значение.

Шаг 2. Для данного изображения вызовите диалог обработки (см. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**). В списке алгоритмов слева выберите **2D Calibration** и нажмите кнопку \rightarrow , чтобы перенести его в правый список. В результате этого действия на экране появляется диалог настройки алгоритма 2D калибровки, подробно описанный выше. Установите параметры алгоритма и нажмите кнопку **OK**. Теперь процедура **2D Calibration** появилась в правом списке выбранных алгоритмов;

Шаг 3. Нажмите кнопку **Process** на диалоге обработки и запустите расчет. Подождите, пока линейка завершения операции дойдет до конца;

Шаг 4. Проверьте результат. Откройте результат расчета калибровочных коэффициентов. Пример результата показан на Рис. 2-46. В окне зелеными окружностями отображаются найденные маркеры, их центры помечены желтыми перекрестиями. Центральный маркер отображается красным цветом. Красными перекрестиями помечены центры маркеров, вычисленные по модели отображения. В идеальном случае красные перекрестия должны точно совпадать с желтыми перекрестиями, в этом случае можно сказать, что калибровка произведена успешно. На панели информации внизу окна отображается ошибка калибровки **Calibration uncertainty** (значение **er**, см. выше). Чем больше отклонение красных центров от желтых, тем с меньшей точностью будет рассчитано трехкомпонентное поле скорости. Численным критерием качества калибровки может служить $er < 1$. Если центральный

маркер определен неверно, можно определить положение центрального маркера вручную с помощью переключателя **Center marker** и соответствующих полей ввода координат. Если отклонение в преобразовании координат значительное, стоит поменять параметры алгоритма, например, модель отображения или параметры фильтрации поля для отсева ошибочных маркеров и пересчитать коэффициенты еще раз.

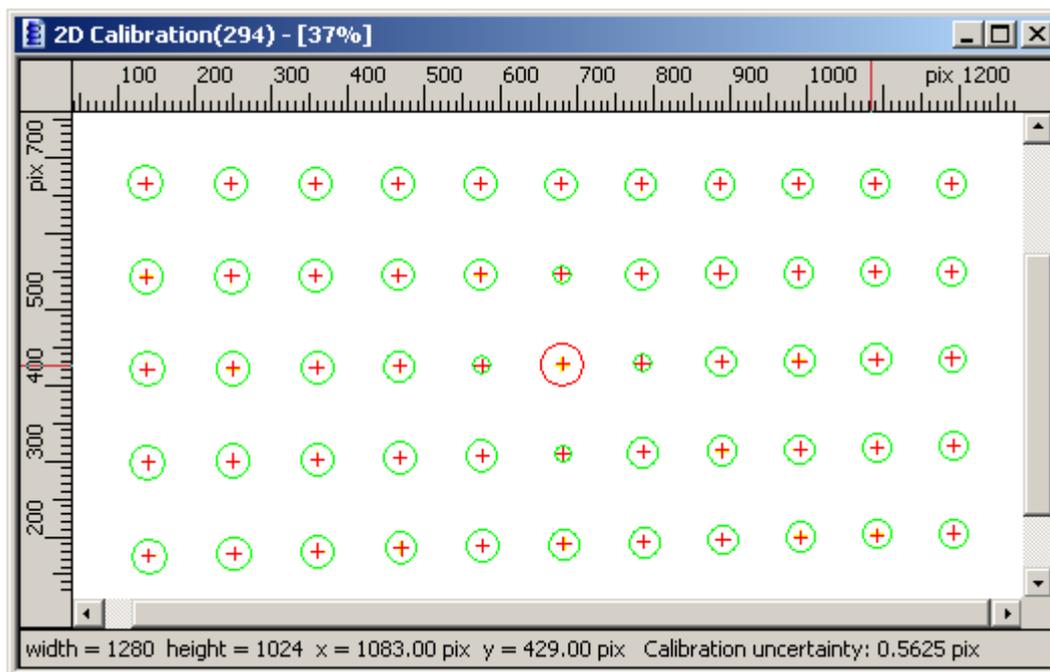


Рис. 2-46 Представление результата расчета калибровочных коэффициентов

Рассмотрим теперь последовательность операции необходимых для запуска расчета калибровочных коэффициентов алгоритмом **3D Calibration**. Напомним, что данному алгоритму на вход необходимо подавать не менее трех изображения в трех различных положениях по оси Z.

Шаг 1. Выберите 3 (или более) изображения калибровочных мишеней в дереве базы данных (см. Рис. 2-47);

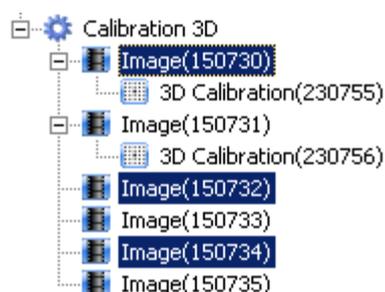


Рис. 2-47 Выбор изображений для проведения 3D калибровки

Шаг 2. Вызовите диалог обработки. Задайте параметры алгоритма. Все параметры остаются точно такими же, за исключением доступных моделей отображения в выпадающем списке на вкладке **Image Model** (см. Рис. 2-39). Вместо **Direct Linear Transform**, **Second Order Polynomial**, **Tsai model** в списке появляются **Direct Linear Transform 3D** и **3rd Order Polynomial**;

Шаг 3. Запустите расчет коэффициентов;

Шаг 4. Визуально проверьте результат расчета коэффициентов. Проверьте ошибку калибровки на панели информации. Результат должен выглядеть примерно как на Рис. 2-48.

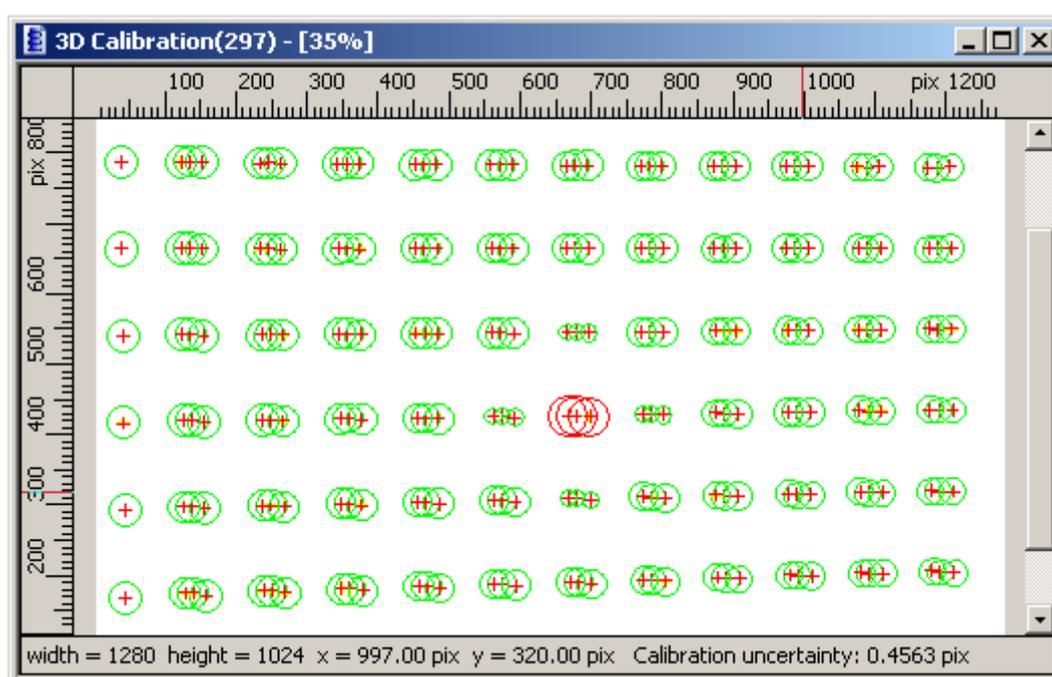


Рис. 2-48 Результат расчета коэффициентов алгоритмом 3D Calibration

Калибровка по изображению трехуровневой мишени рассчитывается также с использованием алгоритма **3D Calibration**. При обработке изображения трехуровневой мишени необходимо выбрать соответствующий тип калибровочной мишени на закладке **Calibration target** (см. Рис. 2-49), а также выбрать модель отображения **Direct Linear Transform 3D** (см. Рис. 2-50). При калибровке камеры по многоуровневой мишени указанная модель предпочтительнее, т.к. для полиномиальной модели найти верное преобразование оказывается сложнее, вследствие малого числа маркеров на каждом из уровней калибровочной мишени.

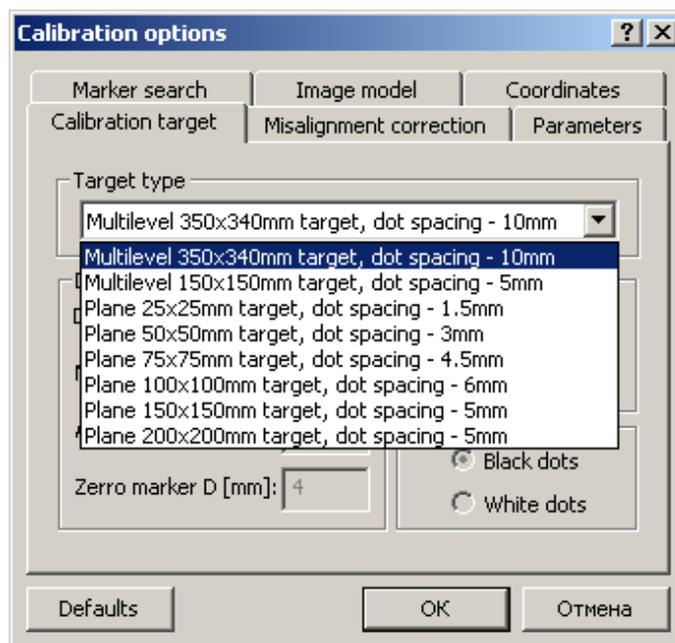


Рис. 2-49 Выбор многоуровневой калибровочной мишени

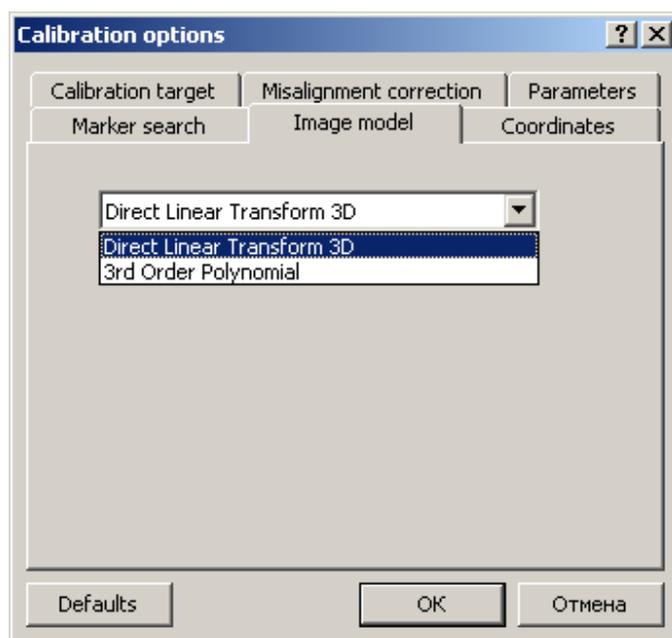


Рис. 2-50 Линейная модель преобразования для 3-х уровневой мишени

2.6.2.2. Расчет трехкомпонентного поля скорости

Расчет трехкомпонентного поля скорости (см. методические разделы 1.4.4 и 1.4.5) возможен двумя различными способами: **3D Geometric Rec** и **3D Calibration Rec**. Метод **3D Geometric Rec** может использовать калибровки **2D Calibration**, **3D Calibration** и рассчитывает трехкомпонентное поле скорости с привлечением дополнительной информации об углах позиционирования камер относительно

измерительной плоскости. **Внимание!!! Данный метод может применяться только для случая плоской границы раздела сред** (например, вода–воздух, если измерения проводятся в воде). Метод **3D Calibration Rec** работает только с данными, полученными алгоритмом **3D Calibration** и рассчитывает трехкомпонентное поле скорости без использования информации об углах, т.к. информация о геометрии уже находится в параметрах модели калибровки камеры. Для метода реконструкции **3D Calibration Rec** нет явных ограничений на конфигурацию границы раздела, главное, чтобы нелинейные искажения изображения компенсировались алгоритмом калибровки камеры.

Алгоритм **3D Geometric Rec** имеет следующие параметры (см. Рис. 2-51).

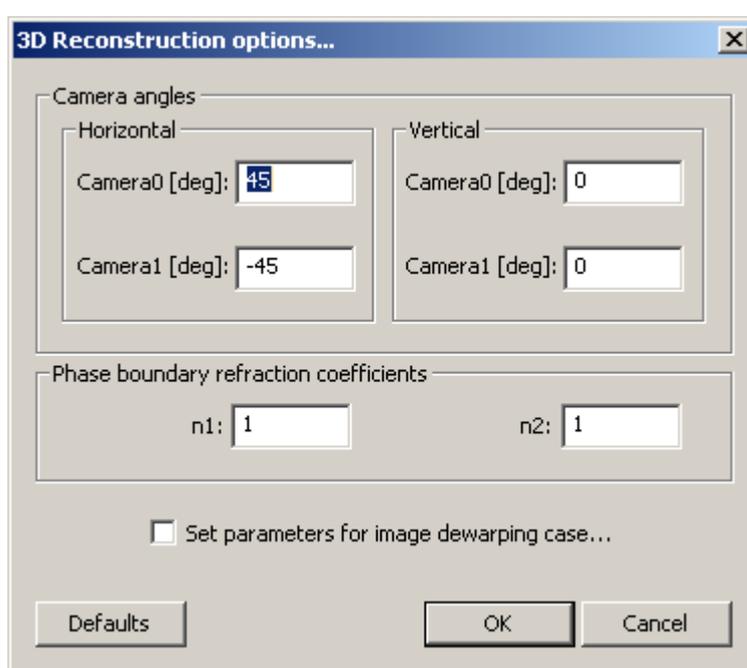


Рис. 2-51 Диалоговое окно параметров алгоритма **3D Geometric Rec**

В разделе **Camera angles** устанавливаются горизонтальные и вертикальные углы позиционирования для первой и второй камеры (в градусах). Отсчет горизонтальных углов ведется от нормали к измерительной плоскости по часовой стрелке, поэтому горизонтальный угол для второй камеры будет отрицательным. Для учета преломления лучей на границе раздела сред область диалога **Phase boundary refraction coefficients** позволяет задать коэффициенты преломления, **n1** – коэффициент преломления среды, где находятся регистрирующие камеры, **n2** – где находится измерительная область.

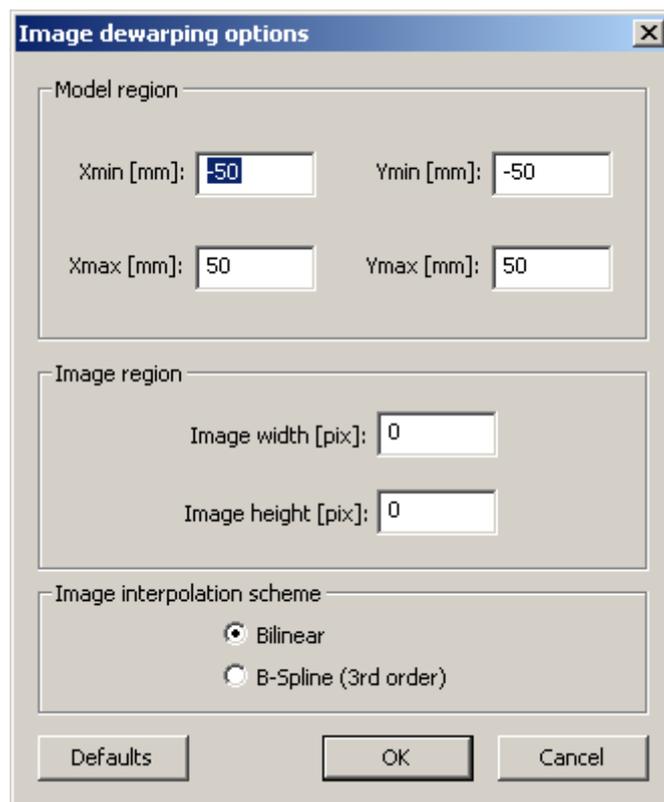


Рис. 2-52 Диалоговое окно задания параметров области измерения (для случая с реконструкцией изображения)

Активный флажок **Set parameters for image dewarping case...** на Рис. 2-51 необходим при реконструкции трехкомпонентного поля скорости реконструкцией изображения (см. пункт 2 в разделе 1.4.4) для установки параметров области измерения. Установка параметров происходит на диалоговом окне **Image dewarping case parameters** (см. Рис. 2-52), которое появляется сразу после нажатия кнопки **OK** при активном флажке **Set parameters for image dewarping case...** Размеры области измерения должны совпадать с теми, что были указаны во время реконструкции изображения (см. Рис. 2-56). Установка размеров области измерения для алгоритма с реконструкцией поля скорости (см. пункт 1 в разделе 1.4.4) не требуется, т.к. в этом случае размеры области измерения выбираются автоматически по пересечению видимых областей потока на изображениях с правой и левой камеры.

Порядок расчета методом **3D Geometric Rec** состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Выберите две калибровки **2D Calibration** или **3D Calibration** для правой и левой камеры (см. Рис. 2-53). После того как соответствующие данные выбраны, выбор зафиксируйте выделением командой **Fix Selection** из контекстного меню одного из выделенных узлов (фиксация необходима для того, чтобы выбор калибровок не сбросился при выборе полей скорости).

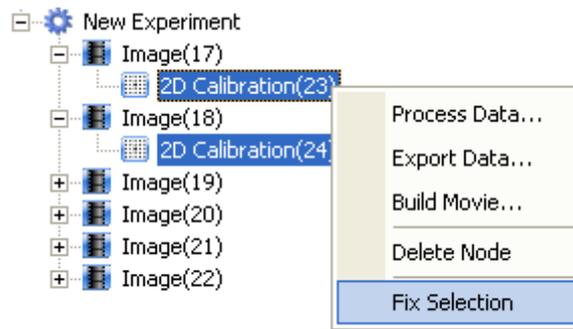


Рис. 2-53 Выбор калибровок с фиксацией выбора

Шаг 2. Выберите поля скорости для правой и левой камеры (см. Рис. 2-54). Возможно рассчитывать несколько трехкомпонентных полей скорости за один цикл обработки, в этом случае количество выбранных данных должно быть кратно двум.

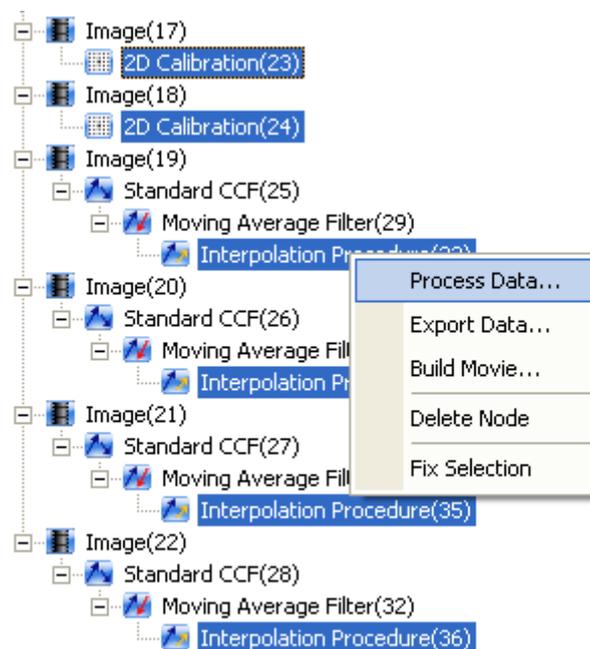


Рис. 2-54 Выбор полей скорости

Шаг 3. В контекстном меню для одного из выбранных узлов выберите команду **Process Data** и в появившемся диалоге обработки выберите алгоритм **3D Geometric Rec**. Задайте параметры алгоритма, нажмите кнопку **Process**. После расчета узел дерева с трехкомпонентным полем скорости появится среди потомков 2-х компонентного поля скорости для камеры 1.

Диалог установки параметров для алгоритма **3D Calibration Rec** показан на Рис. 2-55. Здесь в области **Model region** находятся элементы управления сеткой, на которой будут рассчитываться выходные данные. Поля ввода активируются переключателем

Manual output grid input и позволяют задавать координаты левой нижней точки количество узлов по обеим осям и расстояние между точками.

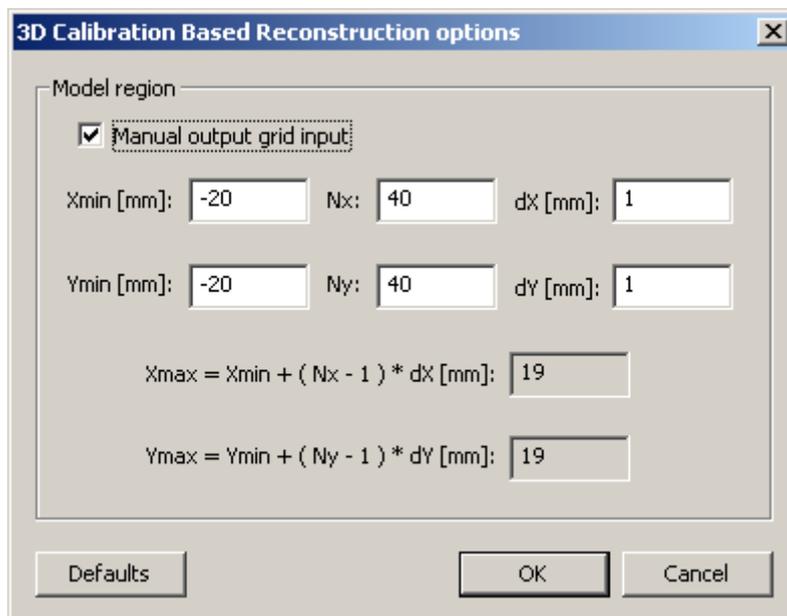


Рис. 2-55 Диалоговое окно задания параметров для алгоритма 3D Calibration Rec

Последовательность действий для запуска алгоритма **3D Calibration Rec** такая же, как и для **3D Geometric Rec**, только на шаге 1 необходимо выбрать 2 калибровки **3D Calibration**.

2.6.2.3. Реконструкция изображения

Реконструкция изображения в плоскость калибровочной мишени в параллельной проекции осуществляется методом **Image Dewarping**. Данный метод может использоваться в следующих случаях:

- Как один из этапов реконструкции трехкомпонентного поля скорости при проведении Stereo PIV измерений (см. раздел 1.4.4);
- Для расчета поля диспаратности при определении положения плоскости калибровочной мишени относительно измерительной плоскости (см. раздел 1.4.6);
- При совмещении разнородных изображений измерительной области, зарегистрированных камерами, находящимися в разных оптических условиях (например, при проведении комбинированных PIV/PLIF измерений рассеянный трассерами и переизлученный красителем свет регистрируется разными камерами). Здесь необходимо учитывать особенности калибровки камеры при малых углах обзора (см. раздел 1.4.7);

- Для проверки правильности калибровки иногда полезно реконструировать изображение калибровочной мишени, содержащее искажения перспективы, обратно в измерительную плоскость и убедиться в ортогональности сетки из опорных точек.

На Рис. 2-56 изображен диалог ввода параметров процедуры реконструкции изображения в обратной проекции. На нем необходимо задать следующие параметры:

- Область **Model region**:
 - **Xmin, Ymin, Xmax, Ymax** – область в системе координат эксперимента (в миллиметрах), в которую будет проецироваться исходное изображение;
- Область **Image region**:
 - **Image width** – ширина выходного изображения;
 - **Image height** – высота выходного изображения;
- Область **Image interpolation scheme**:
 - **Bilinear, B-Spline (3rd order)** – метод интерполяции при восстановлении изображения в новой системе координат.

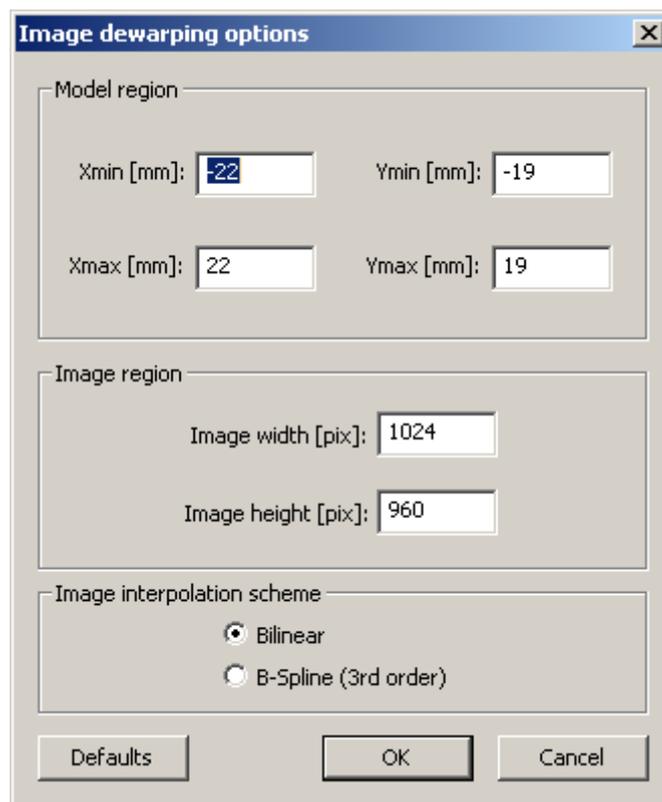


Рис. 2-56 Диалог ввода параметров для алгоритма реконструкции изображения

При реконструкции изображения фиксированным выбором (**Fix Selection**) выделяется требуемая калибровка камеры и, после выделения необходимого количества изображений любым методом выделения, запускается алгоритм **Image Dewarping** с нужными параметрами.

2.6.2.4. Реконструкция поля скорости

Реконструкция поля скорости в плоскость калибровочной мишени в параллельной проекции осуществляется методом **Vector Dewarping**. Диалоговое окно для задания параметров реконструкции такое же, как и при реконструкции изображения (см. Рис. 2-56 в разделе 2.6.2.3). Выбор входных данных также аналогичен использованию метода реконструкции изображения. В процессе реконструкции поля скорости изменяется как положение векторов скорости, так и их модуль. После реконструкции поля скорости в мировую систему координат, привязанную к эксперименту, вектора скорости больше не лежат на регулярной сетке, поэтому требуется интерполяция данных на регулярную сетку. В текущей версии библиотеки производится билинейная интерполяция данных вне зависимости от выбора переключателя в области **Image interpolation scheme** (см. Рис. 2-56).

2.6.2.5. Процедура коррекции рассогласования плоскости калибровочной мишени и измерительной плоскости

Данный раздел рекомендуется читать опытным пользователям программы, которые хотят максимально уменьшить погрешность измерения скорости в Stereo PIV измерениях.

Важно!!! Процедура коррекции выравнивания плоскостей (коррекции калибровки камеры) может выполняться только для 3D калибровки.

Опишем способ расчета параметров R_x , R_y , T_z , T_y . Определение поля диспаратности $D(x, y)$ – достаточно трудоемкая процедура. Она состоит из четырех последовательных этапов: реконструкция изображений (2.6.2.3), расчет полей диспаратности стандартным кросскорреляционным методом (2.6.1), расчет среднего поля диспаратности статистическим алгоритмом (2.6.6.1) и непосредственно вычисление параметров коррекции калибровки камеры. Все эти методы, кроме стандартного кросскорреляционного алгоритма, находятся в библиотеке 3DLib.dll по работе с трехкомпонентными полями скорости. Для работы данного алгоритма необходимо иметь рассчитанные калибровки для правой и левой камер и несколько десятков стереопар PIV изображений частиц (см. Рис. 2-57).

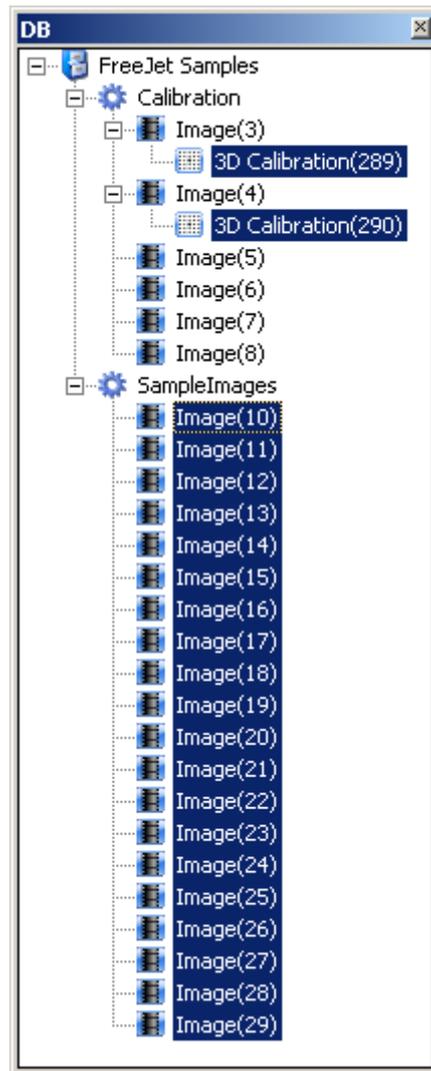


Рис. 2-57 Данные необходимые для коррекции калибровки камеры

Перед вызовом процедуры коррекции калибровки камеры калибровки камер выделяются фиксированным выделением, изображения частиц выделяются поочередно для каждой камеры (**Select similar** с дальнейшим удержанием клавиши **Shift** см. 2.4.3.2.1). После выбора данных необходимо вызвать процедуру **Calibration Correction** в окне менеджера обработки. За выбором алгоритма из списка следует появление диалога выбора параметров коррекции калибровки (см. Рис. 2-58).

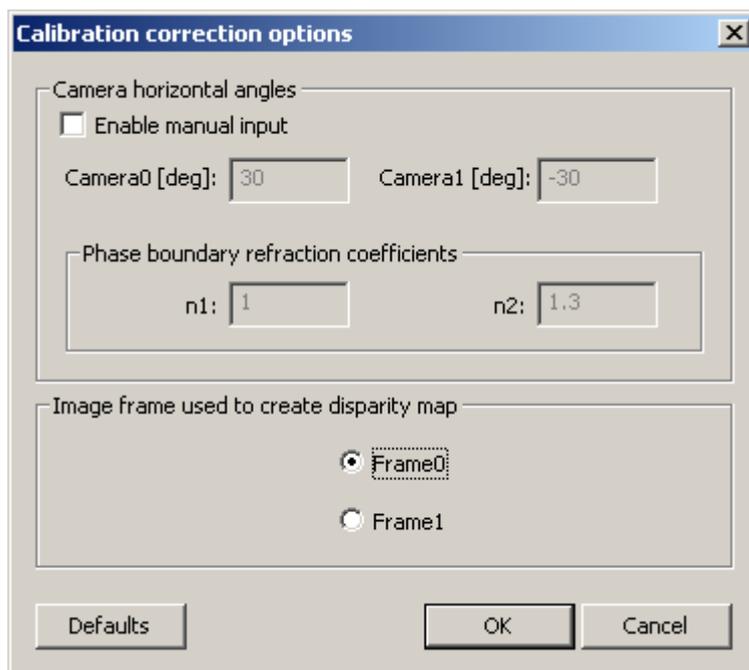


Рис. 2-58 Диалоговое окно алгоритма **Calibration Correction**

Enable manual input – активный флажок для калибровки камеры, которая не содержит информации об ориентации камеры в пространстве. При установке этого флажка можно вручную вводить горизонтальные углы ориентации камер в пространстве и коэффициенты преломления (при наличии границы раздела сред).

В области **Image frame used to create disparity map** можно выбрать номер кадра, используемый для получения поля диспаратности.

После нажатия кнопок **OK** и **Process** последовательно появляются диалоги выбора параметров алгоритмов, которые будут использоваться в составной процедуре коррекции калибровки камеры: **Image dewarping options**, **Standard correlation algorithm options**. В них необходимо задать параметры расчета.

По завершению работы составного алгоритма коррекции калибровки камеры в дереве базы данных появляется набор новых данных с типами **Image Dewarping**, **Standard CCF**, **Disparity Statistics**, **Calibration Correction** (см. Рис. 2-59). Все промежуточные данные сохраняются для того, чтобы можно было проанализировать процесс вычисления параметров коррекции и подобрать подходящие параметры промежуточных процедур расчета в случае неудачи.

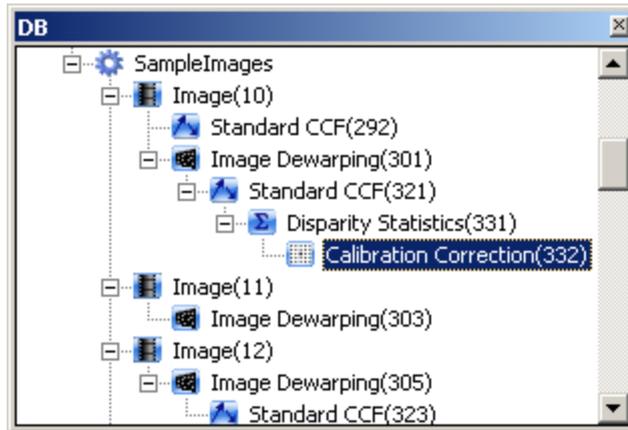


Рис. 2-59 Результат работы алгоритма **Calibrartion Correction**

Итоговое данные с типом **Calibration Correction** содержит параметры коррекции. Пути до файлов с параметрами коррекции калибровки **Camera0** и **Camera1** показаны на Рис. 2-60 в свойствах **Frame0** и **Frame1**, соответственно.

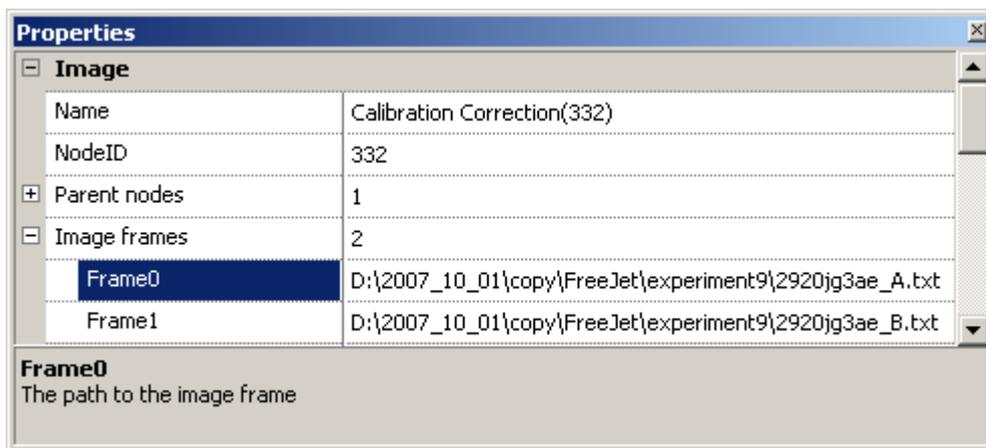


Рис. 2-60 Пути до файлов с параметрами коррекции калибровки камеры

Содержимое файлов, состоящее из четырех строк числовых значений (**R_x**, **R_y**, **T_z**, **T_y**), показано на Рис. 2-61. Просмотр содержимого текстовых файлов (*.txt), на которые ссылается узел базы данных, возможен по команде **Show Data**. При этом все ссылки открываются в стандартном текстовом редакторе Windows.

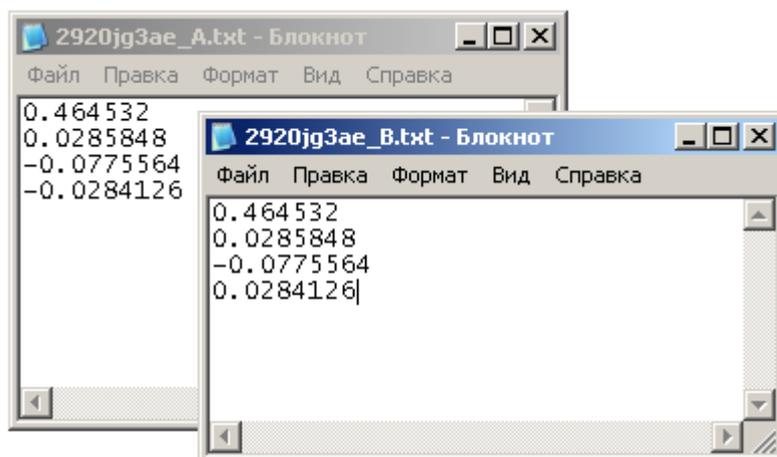


Рис. 2-61 Содержимое файлов - параметров коррекции калибровки камеры

Параметры **R_x**, **R_y**, **T_z**, **T_y** рассчитываются по формулам из раздела 1.4.6. Их значения записываются (или добавляются) в поля ввода закладки **Misalignment correction** (см. Рис. 2-43 раздела 2.6.2.1) диалога параметров калибровки камеры при расчете новых скорректированных калибровок камер.

В результате всех операций должны появиться две новые 3D калибровки для каждой камеры (см. Рис. 2-62). Рекомендуется выполнить проверку выполненной коррекции с новыми калибровками, проделав коррекцию калибровки камер снова, чтобы убедиться, что новое среднее поле диспаратности (**Disparity Statistics**) имеет смещения близкие к нулевым.

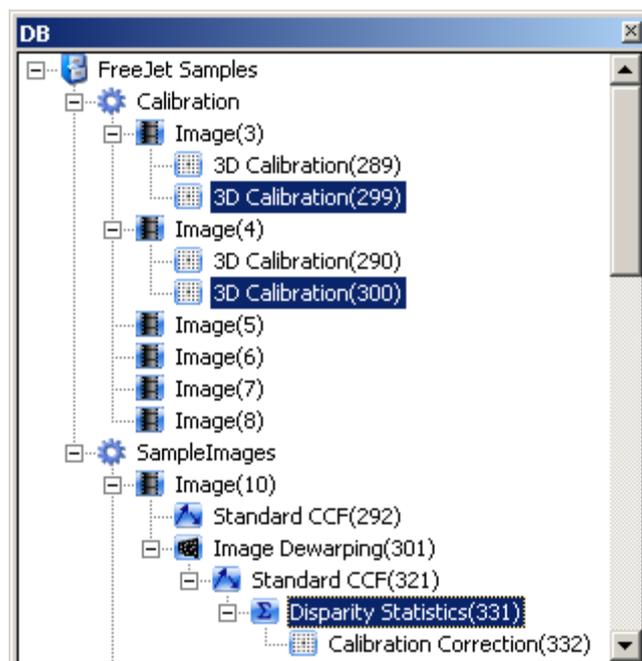


Рис. 2-62 Результат процедуры коррекции рассогласования плоскости калибровочной мишени и измерительной плоскости

2.6.3. Методы отсева векторов

2.6.3.1. Отсев по отношению сигнал/шум

Метод отсева по критерию сигнал/шум работает для 2-х компонентных векторных полей и позволяет определить качество рассчитанного вектора смещения. Подробное описание метода можно посмотреть в разделе 1.2.4.1. Алгоритм позволяет отфильтровать векторы, для которых отношение высот максимального по высоте и следующего за ним пика на корреляционной плоскости меньше заданного значения в поле **Peak height ratio h1/h2** (см. Рис. 2-63). Для работы алгоритма обязательными полями во входных данных являются (x, y, vx, vy, P1/P2, s).

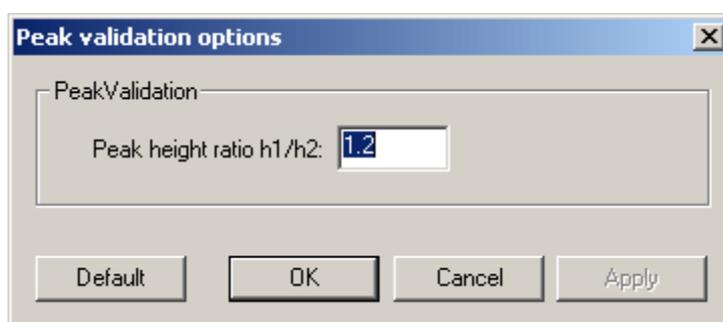


Рис. 2-63 Диалог выбора параметров алгоритма Peak Validation

2.6.3.2. Отсев по локальному среднему

Отсев векторов по локальному среднему позволяет исключить и заменить неверные вектора, определенные по описанному в разделе 1.2.4.2 критерию. Отсев работает как для двухкомпонентных полей скорости, так и для трехкомпонентных, полученных после стерео-реконструкции. Обязательными полями во входных данных являются: (x, y, vx, vy, s) для двухкомпонентного случая и (x, y, vx, vy, vz, s) для трехкомпонентного случая.

На Рис. 2-64 показаны входные параметры алгоритма, перечислим их по-порядку:

Accept factor – коэффициент, влияющий на жесткость отсева. Чем меньше значение коэффициента – тем жестче критерий.

N – количество итераций для валидации. Если установить несколько итераций, то можно «мягче» отсеивать или заменять неверные вектора с меньшим критерием жесткости отсева.

Averaging area – область, по которой проводится усреднение для определения критерия отсева.

not subs. prev. val. – активное состояние переключателя означает, что вектора, отсеянные ранее, не будут заменяться.

subs. inval. – активация опции включает замену отфильтрованных векторов.

val. on bound – активное состояние фиксирующегося переключателя определяет, что будет производиться отсев по границам векторного поля (границы определяются по факту выхода области усреднения за пределы поля).

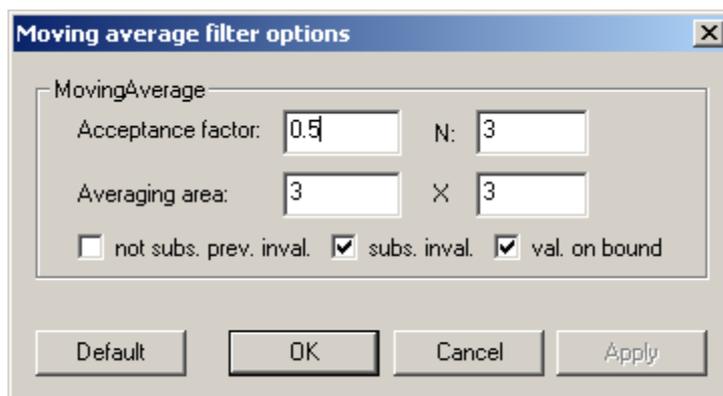


Рис. 2-64 Диалог выбора параметров алгоритма Moving Average

2.6.3.3. Отсев по локальному медианному значению

Отсев векторов по локальному медианному значению позволяет исключить неверные вектора, определенные по описанному в разделе 1.2.4.3 критерию. На вход алгоритма могут подаваться только двухкомпонентные поля скорости с обязательными полями во входных данных (x , y , v_x (или V_x), v_y (или V_y), s). На Рис. 2-65 приведено диалоговое окно выбора параметров алгоритма **Adaptive Median Filter**.

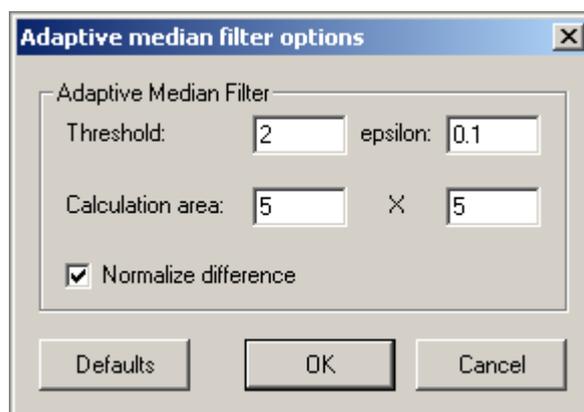


Рис. 2-65 Диалог выбора параметров алгоритма Adaptive Median Filter

В области **Calculation area** указывается локальная область для каждого исследуемого вектора, для которой будет применяться фильтр.

Значение порога **Threshold** соответствует величине k (см раздел 1.2.4.3), значение по умолчанию равно 2.

Если включена опция **Normalize difference**, то при нормировке дополнительно используется значение **epsilon**, обычно равное 0,1.

2.6.3.4. Отсев по абсолютному значению скорости

Метод отсева по абсолютному значению скорости, описанный в разделе 1.2.4.3, исключает вектора скорости, которые не удовлетворяют следующим критериям:

$$V_{x_{\min}} < V_x < V_{x_{\max}}, V_{y_{\min}} < V_y < V_{y_{\max}}, |\vec{V}|_{\min} < |\vec{V}| < |\vec{V}|_{\max}$$

Входные параметры процедуры отсева указаны на Рис. 2-66. Метод работает только с двухкомпонентными полями скорости. Обязательными полями во входных данных являются (x, y, vx, vy, s) .

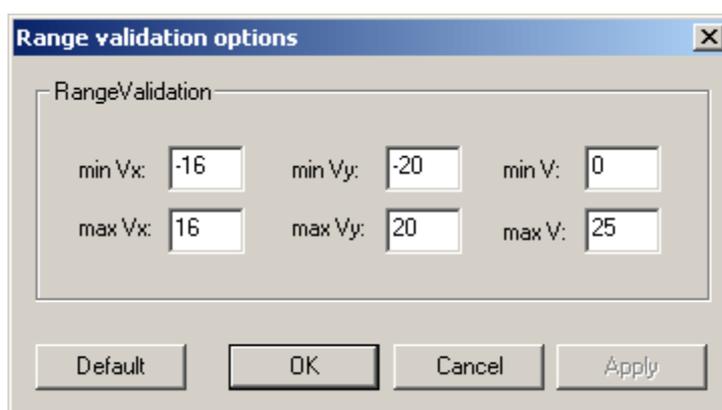


Рис. 2-66 Диалог выбора параметров алгоритма Range Validation

2.6.4. Интерполяция векторных полей

Алгоритм интерполяции векторных полей **Interpolation Procedure**, использующий описанную в разделе 1.2.5 процедуру, применяется после алгоритмов отсева и до алгоритма расчета дифференциальных характеристик и процедуры восстановления трехкомпонентных полей скорости.

Алгоритм применяется к типам данных, содержащих поля x, y, vx, vy и s , при этом размерности полей x и y должны совпадать. Результатом работы алгоритма является поле скорости, которое содержит только указанные выше поля, при этом все вектора, идентифицированные ранее как неверные, интерполируются.

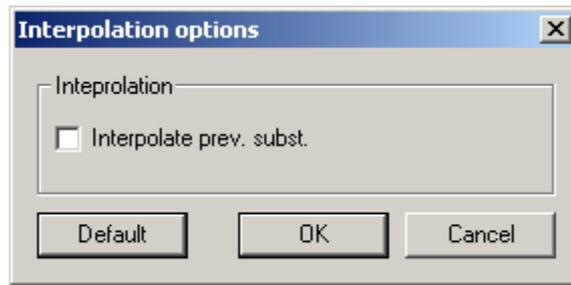


Рис. 2-67 Диалоговое окно алгоритма интерполяции.

В случае использования опции **Interpolate prev. subst.** (см. Рис. 2-67) вектора, замененные ранее, будут интерполированы повторно.

2.6.5. Расчет полей производных

Расчет пространственных дифференциальных характеристик осуществляется при помощи алгоритма **Derivatives Calculation** (см Рис. 2-68).

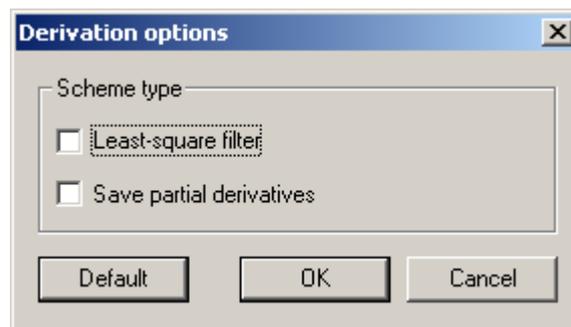


Рис. 2-68 Диалоговое окно алгоритма расчета пространственных производных.

Обязательным условием на входные данные является наличие полей **x**, **y**, **vx** и **vy**. При этом размерности координат и скорости должны попарно совпадать. Процедура расчета описана в разделе 1.2.7, используется либо центрально-разностная схема второго порядка, либо схема **Least squares**. Выходными данными являются поля **x**, **y**, **wz** и **sz**, где предпоследнее и последнее поля соответствуют нормальным к измерительной плоскости компонентам завихренности и деформации. Возможно сохранение в базу данных полей частных производных **dvx/dx**, **dvx/dy**, **dvy/dx** и **dvy/dy**, если во входных данных присутствует поле **vz**, то в поля частных производных входят величины **dvz/dx** и **dvz/dy**.

2.6.5.1. Расчет поля завихренности

Описанный в предыдущей главе алгоритм расчета пространственных дифференциальных характеристик записывает в базу данных поля напряжения и завихренности, рассчитанные по формулам:

$$\omega_z = \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right), \quad s_z = \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)$$

2.6.5.2. Расчет пространственной корреляционной функции

В программном обеспечении реализован алгоритм прямого расчета пространственных двухточечных корреляционных функций **Spatial Correlation** (Рис. 2-69) от средних или мгновенных полей скорости.

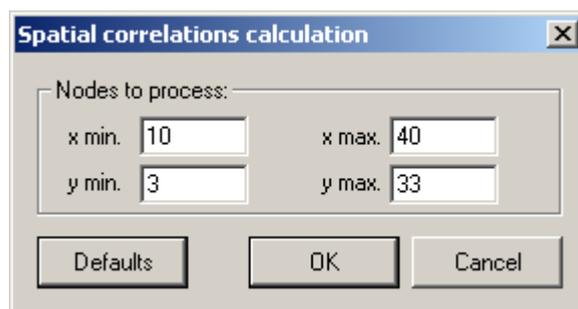


Рис. 2-69 Диалоговое окно алгоритма расчета пространственных корреляционных функций.

Обязательным условием на входные данные является наличие полей **x**, **y**, **vx** (или **Vx**) и **vy** (или **Vy**), дополнительно используется **vz** (или **Vz**). В полях диалогового окна заполняются начальные и конечные (включительно) узлы области, для которой проводится расчет. На выходе алгоритм выдает нормированную корреляционную функцию:

$$R_{ij}(x, y) = \frac{\sum_{x \geq x_{\min}}^{x_{\min} + x \leq x_{\max}} \sum_{y \geq y_{\min}}^{y_{\min} + y \leq y_{\max}} u_i(x_{\min}, y_{\min}) u_j(x_{\min} + x, y_{\min} + y)}{\sum_{x \geq x_{\min}}^{x_{\min} + x \leq x_{\max}} \sum_{y \geq y_{\min}}^{y_{\min} + y \leq y_{\max}}}$$

2.6.5.3. Расчет одномерной спектральной плотности.

Алгоритм **Spatial Spectrum** (Рис. 2-70) рассчитывает одномерную спектральную плотность скорости в потоке (как средней, так и мгновенной). При этом используется приближение выполнения Корреляционной теоремы для дискретного преобразования Фурье.

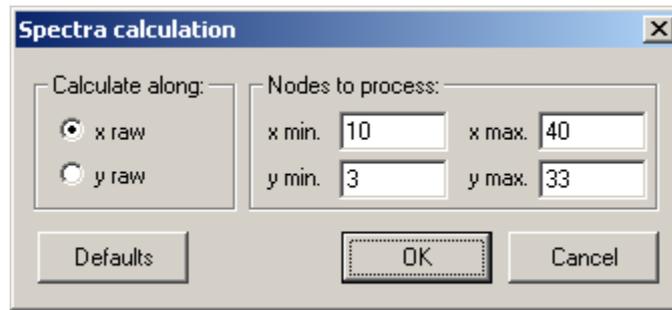


Рис. 2-70 Диалоговое окно алгоритма расчета пространственных спектров.

Требуется указать, в какой области будет проводиться расчет, и по какой из координат берется преобразование Фурье, при этом по другой координате проводится осреднение спектра (если размер области по этой координате превышает один узел). На входе алгоритм принимает поля аналогично алгоритму расчета корреляционных функций, результирующим данным является профиль следующих одномерных пространственных спектров:

$$F_{ij}(k_k) = \frac{2\pi}{x_{\max} - x_{\min}} \Phi(u_i(x_k)) \Phi^*(u_j(x_k)), \text{ где}$$

$\Phi(u_i(x_k)) = \frac{1}{2\pi} \sum_{x_k=x_{\min}}^{x_k=x_{\max}} u_i(x_k) \exp(-k_k x_k) \Delta x_k$ – дискретное одномерное преобразование Фурье.

2.6.6. Расчет статистических характеристик

2.6.6.1. Расчет статистических моментов

Расчет статистических величин выполняется алгоритмом **Statistics** и описан в разделе 1.2.6. Диалоговое окно ввода параметров для этого метода показано на Рис. 2-71. Первый элемент управления – флажок **Use substituted vectors for statistics** – в активном состоянии позволяет учитывать замененные значения (например, интерполированные) при расчете статистики. Следующей опцией является **Count sample range**, которая позволяет сохранять ширину выборки, использованной для расчета каждого значения с определенными координатами. Это необходимо для определения размера реальной выборки для каждого значения результирующего поля (без учета неверных векторов).

Алгоритм может применяться к выборке данных длиной не менее двух. После расчета результат добавляется к первому выбранному данному из группы входных данных (см. Рис. 2-72).

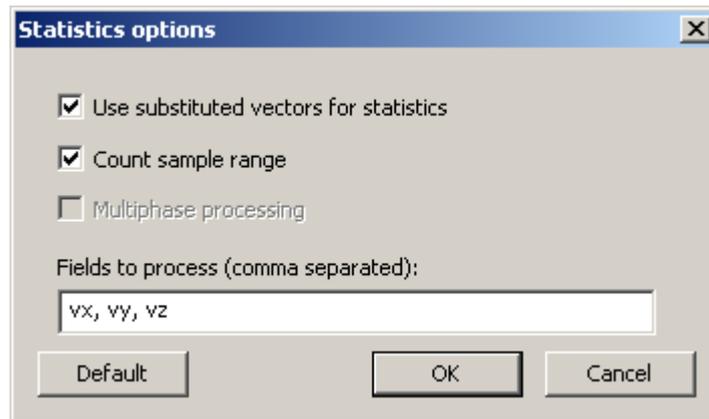


Рис. 2-71 Диалоговое окно ввода параметров алгоритма расчета статистики

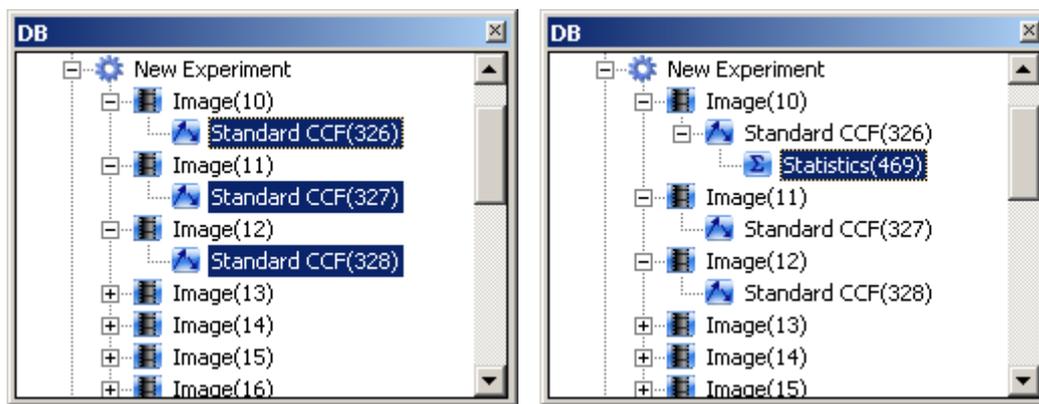


Рис. 2-72 Выбор группы векторных данных и результат работы процедуры расчета статистики

В результате работы алгоритма рассчитываются смешанные и прямые статистические моменты полей данных, перечисленных в поле **Fields to process**. Названия полей разделяются запятыми.

Входные данные процедуры расчета статистики должны быть однотипными, т.е. если первый узел из выборки имеет условные поля **ab, cd, ef, jh** и т.д. из интересующих полей, то и все остальные узлы из выборки должны содержать такие же поля. В результате будут рассчитаны статистические моменты первого порядка или, другими словами, средние значения указанных выше полей **Ab, Cd, Ef, Jh** и т.д. Как можно заметить, названия средних полей формируются заменой первой буквы на заглавную. Рассчитываются также моменты второго порядка. Например, для полей **wx** и **yz** такой смешанный момент второго порядка будет называться **(wx-Wx)(yz-Yz)**, где **wx** и **yz** – это любые из начальных полей {**ab, cd, ef, jh** и т.д.}. Если **wx** и **yz** – одно и то же поле, то результирующим полем будет прямой момент второго порядка с названием **(yz-Yz)^2**. По той же схеме рассчитываются и третьи статистические моменты. Возможные варианты названий таких полей следующие: **(uv-Uv)(wx-Wx)(yz-Yz)**, **(wx-Wx)^2(yz-Yz)**, **(yz-Yz)^3**. Статистический момент четвертого порядка рассчитывается только в прямом варианте и называется **(yz-Yz)^4**. Задачу по расчету

смешанных моментов полей **ab**, **cd**, **ef**, **jh**, описанную выше, можно решить, даже если каждое из полей находится в отдельном узле. Например, допустим, что в узлах под именем **Field_ab_cd(#n)** находятся поля **ab**, **cd**, а **#n** означает порядковый номер узла. В узлах под именем **Field_ef(#n)** и **Field_jh(#n)** находятся поля **ef** и **jh** соответственно. Положим, что имеется **k** узлов каждого из трех видов. Далее необходимо воспользоваться группами выделений (см. 2.4.3.2.3). Пусть узлы вида **Field_ab_cd(#n)** выделены в группе №1, узлы вида **Field_ef(#n)** в группе №2, а узлы вида **Field_jh(#n)** выделены обычным способом. Входные данные, организованные таким образом, на выходе дадут результат, который не будет отличаться от результата применения процедуры на единственной группе узлов, каждый из которых содержит все четыре поля. Изложенный способ необходим, когда нужно рассчитать корреляции величин, полученных различными алгоритмами. Такие величины, очевидно, будут находиться в различных узлах. К примеру, для изучения многофазных потоков применяются одни алгоритмы для расчета поля скорости несущей фазы (**vx**, **vy**) и отдельные алгоритмы для дисперсной фазы (**ux**, **uy**). Описанный способ позволяет рассчитать смешанные статистические моменты вида **(ux-Ux)(vx-Vx)(vy-Vy)** и все остальные возможные варианты по вышеизложенной схеме.

В режиме подсчета ширины выборки, когда отмечена галочка **Count sample range**, каждому результирующему полю вида **fieldname** будет соответствовать поле **fieldname_n**, содержащее значение ширины выборки. К примеру, полю вида **(wx-Wx)(yz-Yz)** будет соответствовать поле **(wx-Wx)(yz-Yz)_n**.

2.6.6.2. Расчет статистических моментов (быстрый метод)

Алгоритм **Statistics Fast** отличается от алгоритма **Statistics** тем, что может быть применен только на одном наборе данных. Т.е. все поля **ab**, **cd**, **ef**, **jh** должны находиться в одном данном. При этом скорость его работы в два раза выше, что делает его предпочтительным, если не нужно рассчитывать смешанной статистики нескольких наборов данных.

Еще одним отличием является расчет ширины выборки при включенной опции **Count sample range**. Ширина рассчитывается не для каждого результирующего поля, а один раз, и записывается в поле с названием **sample_range**.

2.6.6.3. Расчет корреляционных функций и одномерных спектров для турбулентных пульсаций скорости

Алгоритмы **Correlation Statistics** и **Spectrum Statistics** рассчитывают корреляционную функцию и одномерный спектр от турбулентных пульсаций скорости соответственно:

$$R(u_i' u_j') = \langle R(u_i u_j) \rangle - R(U_i U_j), \quad F(u_i' u_j') = \langle F(u_i u_j) \rangle - F(U_i U_j)$$

Процедуры использования алгоритмов аналогичны друг другу:

Поле корреляционной функции/спектра, рассчитанное по среднему полю скорости процедурой **Statistics**, нужно выделить фиксированным выделением (**Fixed selection**), а поля, рассчитанные по мгновенной скорости, –обыкновенным:

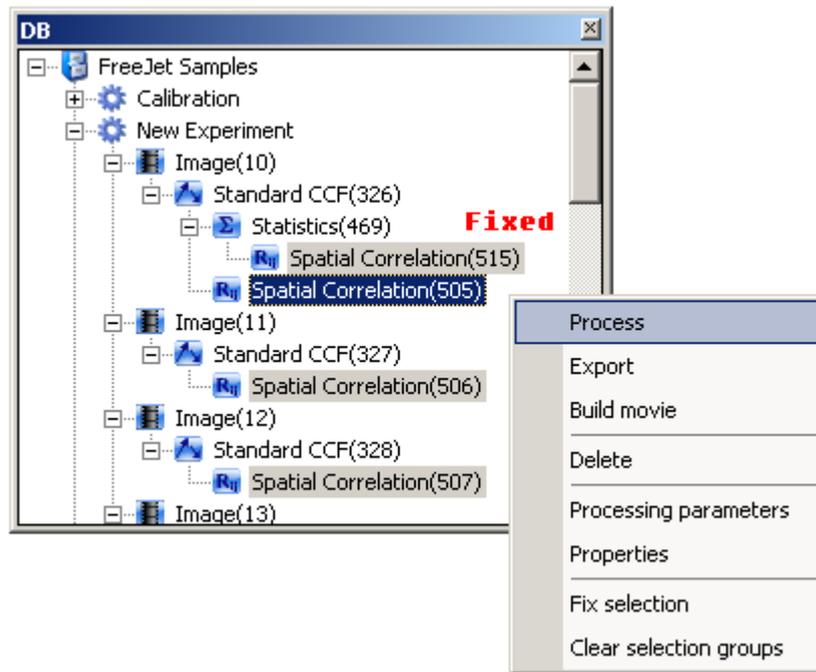


Рис. 2-73 Выделение корреляционных функций для поля средней и набора полей мгновенной скорости для расчета корреляционной функции для турбулентных пульсаций.

На выходе алгоритм выдает осредненную по ансамблю корреляционную функцию/спектр турбулентных пульсаций.

2.6.6.4. Расчет средней интенсивности и среднеквадратичного отклонения интенсивности для группы изображений

Процедура **Image Statistics** позволяет рассчитать среднюю интенсивность по группе изображений, а так же среднеквадратичное отклонение интенсивности по группе (см. Рис. 2-74). Алгоритм может применяться как к двойным, так и к однокадровым изображениям с разрядностью цвета 8 и 16 бит на канал.

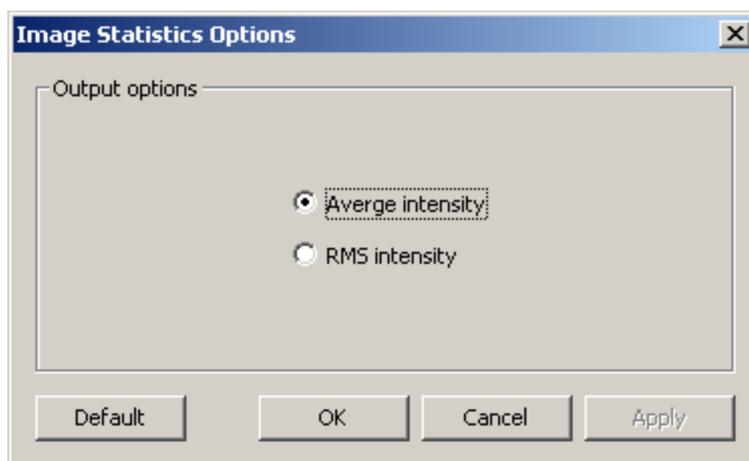


Рис. 2-74 Диалог выбора типа выходных данных для расчета статистики по изображениям

Усреднение интенсивности по группе изображений обычно бывает необходимо для получения изображения с фоновой засветкой, бликом или иным нежелательным эффектом, связанным с процессом получения изображений. Расчет среднеквадратичного отклонения интенсивности поможет определить, в какой области измерительного объема находятся частицы-трассеры, либо каков уровень шума камеры.

2.6.7. Построение профилей

Построение профилей вдоль выбранного направления на двумерном поле осуществляется при помощи алгоритма **Profile**. Алгоритм получает на вход двумерное поле (например, поле скорости). На выходе алгоритма – зависимость вида $s_i = f(l_i)$ для каждого поля из исходного данного (кроме полей координат и статуса).

Диалог настройки параметров этого алгоритма приведен на Рис. 2-75. В этом диалоге необходимо задать ось, вдоль которой будет построен профиль (группа параметров **Points**), расстояние между точками на профиле (**Step**), в которых определяются значения всех величин, и метод интерполяции (**Interpolation type**). Ось l задается двумя точками: начальной (**From**) и конечной (**To**); начало координат (нулевое значение) для этой оси устанавливается в начальной точке, направление оси – из начальной точки в конечную. Координаты начальной и конечной точек и шаг задаются в той же размерности, в которой хранятся координаты в исходных данных (например, для поля скорости, полученного алгоритмом **Standard CCF**, координаты задаются в пикселях). Доступно два метода интерполяции (**Interpolation type**): билинейная (**Bilinear**) и без интерполяции (**Nearest value**), при этом в качестве значения в точке профиля используется значение в ближайшей точке исходного поля.

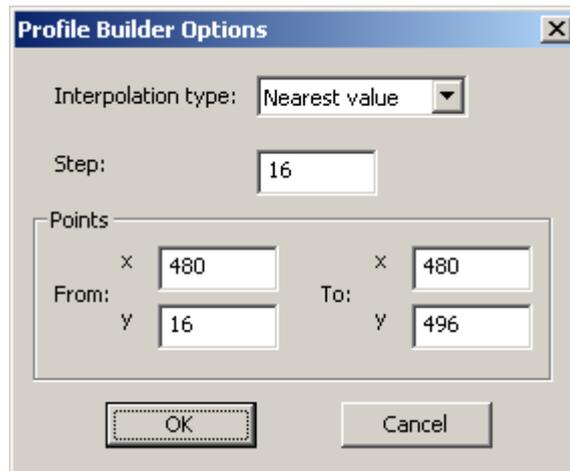


Рис. 2-75 Параметры алгоритма построения профилей

2.6.8. Наложение масок

Маскирование изображений и двумерных полей – это способ отсева пикселей изображения или значений в узлах сетки двумерного поля, основанный на наложении маски на объект данных. Маска имеет размер, соответствующий размеру маскируемого изображения или изображения, на основе которого было получено маскируемое данное. Точка маски может иметь два значения: годная (**normal**) и подлежащая маскированию (**masked**). Маски добавляются в базу путем импорта специально подготовленного изображения (см. 2.4.5.4). Также в качестве маски может быть использовано изображение, при этом точки белого цвета (значение яркости 255 для изображений разрядностью 8 бит) на изображении-маске рассматриваются как подлежащие маскированию. Если изображение-маска является двухкадровым, то кадры складываются, аналогично операции **Add** в описанной в разделе 2.6.9 расчетной процедуре, и полученное изображение используется для маскирования.

2.6.8.1. Наложение маски на изображения

Маскирование изображений выполняется при помощи процедуры **Mask Image**. Для маскирования группы изображений выделите необходимую маску (группу масок) в дереве базы данных и зафиксируйте выделение при помощи команды контекстного меню **Fix Selection** (см. 2.4.3.2.3). После этого выделите изображения, которые необходимо маскировать, и выберите команду **Process**, в диалоге обработки выберите соответствующий алгоритм.

Алгоритм маскирования изображений заменяет значения пикселей результирующего изображения, соответствующих значениям **masked** маски, на заданное вами значение (см. Рис. 2-76). В диалоге настройки параметров этого алгоритма (см. Рис. 2-77) можно выбрать значение яркости отсеянных пикселей (**Out areas**). Это может быть черный

(**Black**, значение яркости – 0) или белый цвет (**White**, значение яркости – 255), среднее (**Mean pixel value**, вычисляется по всем не подлежащим маскированию пикселям изображения) или заданное вами значение яркости (**Defined value**, значение, введенное в поле **Brightness value**).

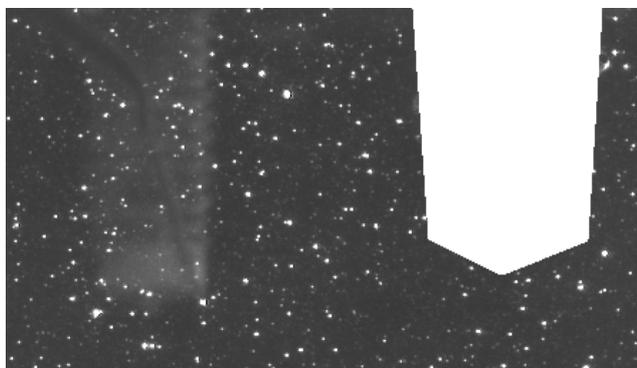


Рис. 2-76 Маскированное изображение

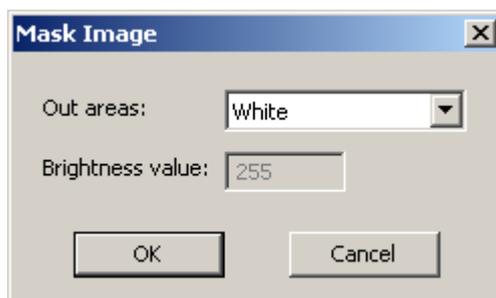


Рис. 2-77 Параметры алгоритма маскирования изображений

2.6.8.2. Наложение маски на поле данных

Маскирование данных выполняется при помощи алгоритма обработки **Mask Data**. Для наложения маски на группу полей данных, аналогично изображениям (см. 2.6.8.1), выделите маску (группу масок) при помощи фиксированного выделения и группу данных, после чего в диалоге обработки выберите процедуру обработки **Mask Data**.

Координаты в данных, которые нужно маскировать, должны иметь размерность пикселя (координаты имеют размерность миллиметра в трехкомпонентных полях скорости, а также в некоторых в импортированных данных). На данный момент возможно маскирование двумерных полей данных с регулярной прямоугольной сеткой. Каждому значению (узлу сетки) в таких данных соответствует прямоугольная область маски. Узел сетки считается подлежащим маскированию, если некоторый процент пикселей из этой области подлежит маскированию. Вы можете задавать долю пикселей (в процентах), при которой узел сетки считается негодным (**Percentage**, см. Рис. 2-78).

Маскирование полей данных состоит в замене значения статуса узла сетки (**s**) на **False vectors (masked)**, либо на **Out of Flow** у отсеянных узлов сетки.

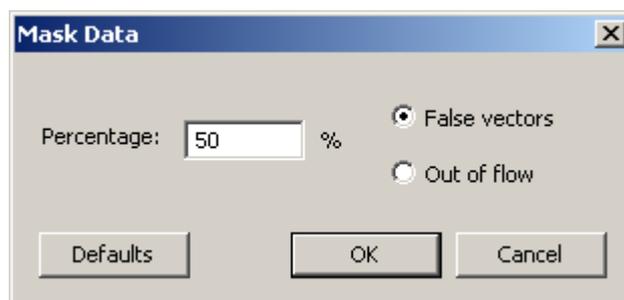


Рис. 2-78 Параметры алгоритма маскирования полей данных

2.6.9. Арифметические операции над изображениями

Группа арифметических операций с изображениями объединена в алгоритм с названием **Image Arithmetic**. Алгоритм позволяет выполнять операции вычитания, сложения, умножения и деления над интенсивностью изображений. Все операции выполняются над каждым пикселем изображения и могут быть двух типов. Первый тип соответствует случаю, когда оба операнда являются изображениями, здесь первый операнд — выбранные изображения к которым необходимо применить арифметическую операцию, второй операнд — изображения, помеченные как фиксированное выделение (**Fixed Selection**) перед выполнением операции. Второй тип операции — когда второй операнд является константным значением интенсивности, которое задается в диалоге параметров алгоритма (см. Рис. 2-79).

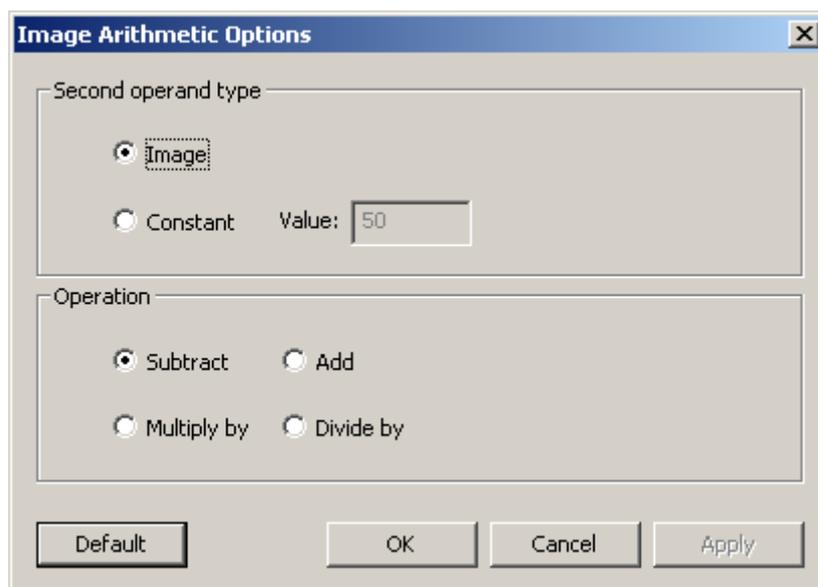


Рис. 2-79 Диалог выбора параметров для процедуры выполняющей операции над изображениями

2.6.10. Фильтрация изображений

Расчетная процедура Image Filter предоставляет набор фильтров для монохромных изображений. Линейные фильтры изображений основаны на следующем преобразовании:

$$I'(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=-w, j=-h}^{i=w, j=h} A(i, j) \cdot I(x + i, y + j)$$

где $I(x, y)$ – это точка с координатами (x, y) на исходном изображении, $I'(x, y)$ – точка на вычисленном изображении, $A(i, j)$ – элемент матрицы фильтра, $n = w' \cdot h' = (2 \cdot w + 1) \cdot (2 \cdot h + 1)$ – размер матрицы фильтра. К этому типу фильтров относится сглаживающий фильтр **Average**, все элементы матрицы которого равны единице.

Шумоподавляющий фильтр **Median** сортирует точки в окрестности текущей и выбирает среднее по порядку значений. Фильтр **Subtract median** вычитает из текущего значения интенсивности пикселя медианное значение по его окрестности. Это позволяет эффективно удалять фоновую динамическую засветку изображения с частицами, которая изменяется от кадра к кадру.

Модуль разности значений в соответствующих точках вычисленного и исходного изображений сравнивается с пороговым значением t и при необходимости вычисленное значение заменяется исходным:

$$I_{resulted}(x, y) = \begin{cases} I'(x, y), & |I'(x, y) - I(x, y)| > t \\ I(x, y), & |I'(x, y) - I(x, y)| \leq t \end{cases}$$

Порог может применяться, например, для удаления отдельных «битых» и «горячих» точек матрицы камеры.

Настраиваются следующие параметры расчетной процедуры (см. Рис. 2-80): вид фильтра (**Filter type**), ширина w (**Width**) и высота h (**Height**) матрицы фильтра, значение порога t (**Threshold**). Фильтрация может проводиться только в заданной прямоугольной области изображения (опция **Use area**), прямоугольник задается координатами левой нижней (**left** и **bottom**) и правой верхней (**right** и **top**) точек. Изображение может быть обрезано согласно заданному прямоугольнику (опция **Crop image**). Фильтр применяется заданное число раз (**Iterations number**).

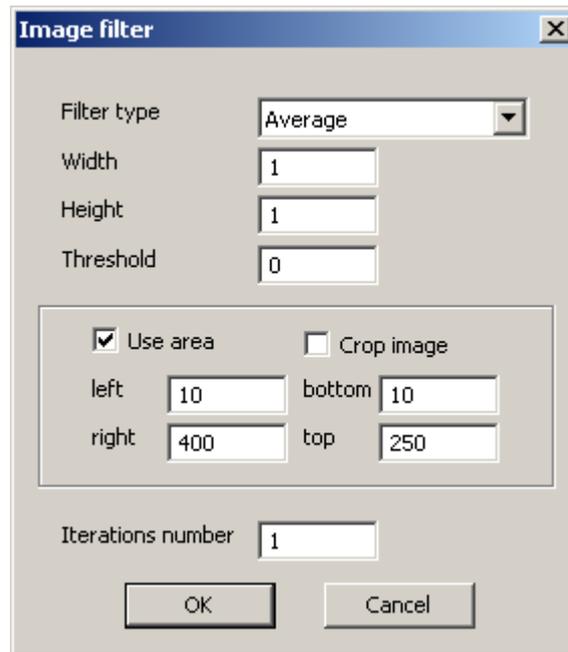


Рис. 2-80. Параметры процедуры фильтрации изображений

2.6.11. Построение гистограмм по ансамблю полей данных

Алгоритм **Histogram** позволяет проанализировать ансамбль данных и построить распределение исследуемых значений.

Для этого необходимо выделить интересующий нас набор однородных полей и применить указанный алгоритм. В диалоге настроек в поле ввода **Column names** необходимо перечислить поля для обработки, разделенные запятыми. Имена полей не могут содержать пробелы, разделенные пробелом части названия будут интерпретироваться как отдельные поля. Следующим необходимым параметром является ширина бина (столбца гистограммы) для расчета распределения (**Bin width**).

Полученные в результате расчета данные могут быть записаны в двух видах: в виде профиля (см. 2.7.3.2) и в виде гистограммы (см. 2.7.2), для управления этим поведением необходимо, соответственно, отметить или снять галочку **Save as profile**.

В группе параметров **Mode** можно выбрать режим работы алгоритма. Режим **General** указывает алгоритму считать распределение, используя все поле. Режим **Specific point** позволяет посчитать распределение значений с определенными координатами, указанными в полях **X** и **Y**. В режиме **Fractional part** алгоритм рассчитывает распределение дробной части значений по всему полю. Результаты данных, посчитанных в последнем режиме, нормируются, если отмечена галочка **Normalized**.

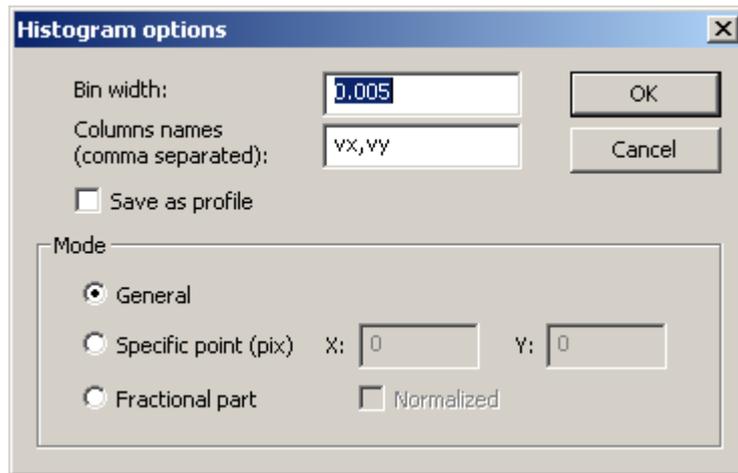


Рис. 2-81. Параметры процедуры построения гистограмм

2.7. Отображение данных

2.7.1. Двумерные поля данных

2.7.1.1. Окно визуализации полей

Окно визуализации включает в себя область построения, список визуализируемых объектов, палитру, линейку и панель информации (см. Рис. 2-83).

Линейка отображает координатные оси области построения и текущее положение курсора мыши. На панели информации, расположенной в нижней части окна, показывается размер области построения в пикселях и координаты курсора на области построения в той же размерности, что и на линейке, а также параметры, зависящие от типа объекта, активного в списке объектов (работа со списком объектов описана в пункте 2.7.1.6).

Из контекстного меню (открывается по щелчку правой кнопкой мыши в области построения, см. Рис. 2-82) доступны следующие команды: настройка параметров отображения активного объекта в списке визуализации, переключение на отображение размерных/безразмерных величин, изменение масштаба, наложение сетки на изображение и отключение отдельных элементов (пункты меню **Show ruler**, **Show scale bar**, **Show objects List**, **Show status bar**).

Пункт меню **Options** открывает диалог настройки параметров отображения объекта визуализации, активного в списке объектов (на который установлен курсор). Команда **Save options** сохраняет текущие параметры отображения активного объекта в текущий профиль настроек программы, а команда **Use default options** сбрасывает настройки

этого объекта на настройки, определенные в текущем профиле настроек (подробнее работа с профилями настроек визуализации описана в пункте 2.7.6).

Пункт меню **Dimensional** позволяет переключить размерности, в которых отображаются значения на линейке, в панели информации и палитре. По умолчанию используются размерные величины: размерности расстояния — метр (**m**) и миллиметр (**mm**), размерность времени — секунда (**s**). При снятии флажка **Dimensional** в качестве размерности расстояния используется пиксель изображения (**pix**), размерность времени — задержка между кадрами (**dt**). Переключение режима затрагивает также диалоги настройки отображения различных типов полей. Отметим, что поле размером меньше 500 × 500 пикселей автоматически увеличивается до 500 пикселей по длинной стороне. В таком режиме линейка в безразмерном режиме отображает неверные значения.

Изменение масштабов изображения (вложенное меню **Zoom**) возможно в диапазоне от 10 % до 1000 % с шагом в 10 %, дополнительно доступны режимы автоматического масштабирования области построения: **Fit to window** (масштабирование области построения до размеров окна визуализации), **Fit to height** и **Fit to width** (масштабирование по высоте или ширине окна). Для изменения масштаба вместо пунктов меню **Zoom in 10 %** и **Zoom out 10 %** вы можете использовать клавиши + и -, а также выделение при помощи мыши области на изображении для увеличения ее до размеров области построения.

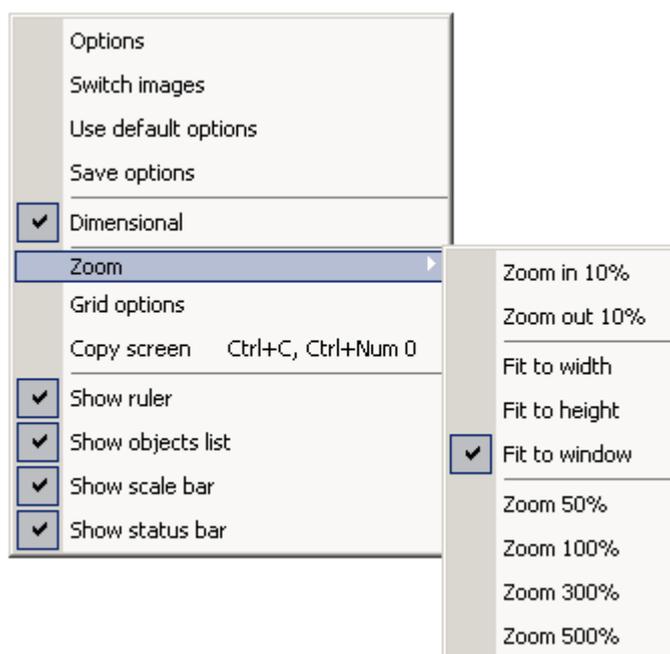


Рис. 2-82 Меню окна визуализации

Пункт меню **Grid options** открывает диалог настройки параметров накладываемой сетки (см. Рис. 2-83). Можно включить или выключить отображение сетки, выбрать стиль линий (сплошные (**Solid**) или пунктирные (**Dot**)), настроить размер ячейки (**Grid step**, в пикселях) и смещение относительно начала координат (**Grid offset**); при изменении параметров сетки изображение в окне автоматически обновляется.

Команда **Copy screen** копирует содержимое окна визуализации в буфер обмена в виде растрового изображения. Также для выполнения этих действий вы можете воспользоваться сочетанием клавиш **Ctrl+C**. Содержимое буфера обмена вы можете вставить, например, в документ MS Word или Adobe Photoshop. Команда **Copy palette**, доступная в меню, вызываемом щелчком правой кнопкой мыши в области палитры, копирует палитру в буфер обмена в векторном виде, что позволяет изменить шрифт, размер и другие параметры вставленного, например, в документ MS PowerPoint изображения.

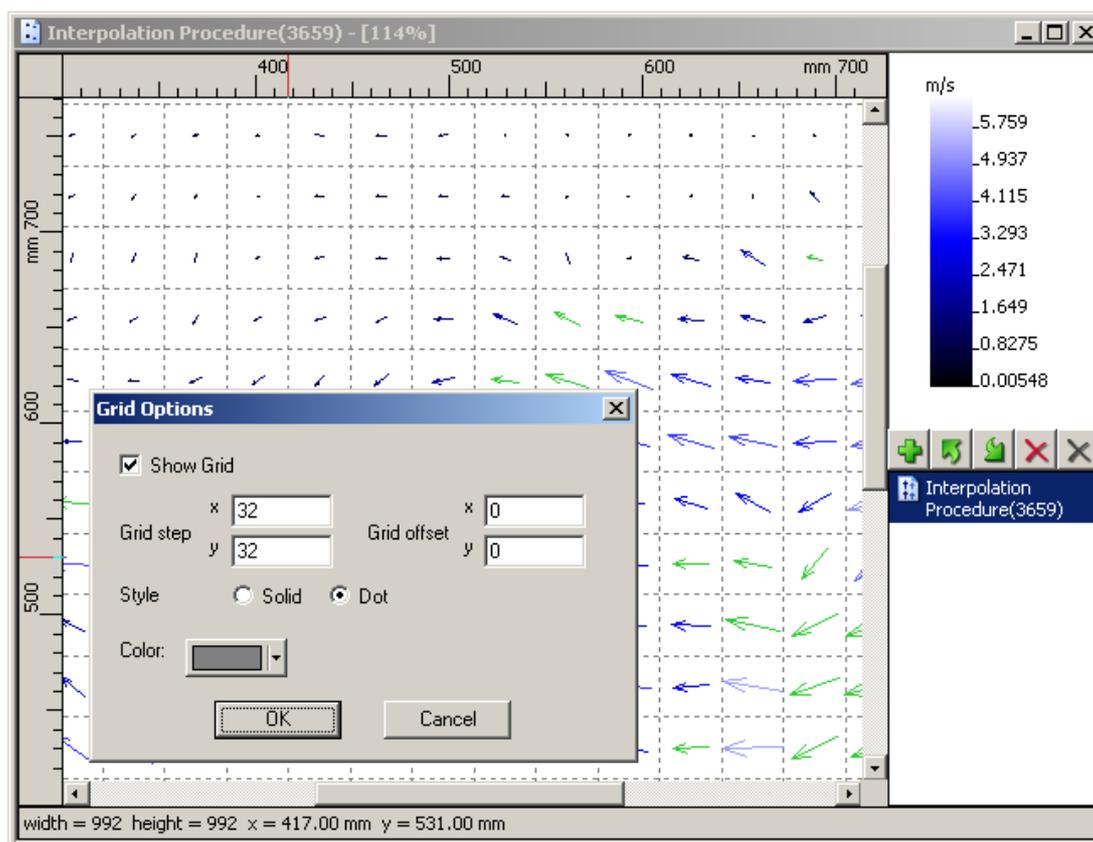


Рис. 2-83 Векторное поле с наложенной сеткой и диалог настройки сетки

2.7.1.2. Растровые изображения

Растровые изображения (и пары изображений) отображаются в том виде, в котором они были получены с камеры. Переключение между изображениями в паре осуществляется при помощи клавиши **Пробел**, либо пункта контекстного меню **Switch images**

(появляется, если активный объект списка – изображение). В панели информации показывается номер текущего изображения в паре и яркость точки изображения, находящейся под курсором. Диалог настройки палитры, вызываемый по команде **Options**, позволяет задать соответствие между яркостью пикселя и отображаемым цветом для монохромных изображений. В качестве границ значений палитры (**Data limits**) устанавливаются значения черного и белого цветов (0 и 255 для изображений разрядностью 8 бит). Подробно работа с диалогом палитры описана в разделе 2.7.1.5.

2.7.1.3. Векторные поля

Двумерные поля скорости визуализируются в виде векторных полей. Диалог настройки отображения векторных полей состоит из трех вкладок: **General**, **Colors** и **Advanced**. Изменения, вносимые в диалоге, немедленно используются для перерисовки поля скорости. Первая вкладка (**General**, Рис. 2-84) позволяет настраивать количество отображаемых векторов и их внешний вид. Частота, с которой изображаются стрелки векторов, задается отдельно по вертикали и по горизонтали (поля ввода **Draw every**), поля ввода **Use offset** задают номер первого выведенного на экран вектора (значение должно быть меньше, чем значение в поле **Draw every**). Например, на экран может выводиться только второй вектор из каждой тройки последовательно идущих векторов, при этом вектора рисуются на своих местах. Опция **Length** определяет масштабирование векторов по длине в процентах (по умолчанию 600 %), **Width** задает толщину линии стрелки в пикселях. Параметры **Head** и **Head min.** задают размер «наконечника» стрелки в процентах относительно длины вектора и минимальный размер наконечника в пикселях. Последняя группа элементов управления (**Position**) позволяет задавать положение вектора относительно узла сетки.

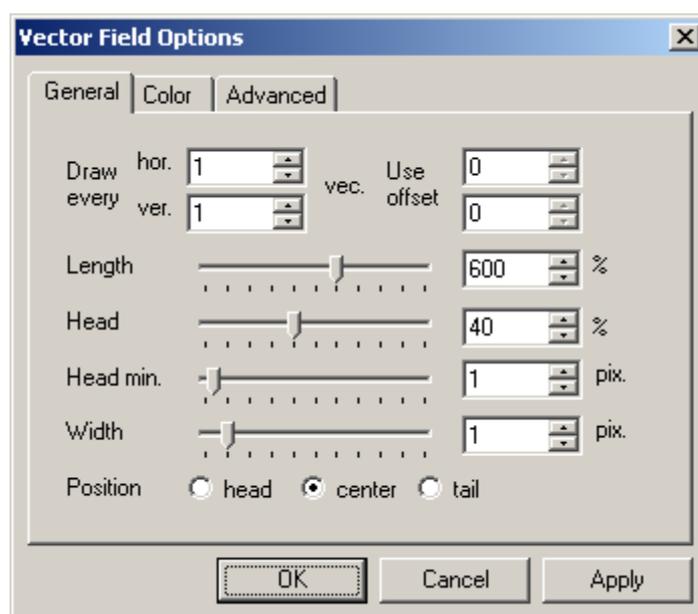


Рис. 2-84 Вкладка General диалога настройки векторного поля

Вкладка **Colors** (Рис. 2-85) отвечает за раскраску векторов. При помощи кнопок **Outlier**, **Interpolated**, **Masked**, **Peak not found** и **Out of flow** настраивается раскраска векторов в соответствии с их статусом, определенным на этапе обработки. Также можно скрыть вектора с определенным статусом, воспользовавшись опцией **hide** для соответствующего статуса. Вы можете отключить раскраску в зависимости от статуса, сняв галочку **Use validation status**. Параметр **Use defined scale options** нужен в случае, если определен логарифмический масштаб (или вычитание константного значения, см. описание вкладки **Advanced**), и раскраску необходимо проводить в соответствии с этим. Последняя кнопка (**Palette**) вызывает диалог настройки палитры для раскраски векторов в соответствии с их длиной. Работа с палитрой описана в пункте 2.7.1.5.

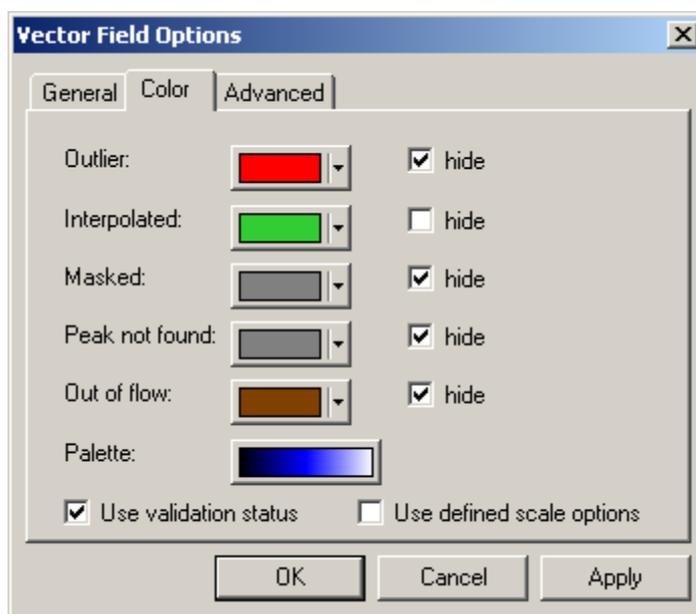


Рис. 2-85 Вкладка Colors диалога настройки векторного поля

Третья вкладка диалога настройки отображения векторного поля (**Advanced**, Рис. 2-86) дает возможность использовать логарифмическую шкалу для вертикальной и/или горизонтальной компоненты вектора (**Log. scale**), позволяет обнулить одну из компонент вектора (**Zero**) и вычесть заданное константное значение для каждого вектора (**Subtract**), в том числе среднее по всему полю (**Use mean vec.**).

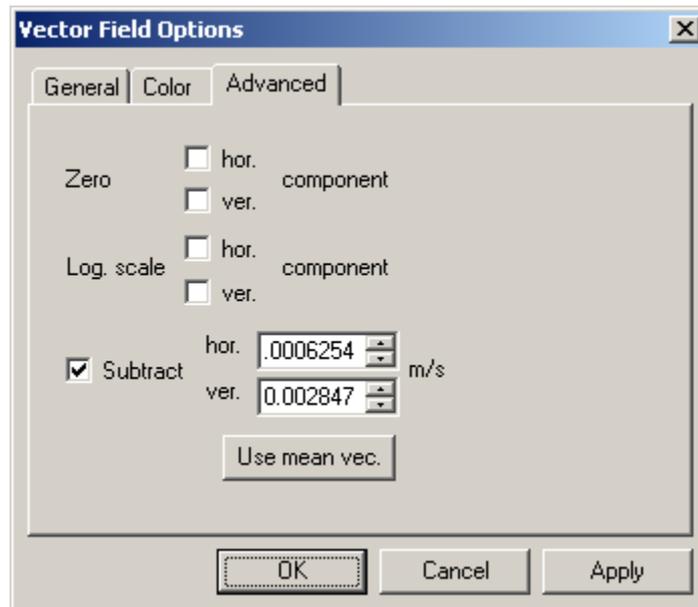


Рис. 2-86 Вкладка Advanced диалога настройки векторного поля

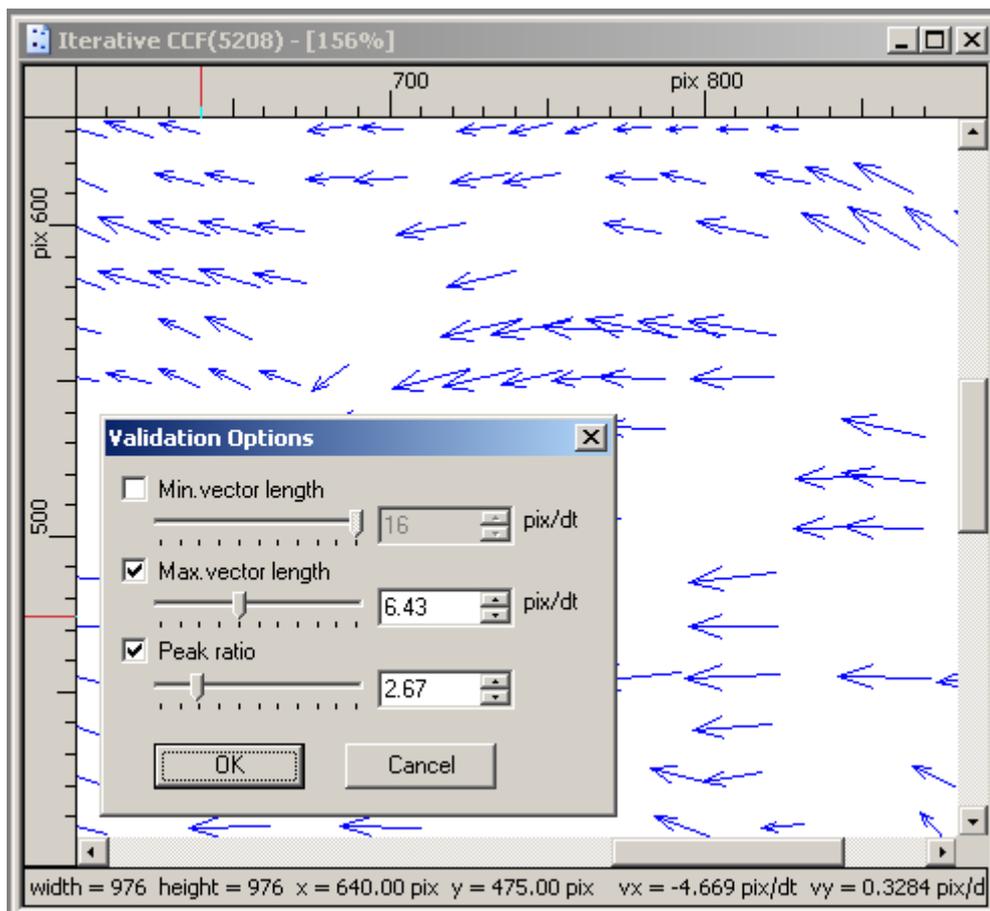


Рис. 2-87 Динамическая фильтрация векторного поля

Кроме диалога настройки отображения для векторных полей доступен диалог динамической фильтрации (если активный в списке объект – векторное поле, то в меню

окна визуализации добавляется пункт **Validation Options**). Этот диалог (см. Рис. 2-87) позволяет проводить отсев векторов в реальном времени по следующим критериям: минимальная длина вектора (**Min. vector length**), максимальная длина вектора (**Max. vector length**), минимальное соотношение пиков (**Peak ratio**). Не прошедшие какой-либо критерий вектора помечаются цветом, определенным для статуса **Outlier**. Для первых двух критериев вы можете задавать значения от нуля до значения расстояния между узлами сетки (за единицу расстояния принимается эта единица в таблице данных), для третьего – от 1 до 10.

В панель информации выводятся значения компонент вектора, находящегося под курсором, а также его длина (**length**).

2.7.1.4. Скалярные поля

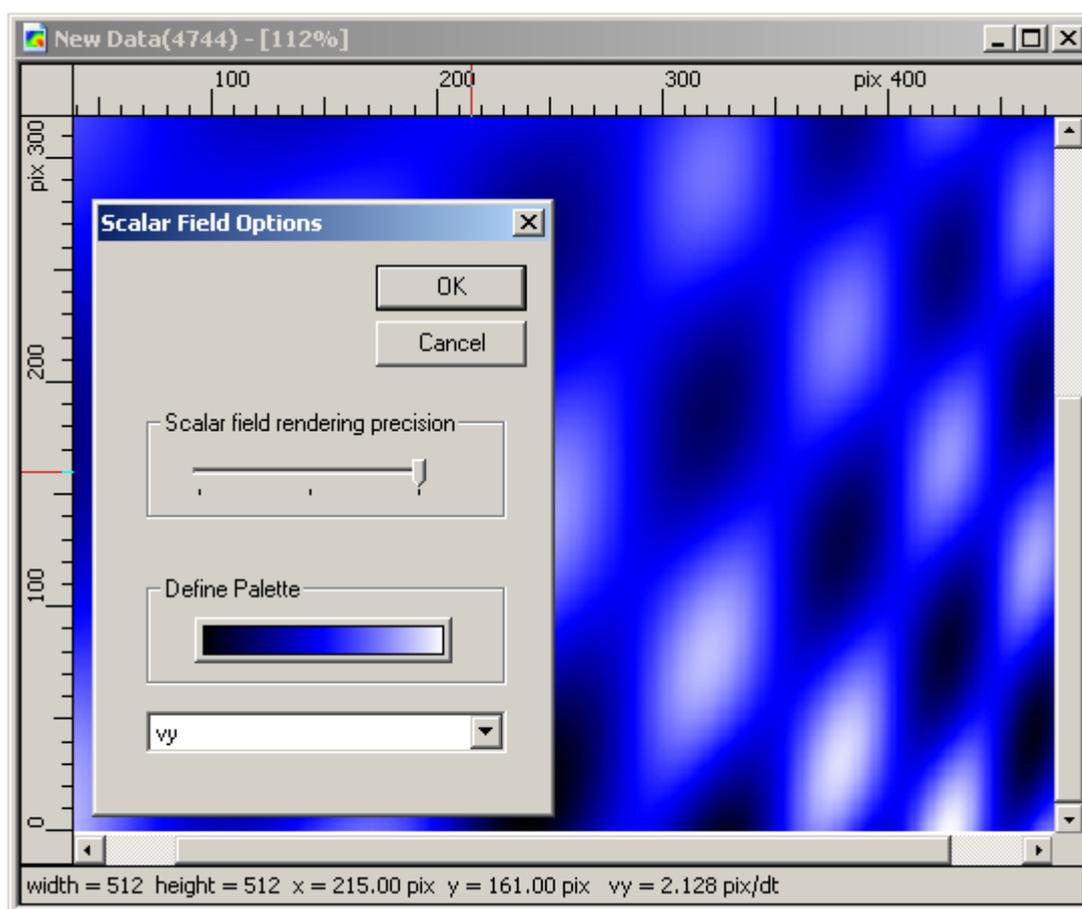


Рис. 2-88 Скалярное поле и его диалог настройки

Любая скалярная величина, содержащаяся в двумерном поле данных, может быть отображена в виде скалярного поля; для этого в диалоге настройки данного объекта (см. Рис. 2-88) предусмотрена возможность выбора поля для визуализации из числа содержащихся в объекте данных (выпадающий список). При визуализации данных в

виде скалярного поля используется интерполяция, что позволяет получить сглаженное изображение. Вы можете управлять степенью сглаживания (бегунок **Scalar field rendering precision**) и задавать палитру (кнопка **Define Palette**) для раскраски изображения в зависимости от значения в точке (настройка палитры описана в разделе 2.7.1.5).

На панели информации показывается интерполированное значение визуализируемой величины в точке изображения под курсором.

2.7.1.5. Работа с палитрой

Вид диалога настройки палитры представлен на Рис. 2-89. В нижней части диалога расположены поля ввода **Limits**, в которых задается диапазон значений, для которых определена палитра. Вы можете использовать диапазон значений тех данных, для которых задается палитра (**Use data limits**). Палитра настраивается путем задания нескольких точек (положение и цвет) в указанном диапазоне значений, цвета в остальных точках палитры интерполируются. Заданные точки отображаются в виде бегунков (**marker**) черного цвета; выделенный бегунок помечается синим цветом. Выделенный бегунок можно перемещать вдоль палитры при помощи мыши с зажатой левой кнопкой мыши (drag'n'drop) или задавая его положение в поле ввода **Position** и изменять цвет в соответствующей точке палитры (кнопка **Color**). Выделить бегунок можно, кликнув по нему левой или правой кнопкой мыши. Клик левой кнопкой мыши по палитре при зажатой клавише **Ctrl** добавляет точки, а правой кнопкой по бегунку – удаляет. На палитре всегда существуют две точки (наибольшее и наименьшее значения), которые нельзя удалить или переместить.

Значения в полях ввода **Min**, **Max** и **Position** показываются и задаются в текущей размерности окна отображения.

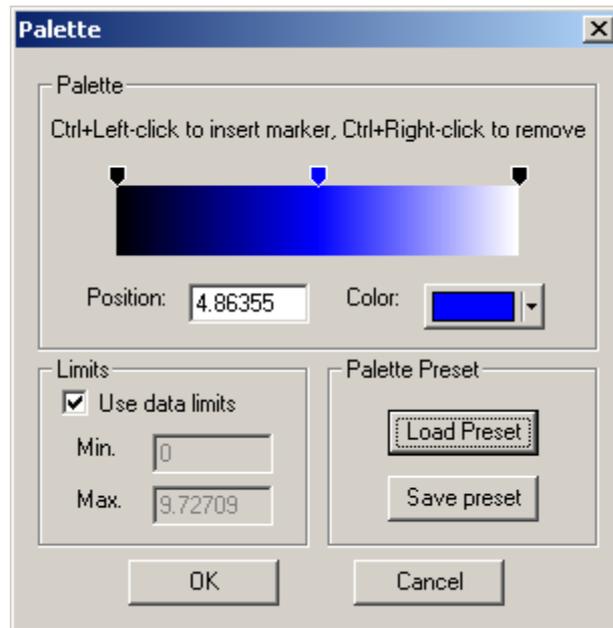


Рис. 2-89 Диалог настройки палитры

Кнопки **Load preset** и **Save preset** позволяют загружать палитру из файла и сохранять ее в файл. Настроив палитру, вы можете сохранить ее в файл, воспользовавшись кнопкой **Save preset** и потом использовать вашу любимую палитру на любом компьютере, загружая этот файл при помощи кнопки **Load preset**.

2.7.1.6. Комбинации полей

Одно окно визуализации может одновременно содержать несколько различных объектов, которые выводятся на экран один за другим согласно их порядку в списке объектов (Рис. 2-90). Объекты располагаются на области построения согласно координатам в таблицах данных (в миллиметрах). Существует два основных типа визуализируемых объектов – это векторные и растровые объекты. Растровый объект полностью перекрывает все векторные объекты. К векторным объектам относятся векторные поля, а также, например, калибровки для Stereo-PIV экспериментов и сетка, наложенная на область построения. Растровые объекты – это изображения, маски и скалярные поля. В виде комбинации векторного и скалярного поля отображаются трехкомпонентные поля скорости.

Название активного объекта выделено в списке. Вы можете изменять выделение при помощи мыши и клавиш **Вверх** и **Вниз**. Список объектов содержит кнопки добавления нового объекта в список, удаления, скрытия и перемещения вверх и вниз по списку активного объекта. Название скрытого объекта изображается серым цветом, а сам объект не выводится в область построения (это не относится к панели информации и к палитре активного объекта). Двойной щелчок мыши по объекту в списке открывает диалог настройки изображения соответствующий этому объекту.

Чтобы добавить объект в уже открытое окно, нужно перетащить его из окна базы данных в это окно при помощи мыши. При этом будет выбран тип визуализации по умолчанию. Также, если в окне открыто скалярное или векторное поле, вы можете воспользоваться кнопкой + списка объектов, чтобы добавить скалярное поле, построенное по одной из компонент объекта данных, который использован в активном поле. Не имеют смысла комбинации объектов, построенных по данным, имеющим различные размерности координат, например трехкомпонентного поля скорости и изображения. Тем не менее, такие комбинации не являются некорректными с точки зрения программы, и вы не получите сообщения об ошибке при попытке наложения таких объектов друг на друга.

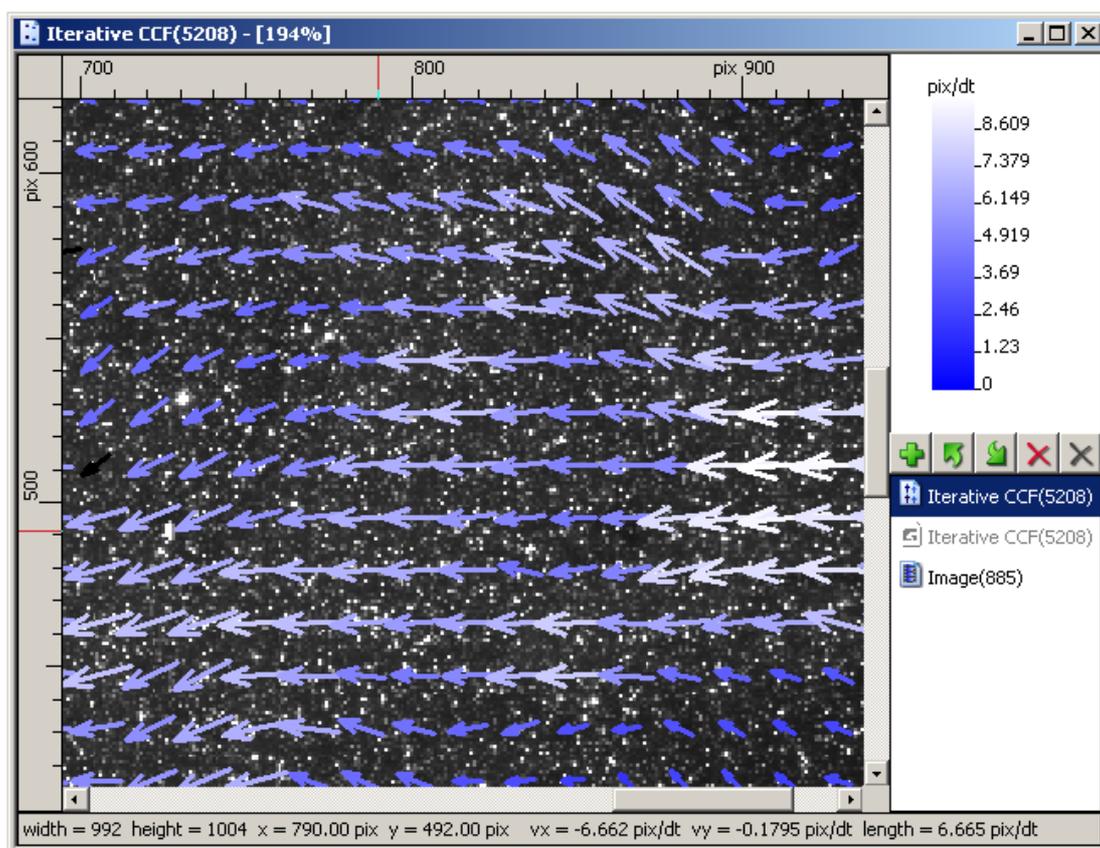


Рис. 2-90 Растровое изображение с наложенным на него векторным полем и скрытым скалярным полем

2.7.2. Гистограммы

Гистограммы могут быть построены по яркости растрового изображения и по данным, таким как поля скорости. Окно построения гистограмм (Рис. 2-91) включает в себя область построения, линейку, панель информации и список объектов (работа с аналогичным списком описана в разделе 2.7.1.6). По клику правой кнопкой мыши на области построения открывается меню, в котором можно отключить отдельные элементы окна (**Show objects list**, **Show ruler**, **Show status bar**), вызвать диалоги

настроек гистограммы, активной в списке объектов (**Options**, Рис. 2-92 и Рис. 2-93), и общих для всех отображаемых объектов опций (**General options**, Рис. 2-94), переключить режим отображения на размерный/безразмерный (**Dimensional**, работает аналогично окну построения полей, см. 2.7.1.1). Область построения всегда масштабируется до размеров окна. В одном окне может быть построено несколько гистограмм, при этом столбики гистограмм, соответствующие одному диапазону значений разных наборов данных, ставятся рядом. Добавить гистограммы в открытое окно можно, аналогично окну визуализации полей, при помощи кнопки **+**, либо перетаскив узел из окна базы данных (см. 2.7.1.6).

Диалог настройки конкретной гистограммы (Рис. 2-92) может быть вызван по двойному щелчку по имени объекта в списке, и позволяет выбрать цвет столбцов и поле данных из числа полей, содержащихся в используемом объекте данных. Для изображений можно задать область, по которой строится гистограмма (Рис. 2-93). Диалог **General options** задает диапазон значений, в котором строятся гистограммы. Группа параметров **X Axis** задает диапазон значений, в котором строится гистограмма, (**Min value** и **Max value**) и ширину диапазона, соответствующего одному столбцу (**Bin size**). Группа параметров **Y Axis** задает максимальную отображаемую высоту столбца гистограммы. Обе группы параметров позволяют использовать полный диапазон значений, включающий диапазоны всех наборов данных, использованных при построении гистограммы – для этого необходимо установить опцию **Use data limits** (установлена по умолчанию). Если в окне есть хоть одна гистограмма, построенная процедурой **Histogram** (см. 2.6.11) то ширину столбика (**Bin size**) нельзя изменить.

В панель информации, расположенную в нижней части окна, выводятся среднее значение (**average**) и среднеквадратичное отклонение (**rms**) для данных, по которым была построена выделенная в списке объектов гистограмма. Для изображений эти значения определяются по точкам в указанной области (Рис. 2-93).

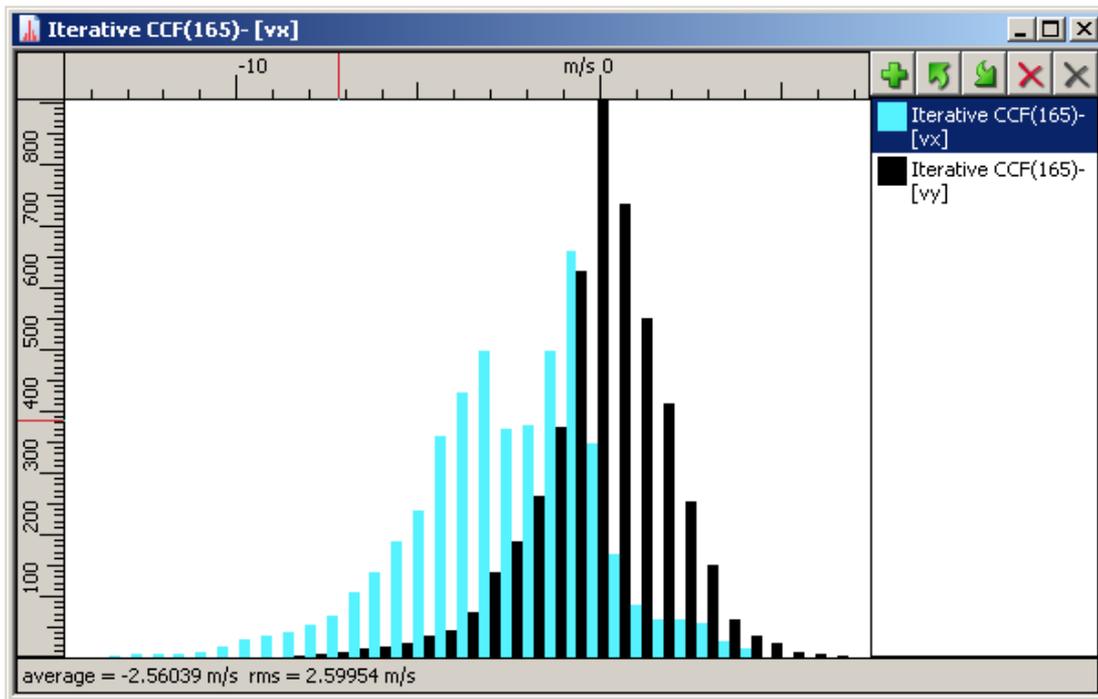


Рис. 2-91 Окно построения гистограмм

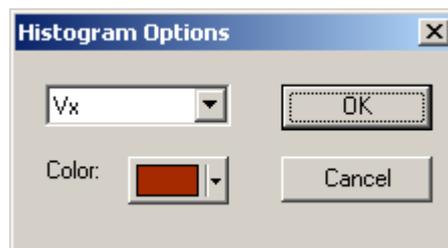


Рис. 2-92 Настройки гистограммы по данным

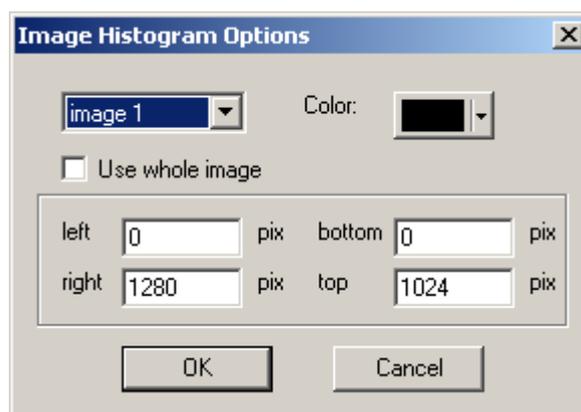


Рис. 2-93. Настройки гистограммы по изображению

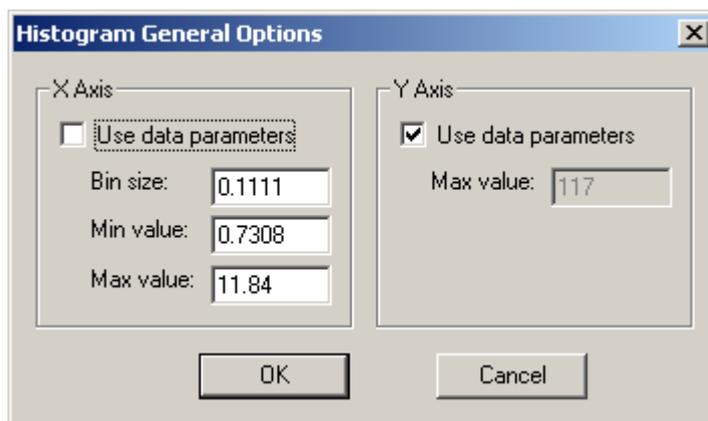


Рис. 2-94 Параметры построения гистограмм

2.7.3. Графики

2.7.3.1. Окно визуализации графиков

Окно визуализации графиков содержит область построения, линейки и список объектов (см. Рис. 2-96). Это окно во многом повторяет функциональность окна построения гистограмм (см. 2.7.2), например меню, открывающееся по клику правой кнопкой мыши в области построения, позволяет отключить линейку и список объектов, а также вызвать диалоги настроек объекта, активного в списке объектов (**Options**), и общих для окна опций (**General options**, Рис. 2-95), переключить режим отображения на размерный/безразмерный (**Dimensional**, работает аналогично окну построения полей, см. 2.7.1.1). Работа со списком объектов идентична таковой в окне гистограмм – вы можете добавлять, удалять, перемещать и скрывать объекты, а также вызывать диалог настройки параметров отображения объекта по двойному щелчку мыши по имени объекта в списке.

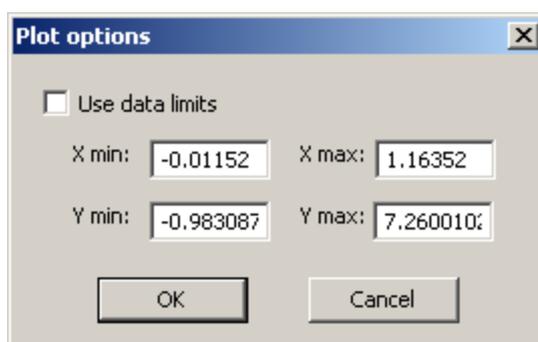


Рис. 2-95 Параметры отображения графиков

2.7.3.2. Профили

Этот тип объекта визуализации используется для отображения дискретных распределений вида $s_i = f(l_i)$, например полученных при помощи алгоритма построения профилей по полю данных. Пример такого профиля приведен на Рис. 2-96.

В диалоге настройки параметров (см. Рис. 2-97) вы можете выбрать поля из числа содержащихся в объекте данных для использования в качестве значений по горизонтальной (**Hor.**) и вертикальной (**Ver.**) осям. Доступно отображение логарифма от выбранной величины (**Log scale**), при этом отрицательные значения отбрасываются. Также можно задать цвет для маркеров (**Points**) и линии, соединяющей маркеры (**Line**). Опции **hide** позволяют отключить отображение линии и маркеров.

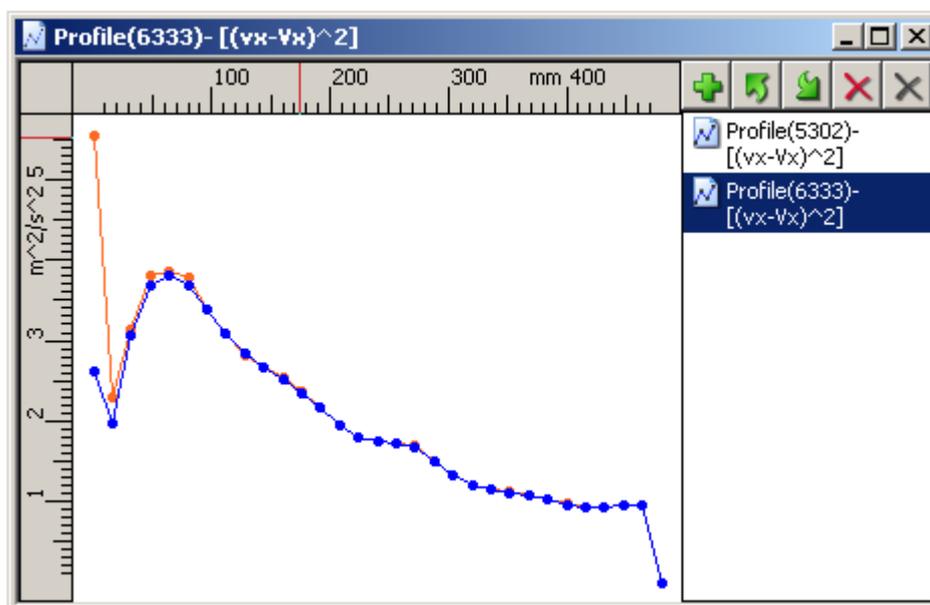


Рис. 2-96 Профили, построенные по полю скорости

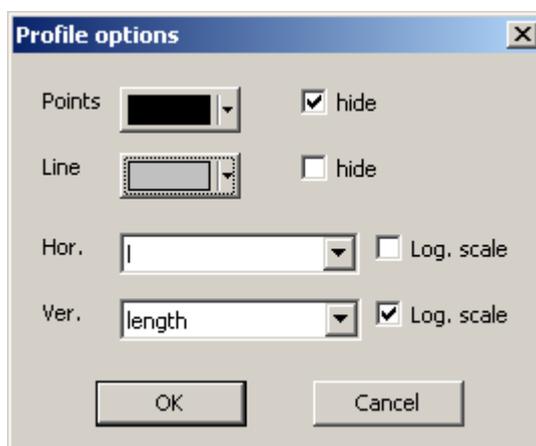
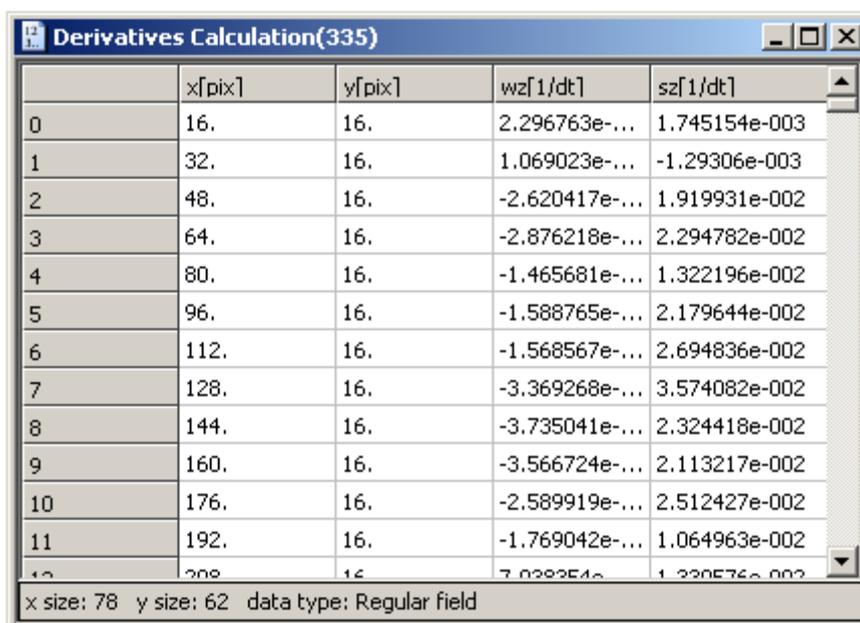


Рис. 2-97 Параметры отображения профилей

2.7.4. Таблицы данных

Хранящиеся в базе данные можно просматривать в виде таблицы. При этом каждый столбец таблицы отвечает одному полю из файла данных. Левый столбец нумерует строки таблицы, начиная с нуля. Для регулярных данных, таких как поля и профили, каждая строка таблицы соответствует одному вектору поля скорости, или одной точке профиля (см. Рис. 2-98). Для данных с более сложной структурой, например для Stereo-PIV калибровок, в таблице отображаются все поля в том порядке, в котором они перечислены в метаинформации узла базы (см. Рис. 2-99), столбцы могут иметь разную высоту.



	x[pix]	y[pix]	wz[1/dt]	sz[1/dt]
0	16.	16.	2.296763e-...	1.745154e-003
1	32.	16.	1.069023e-...	-1.29306e-003
2	48.	16.	-2.620417e-...	1.919931e-002
3	64.	16.	-2.876218e-...	2.294782e-002
4	80.	16.	-1.465681e-...	1.322196e-002
5	96.	16.	-1.588765e-...	2.179644e-002
6	112.	16.	-1.568567e-...	2.694836e-002
7	128.	16.	-3.369268e-...	3.574082e-002
8	144.	16.	-3.735041e-...	2.324418e-002
9	160.	16.	-3.566724e-...	2.113217e-002
10	176.	16.	-2.589919e-...	2.512427e-002
11	192.	16.	-1.769042e-...	1.064963e-002

x size: 78 y size: 62 data type: Regular field

Рис. 2-98 Двумерное регулярное поле

	y[pix]	MX[mm]	MY[mm]	MZ[mm]
0	50.43611	-9.327006	-5.107448	0.
1	54.66096	-9.214157	7.348575	0.
2	176.108	8.970597	7.703328	0.
3	299.3535	8.860922	-5.748282	0.
4	422.4216			
5	544.3598			
6	667.0137			
7	789.9185			
8	912.0186			
9	58.46582			
10	179.351			

x size: 19 y size: 2 data type: Stereo calibration

Рис. 2-99 Стерекалибровка

Данные выводятся в окно в том виде, в котором они хранятся в базе данных, без преобразования размерностей к метрической системе.

В нижней части окна расположена панель информации, в которую выводится размер по горизонтальной и вертикальной оси (**x size** и **y size**), а также тип (**data type**). Для регулярных полей (**Regular field**) размеры по осям – это количество узлов сетки, для нерегулярных полей (**Irregular field**) и профилей (**Profile**) размер по оси X – это полное число значений.

Для редактирования данных в таблице нужно установить курсор в нужную ячейку и ввести новое значение. Также для начала редактирования значения можно дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по ячейке таблицы. Измененное значение сразу сохраняется в базе данных, но не записывается в файл, изменения можно увидеть, открыв этот же узел данных в другом окне визуализации. Значения производных полей, полученных из других, например, поля **length** для полей скорости, не могут быть изменены. При закрытии таблицы, если значения ячеек были изменены, появляется диалоговое окно, предлагающее сохранить изменения в файл, или отклонить их.

Кроме прямого редактирования значения в ячейке таблицы можно воспользоваться операциями с буфером обмена Windows для текущей ячейки (группы ячеек): копированием (сочетание клавиш **Ctrl+C**) и вырезанием (**Ctrl+X**) значений в буфер, вставкой из буфера (**Ctrl+V**). Скопированные в буфер обмена данные могут быть вставлены, например, в электронную таблицу Microsoft Excel, в текстовый файл и т.д. Команды копирования, вырезания и вставки доступны также через контекстное меню, вызываемое щелчком правой кнопкой мыши.

2.7.5. Текстовые файлы

В программе есть возможность открывать текстовые файлы, на которые ссылается узел изображения. Для расширения функциональности узла изображения он может ссылаться на любые файлы помимо файлов изображений в стандартных форматах. В случае ссылки узла на текстовые файлы программа, по команде **Show Data** или двойному щелчку левой кнопкой мыши, распознает такую ситуацию и открывает каждую ссылку в текстовом редакторе по-умолчанию для Windows (см. пример на Рис. 2-61).

2.7.6. Сохранение параметров визуализации

Для удобства работы с программой реализовано сохранение ряда параметров между запусками программы. К таким параметрам относятся настройки алгоритмов обработки и параметры визуализации. К параметрам визуализации относятся параметры окон и объектов визуализации. Эти параметры сохраняются в текущий профиль визуализации, который сохраняется на диск при завершении работы программы.

Параметры, хранящиеся в профиле, делятся на два вида: сохраняемые автоматически и сохраняемые по запросу пользователя. По запросу пользователя сохраняются параметры отображения объектов визуализации полей, например параметры векторного поля (все параметры, которые настраиваются через соответствующий диалог) и скалярного поля (палитра и коэффициент сглаживания) (см. 2.7.1.1). Параметры остальных объектов визуализации сохраняются при завершении работы этого объекта (при его удалении из списка объектов или закрытии окна визуализации), например гистограммы и профили (сохраняются цвета). Параметры окон визуализации (расположение элементов окон, размерности линеек и тому подобное) сохраняются автоматически при закрытии окна. Все сохраняемые параметры загружаются из текущего профиля настроек при создании соответствующего объекта (окна или объекта визуализации).

Меню **Options** главного окна программы предназначено для работы с профилями настроек и позволяет сбрасывать настройки программы на значения по умолчанию (**Reset to defaults**), сохранять текущий профиль настроек визуализации в файл (**Save to profile**) и загружать профиль настроек визуализации из файла (**Load from profile**). Последние два пункта меню вызывают диалог выбора файла, в который будут сохранены из текущего профиля (из которого будут загружены в текущий профиль) параметры. Этот механизм позволяет, однажды настроив программу в соответствии со своими предпочтениями, использовать одинаковые настройки на любом компьютере, где программа установлена (это не относится к параметрам алгоритмов обработки).

В многопользовательских операционных системах, таких как **MS Windows 2000**, каждый пользователь системы имеет свой профиль настроек.

2.8. Окно свойств

2.8.1. Работа со свойствами одного узла

Свойства экспериментов и данных в программе можно просматривать и устанавливать с помощью специальной панели свойств (см. Рис. 2-100). Панель свойств показывается и скрывается командой из главного меню **View→Properties Window** или комбинацией клавиш **Alt+Enter**. Представлены разные свойства для различных типов узлов см. Рис. 2-100-Рис. 2-104.



Рис. 2-100 .Панель свойств со свойствами базы данных

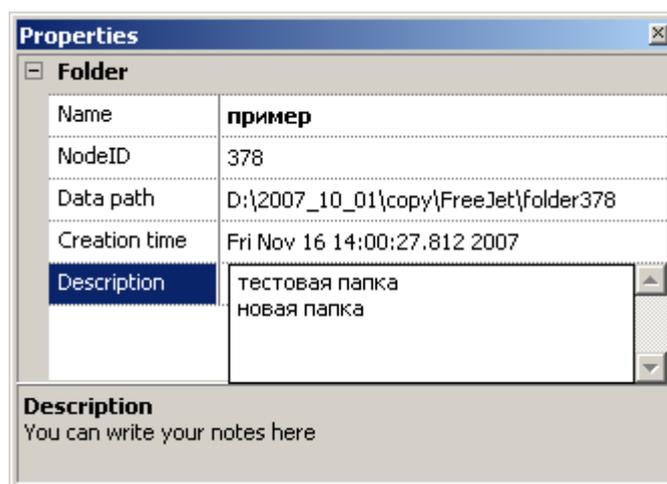


Рис. 2-101 Панель свойств со свойствами папки

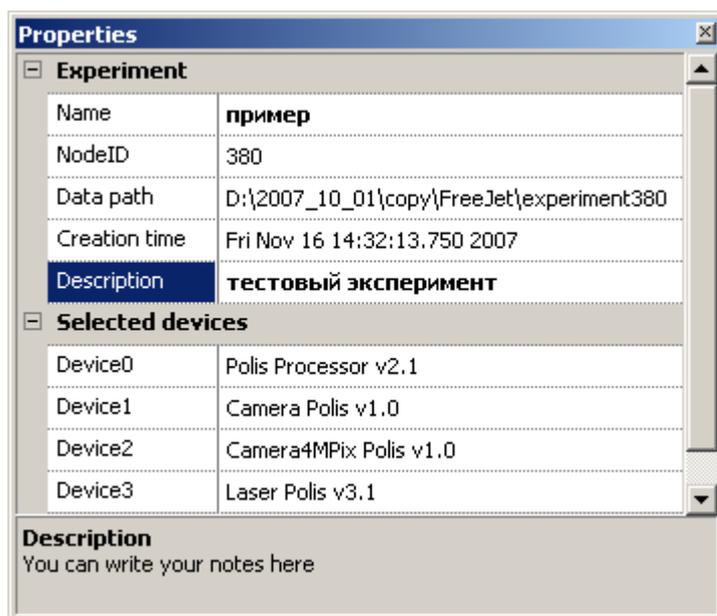


Рис. 2-102 Панель свойств со свойствами эксперимента

Свойства разделяются на не редактируемые и редактируемые. Пример не редактируемого свойства (можно видеть на Рис. 2-101) – **Data path** (путь до данных узла папки). Редактируемые свойства могут быть однострочными и многострочными. Пример редактируемого однострочного свойства показан на Рис. 2-102 – поле **Name**. Многострочные редактируемые свойства в основном используются для описаний узлов (см. Рис. 2-101, поле **Description**). Свойства разделены на группы, которые на панели отображаются строкой, выделенной серым цветом. Содержание или значение любого свойства можно скопировать в буфер обмена по нажатию комбинации клавиш **Ctrl+C** (**Ctrl-Insert**), для этого нужно щелкнуть левой кнопкой мыши на названии свойства в панели и использовать указанную комбинацию клавиш. Реализована возможность вставки текста из буфера во все редактируемые свойства и копирование в буфер только части текста (или значения) свойства для всех редактируемых свойств и для не редактируемых свойств, которыми отображаются пути до файлов и папок.

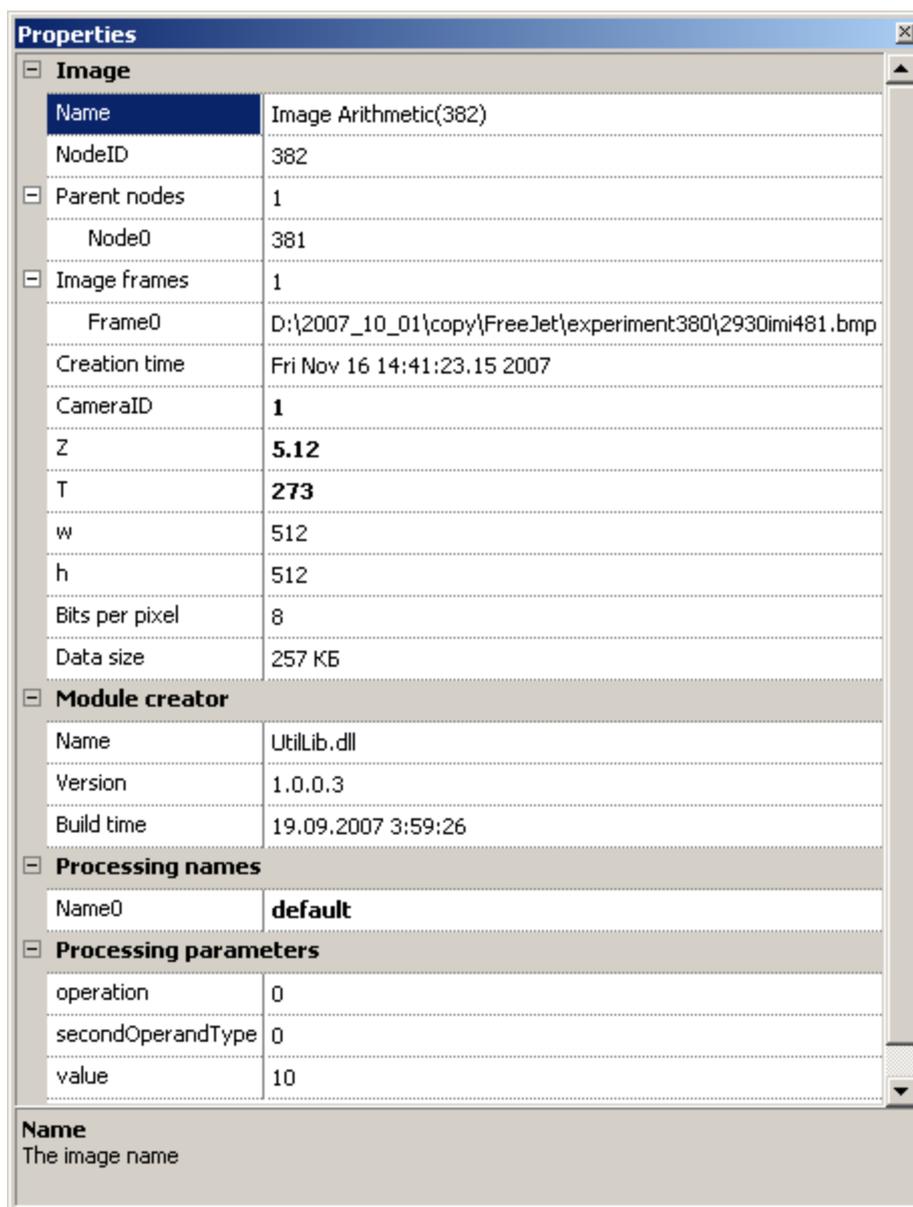


Рис. 2-103 Панель свойств со свойствами изображения

Рассмотрим некоторые специфические свойства узлов. Эксперимент содержит группу свойств **Selected devices**, в которой содержится список устройств, выбранных при создании эксперимента (см. Рис. 2-102). Изображения и данные (Рис. 2-103, Рис. 2-104) содержат вложенное свойство **Parent nodes** со значением количества родительских узлов и списком идентификаторов родительских узлов в базе данных (**Node0** и т.д.). Также для этих узлов устанавливается свойство **CameraID**, содержащее идентификатор камеры, с которой было получено само изображение или изображение-родитель (для результатов обработки). Для изображения может устанавливаться положение **Z** по оси, нормальной к плоскости измерения, и температура **T** в рабочей среде (для PLIF метода измерения). Для узлов данных и изображений выводится информация о библиотеке алгоритмов **Module creator**, которой был получен узел: название модуля, его версия и время сборки. Версия модуля является важным

параметром, т.к. библиотеки алгоритмов находятся в постоянной разработке с целью повышения качества результатов получаемых алгоритмами и результаты расчета могут незначительно отличаться от версии к версии. Поэтому спустя некоторое время после обсчета базы данных эксперимента и обновления расчетных модулей, необходимо знать, какие данные какой версией алгоритма были получены. В панели свойств представлен размер файлов на диске для узлов изображения и данных, на которые они ссылаются. Эта функция бывает полезной для быстрого определения размера файлов для узла изображения.



Рис. 2-104 Панель свойств со свойствами данного

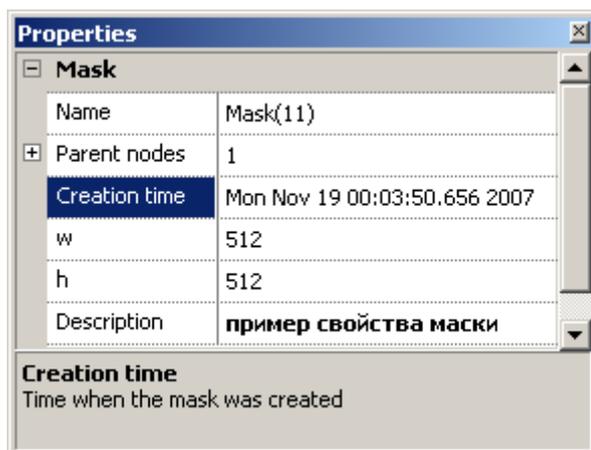


Рис. 2-105 Панель свойств со свойствами маски

Группа свойств **Processing parameters** (параметры алгоритма, с которыми было рассчитано данное) представлена для узлов изображений и данных. По-умолчанию эта группа свернута. Развернув группу, можно посмотреть все параметры обработки узла и скопировать в буфер обмена любой из них, если в этом есть необходимость.

2.8.2. Работа со свойствами группы узлов

Программа предоставляет возможность просмотра и редактирования групповых свойств узлов. Чтобы посмотреть групповые свойства, необходимо выделить группу узлов одним из методов выделения (см. раздел 2.4.3.2.1), при этом на панели свойств автоматически обновится информация. Есть возможность определения суммарного размера файлов с данными на диске компьютера, на которые ссылаются узлы из базы данных (**Data size** на Рис. 2-106). Можно также изменить свойство **CameraID** для выделенной группы данных и установить уникальные имена обработки (**Processing names**). Имена обработки учитываются при составлении выборок данных для, например, обработки (см. раздел 2.4.3.2).

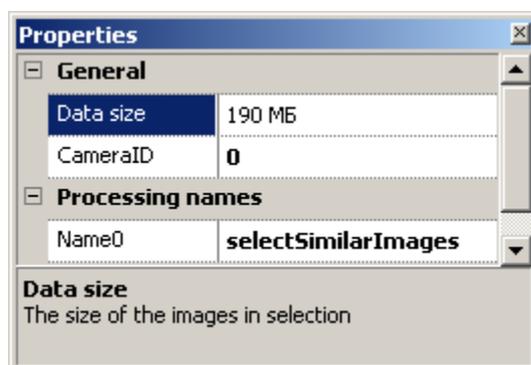


Рис. 2-106 Просмотр групповых свойств

Значения **CameraID** и **Processing names** для групповых свойств указываются только если они одинаковы для всех узлов в выборке. При различии значений в правой колонке значений свойства будет пустое поле.

3. Список литературы

1. *Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н.* (2006) Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow). Вычислительные методы и программирование, том 7, стр. 79-85.
2. *Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.* (2007) Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости. Вычислительные технологии, том 12, №3, стр. 109-131.
3. Д.М. Маркович, М.П. Токарев Алгоритмы реконструкции трехкомпонентного поля скорости в методе Stereo PIV Вычислительные методы и программирование 2008 Т.9. с311-326
4. *Хабахпашева Е.М., Перепелица Б.В.* (1968) Поля скоростей и турбулентных пульсаций при малых добавках к воде высокомолекулярных веществ. ИФЖ, том 14, стр. 598.
5. *Хабахпашева Е.М., Михайлова Е.С., Перепелица Б.В., Ефименко Г.И.* (1975) Экспериментальное исследование структуры пристенной турбулентности. Труды XVIII сибирского теплофизического семинара, Институт Теплофизики СО РАН, Новосибирск, том 2, стр. 138-161.
6. *Adrian R.J.* (1988) Statistical properties of particle image velocimetry measurements in turbulent flow. In: Laser Anemometry in Fluid Mechanics-III, Instituto Superior Tecnico, Lisbon, pp. 115-119.
7. Chen J, Katz J (2005) Elimination of peak-locking error in PIV analysis using the correlation mapping method. Meas Sci Technol 16:1605-18
8. *Foucaut J.M., Carlier J., Stanislas M.* (2004) PIV optimization for study of turbulent flow using spectral analysis. Meas. Sci. Technol., Vol. 15, pp. 1046-1058.
9. *Foucaut J.M., Stanislas M.* (2002) Some considerations on the accuracy and frequency response of some derivative filters applied to particle image velocimetry vector fields. Meas. Sci. Technol., Vol. 13, pp. 1058-1071.
10. *Hamming R.W.* (1989) Digital filters. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
11. *Hart D.P.* (2000) PIV error correction. Exp. Fluids. Vol. 29, pp.13-22.

12. *Heikkilä J.* (2000) Geometric camera calibration using circular control points. *IEEE trans. on pattern anal. and machine int.*, Vol. 22, pp. 1066-1076
13. *Heinz O., Ilyushin B., Markovich D.* (2004) Application of a PDF based method for the experimental statistical processing of experimental data. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 864-874.
14. *Huang H.T., Feilder H.F., Wang J.J.* (1993) Limitation and improvement of PIV, part II. Particle image distortion, a novel technique. *Exp. Fluids*, Vol. 15, pp. 263-273.
15. *van de Hulst H.C.* (1981) *Light Scattering by Small Particles*, Dover publications.
16. *Keane R.D., Adrian R.J.* (1990) Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double pulsed systems. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 1, pp. 1202-1215.
17. *Keane R.D., Adrian R.J.* (1990) Optimization of particle image velocimeters. Part II: Multiple pulsed systems. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 2, pp. 963-974.
18. *Keane R.D., Adrian R.J.* (1992) Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Appl. Sci. Res.*, Vol. 49, pp. 191-215.
19. *Keane R.D., Adrian R.J., Zhang Y.* (1995) Super-resolution particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 6, pp. 754-768.
20. *Lawson N., Wu J.* (1997) Three-dimensional particle image velocimetry: error analysis of stereoscopic techniques. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 894-900.
21. *Lawson N., Wu J.* (1997) Three-dimensional particle image velocimetry: experimental error analysis of stereoscopic techniques. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 1455-1464.
22. *Lecordier B., Trinit'e M.* (2006) Accuracy assessment of image interpolation schemes for PIV from real images of particle. In: 13th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics
23. *Pratt W.K.* (1978) *Digital Image Processing*. New York: Wiley, p. 736.
24. *Raffel M., Willert C., Kompenhans J.* (1998) *Particle image Velocimetry. A practical guide*, Springer: Berlin.
25. *Scarano F., Riethmuller M.L.* (1999) Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete offset. *Exp. Fluids*, Vol. 26, pp. 513-523.
26. *Scarano F., Riethmuller M.L.* (2000) Advances in iterative multigrid PIV image processing. *Exp. Fluids*, Vol. 29, S51-S60.

27. *Scarano F.* (2002) Iterative image deformation methods in PIV. Review article. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, R1-R19.
28. *Stanislas M., Okamoto K., Kahler C.* (2003) Main results of the First International PIV Challenge. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 14, R63-R89
29. *Stanislas M., Okamoto K., Kahler C.J.* (2005) Main results of the Second International PIV Challenge. *Exp Fluids* 39: 170–191
30. *Westerweel J.* (1993) *Digital Particle Image Velocimetry - Theory and Application*. Delft: Delft University Press, 235 p.
31. *Westerweel J.* (1994) Efficient detection of spurious vectors in particle image velocimetry. *Exp. Fluids*, Vol. 16, pp. 236-247.
32. *Westerweel J.* (1997) Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 1379-1392.
33. *Westerweel J., Scarano F.* (2005) Universal outlier detection for PIV data. *Exp. Fluids*, Vol. 39, pp. 1096-1100.
34. *Wieneke B.* (2005) Stereo-PIV using self-calibration on particle images. *Exp. Fluids*. 2005, Vol. 39. pp. 267-280.
35. *Willert C.E., Gharib M.* (1991) Digital particle image Velocimetry. *Exp. Fluids*, Vol. 10, pp. 181-193.
36. *Willert C.* (1996) The fully digital evaluation of photographic PIV recordings. *Appl. Sci. Res.*, Vol. 56, pp. 79-102.
37. *Willert C.* (2006) Assessment of camera models for use in planar velocimetry calibration. *Exp. Fluids*, Vol. 41, pp. 135-143.
38. <http://www.dantecmt.com/>
39. <http://www.vsj.or.jp/piv/>