

### 3. Метод минимизации погрешности калибровки

В исходном методе калибровки Zhang [3] для оценки погрешности используется значение ошибки повторной проекции 3D координат (2.4.20) на изображения. Данный метод вычисления погрешности не является объективным, так как в его оценке используются те же данные, что и для калибровки.

Следующим недостатком такого подхода к оценке погрешности, является то, что в калибровочных данных могут быть некорректные или искаженные данные (Рис. 5), которые препятствуют точному вычислению параметров камер.

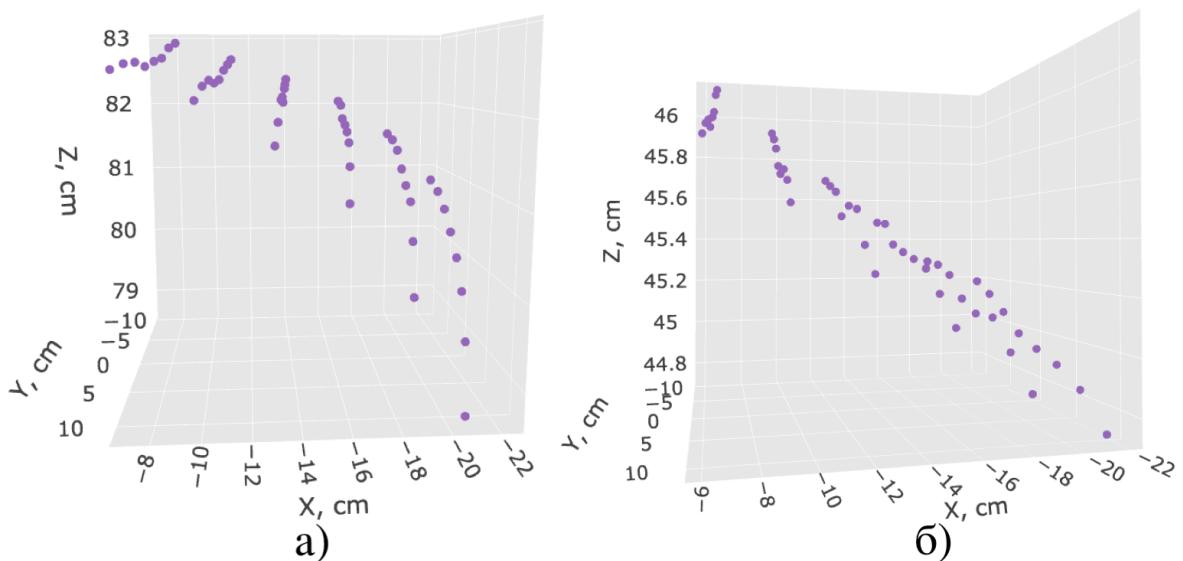


Рис. 5. Пример некорректных данных в процессе калибровки.

Предлагаемый метод использует иной критерий ошибки калибровки: так как заведомо известно, что калибровочный объект представляет собой плоскость в пространстве, можно использовать среднеквадратичное отклонение триангулированных координат (2.6.2) калибровочного объекта от уравнения плоскости, построенной по точкам шаблона:

$$\check{Z}_i = (d - aX_i - bY_i)/c \quad (3.1)$$

$$error = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (Z_i - \check{Z}_i)^2}{n}} \quad (3.2)$$

где  $a, b, c, d$  – коэффициенты уравнения плоскости;  $X_i, Y_i$  – восстановленные координаты шаблона;  $\check{Z}_i$  – 3-я координата, посчитанная исходя из уравнения плоскости;  $n$  – количество точек.

Использование нового критерия позволяет ввести отложенную выборку снимков калибровочного объекта, на которой будет производиться оценка погрешности.

Исходя из этого был разработан автоматический поиск калибровки с наименьшей погрешностью из набора калибровочных снимков. Алгоритм поиска состоит из следующих шагов:

1. Выборка калибровочных снимков делится на калибровочную (количество снимков  $K$ ) и отложенную.
2. Делается начальная калибровка по всем калибровочным снимкам и оценка погрешности на отложенной выборке.
3. Создается  $K$  выборок, размером ( $K - 1$ ), в каждой из которых отсутствует уникальная пара калибровочных снимков.
4. На  $K$  выборках производится калибровка; оценка погрешности производится также на отложенной.
5. Если наименьшая погрешность среди выборок больше изначальной, алгоритм закончен.
6. Иначе, выборка с наименьшей погрешностью становится калибровочной выборкой, а изначальное значение погрешности становится равным погрешности выборки. Алгоритм повторяется с шага 3.

Таким образом, автоматический поиск последовательно исключает из калибровочных данных некорректные или искаженные снимки, уменьшая размер выборки, и достигает локального минимума погрешности.

На Рис. 6 приведено поведение ошибок калибровки, при применении поиска наилучшей калибровки. По оси абсцисс отложено количество калибровочных пар, которое уменьшается по мере того, как автоматический поиск исключает некорректные данные. По оси ординат отложены оценки погреш-

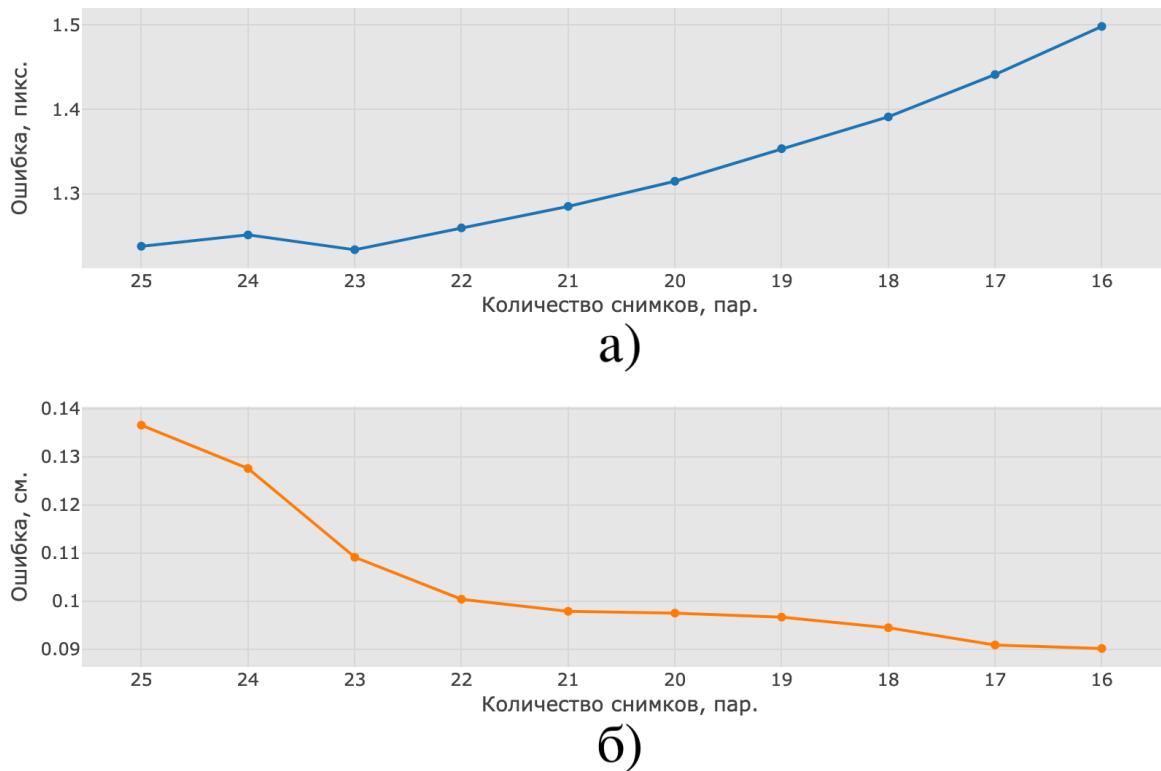


Рис. 6. Поведение погрешности калибровки:  
а) исходный метод; б) предлагаемый метод.

ности для каждого метода. Как видно из рисунка, оценка ошибки повторной проекции 3D координат на изображения начинает возрастать, хотя реальная погрешность становится меньше. Последняя точка на графике по оси абсцисс соответствует локальному минимуму погрешности.

## 5. Результаты

Для проверки модуля было проведено несколько лабораторных измерений. Все измерения проводились с использованием цифровых камер Logitech C270, при разрешении 640x480 пикселов, и светодиодного проектора с разрешением 1280x800 пикселов.

### 5.1 Тестирование калибровок

Для всех конфигураций программного комплекса калибровочным объектом выступала модель шахматной доски, состоящая из квадратных, черно-белых клеток. Были проведены калибровки с различными размерами объекта и клеток.

Первый объект состоял из 6x10 клеток с размерами клетки 15x15 мм. Расстояние между камерами 93.3 см. Было отснято 40 пар калибровочных снимков. Погрешность калибровки до применения метода минимизации составляла 1.7 см., после применения 0.9 см., то есть, погрешность уменьшилась на 47%. Алгоритм исключил из калибровки 17 пар снимков. Высокая погрешность обусловлена тем, что калибровочный объект имеет малые размеры и занимает малую часть калибровочного снимка. Как следствие, алгоритм калибровки не способен определить искажения камер, что в свою очередь скаживается на погрешности и качестве восстановления трехмерной геометрии.

Следующий объект имел 7x13 клеток с размерами клетки 35x35 мм. Расстояние между камерами 17.3 см. Также отснято 40 пар снимков. Погрешность до минимизации 0.21 см., после 0.14 см, уменьшение погрешности составило 33%. 12 пар снимков было исключено алгоритмом минимизации.

Последнее тестирование было проведено на том же калибровочном объекте, но с другим расстоянием между камерами, которое составило 93.3 см. Было отснято 26 пар снимков, из которых алгоритм исключил 11. Погрешность снизилась на 35%, с 0.14 см., до 0.09 см.

Эксперимент, №	Погрешность до, см.	Погрешность после, см.	Улучшение, %
1	1.7 см.	0.9 см.	47%
2	0.21 см.	0.14 см.	33%
3	0.14 см.	0.09 см.	35%

По результатам тестирования было выявлено, что калибровочный объект должен занимать не менее 1/3 снимка. Как видно из таблицы, метод минимизации снижает погрешность калибровки более чем на 30%.

## 5.2 Набор плоскостей

Первыми измеряемыми объектами выступили несколько плоских объектов, Рис. 10. Расстояние между камерами, по результатам калибровки, составляло 93.3 см., что соответствует примерному диапазону измеряемых значений 100 - 500 см. Погрешность на калибровочных данных без применения метода минимизации погрешности 0.14 см., с применением 0.09 см.



Рис. 10. Набор плоскостей.

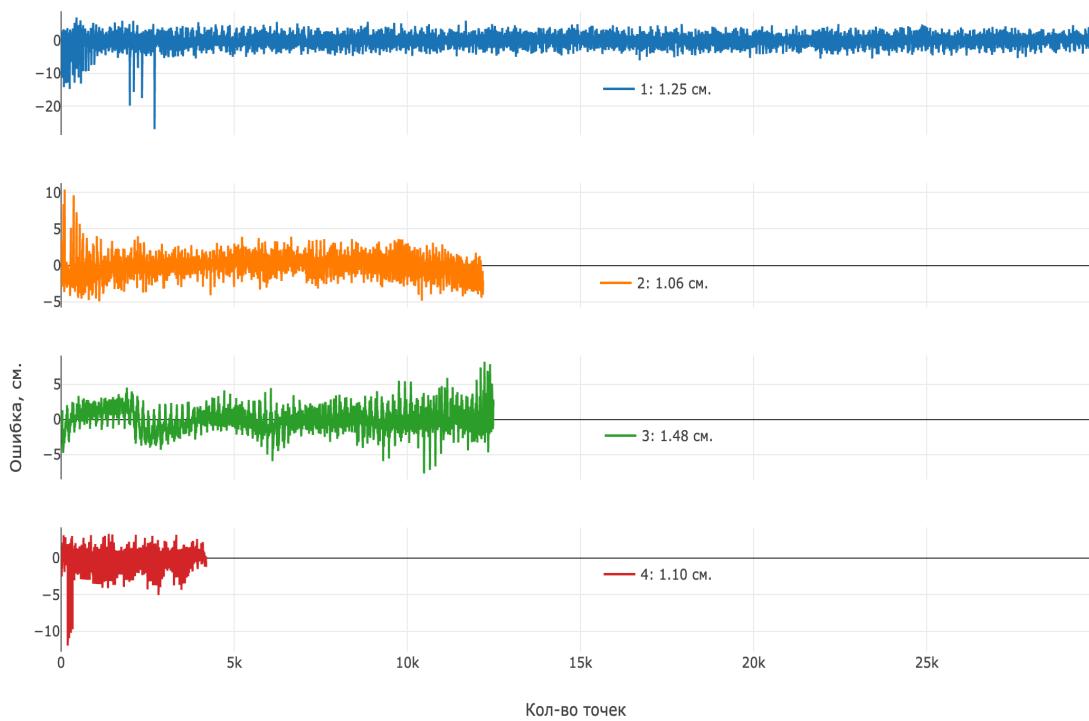


Рис. 12. Погрешность калибровки.

Для оценки погрешности калибровки были выбраны 4 плоскости, Рис. 11. По каждой из плоскостей было построено уравнение плоскости и посчитано среднеквадратичное отклонение от неё. Общее количество точек, участво-

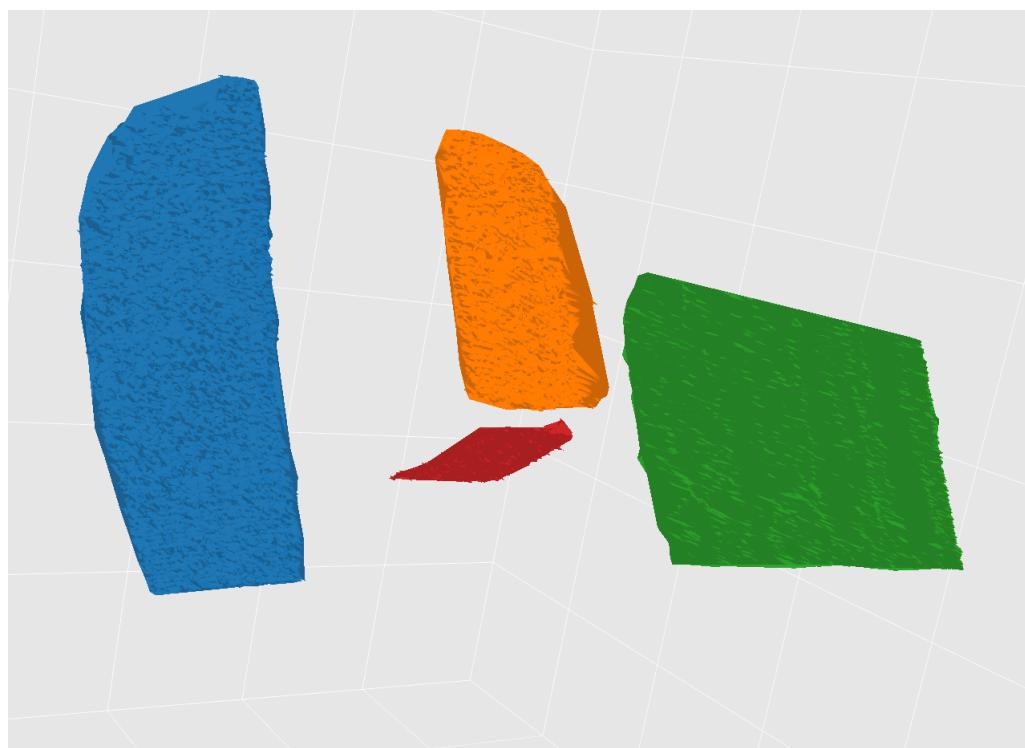


Рис. 11. Пространственная геометрия плоскостей.

вавших в оценке погрешности составило 58 500. Как видно из рисунка Рис. 12, средняя ошибка составила 1.2 см., что составляет менее 1% от диапазона измеряемых значений данной конфигурации программного комплекса.

### 5.3 Модель лопатки гидротурбины

Следующим измеряемым объектом выступила модель лопатки гидротурбины, Рис. 13, с характерными размерами 10x20x5 см. Расстояние между камерами 17.3 см., что соответствует примерному диапазону измеряемых зна-



Рис. 13. Модель лопатки.

чений 20 - 100 см. Погрешность на калибровочных данных без минимизации

составила 0.21 см., с минимизацией 0.14 см. Как видно из рисунка Рис. 14, модуль корректно восстановил пространственную геометрию объекта.

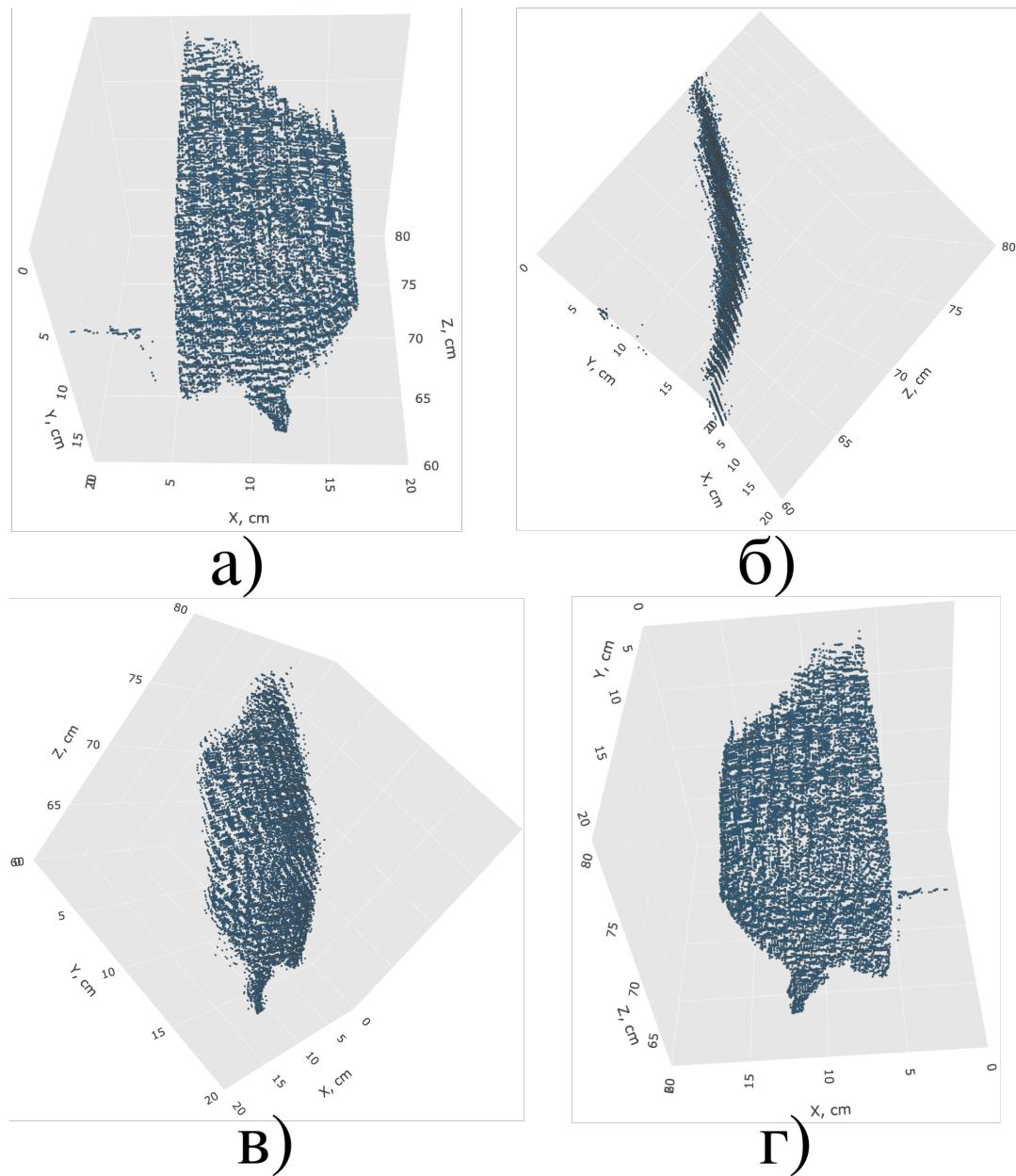


Рис. 14. Пространственная геометрия лопатки.

#### 5.4 Автомобиль

Последним измеряемым объектом стала часть автомобиля ВАЗ-2107 с характерными размерами 414x162x144 см., рисунок Рис. 16. Конфигурации комплекса соответствует конфигурации в главе 5.1. Как видно из рисунка Рис. 15, модуль корректно восстановил пространственную геометрию объекта.



Рис. 16. Автомобиль ВАЗ-2107.

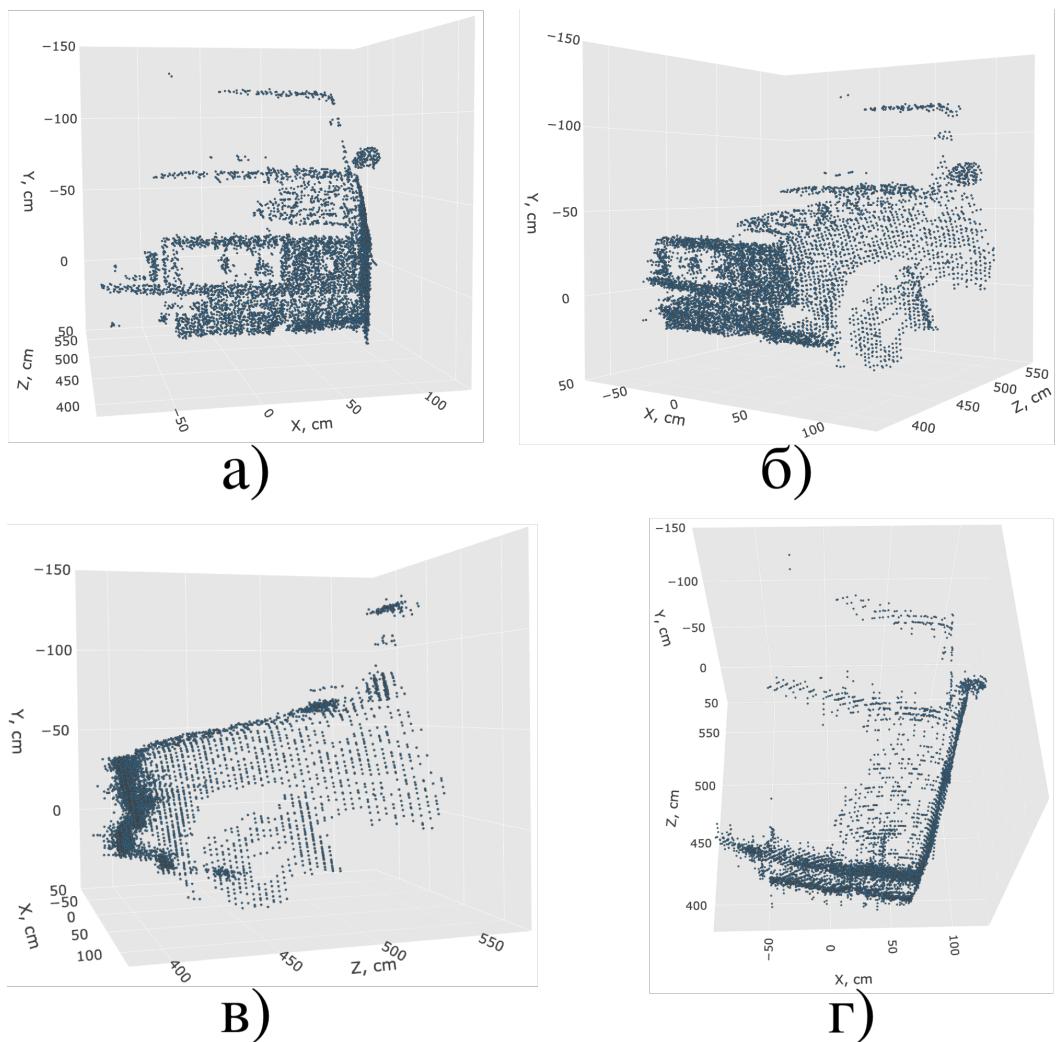


Рис. 15. Пространственная геометрия ВАЗ-2107.