

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СЪЁМКА АВТОМОБИЛЯ ДЛЯ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПОМОЩИ  
ФОТОГРАММЕТРИИ**

**EXPERIMENTAL SHOOTING OF A CAR TO DETERMINE  
DEFORMATIONS USING PHOTOGRAMMETRY**

**УДК 334.54.012+338.121.36**

**Ядров Артем Романович**, Бакалавр кафедры геодезии и дистанционного зондирования аэрокосмических съёмок и фотограмметрии, Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва

**Yadrov A.R.**, artom55555@gmail.com

**Аннотация**

В современном автомобильном производстве и ремонте одним из ключевых аспектов является контроль и оценка деформаций кузова автомобилей. Точные данные о состоянии кузова необходимы для обеспечения безопасности, долговечности и функциональности транспортных средств. Традиционные методы измерения деформаций, такие как механические или оптические системы, часто требуют значительных временных и материальных затрат, а также не всегда обеспечивают необходимую точность и детализацию. В этой связи фотограмметрия, как метод дистанционного измерения и создания точных 3D-моделей объектов, представляет собой перспективное решение данной проблемы.

**Annotation**

In modern automotive manufacturing and repair, one of the key aspects is the control and assessment of deformations of the car body. Accurate data on the

condition of the body is necessary to ensure the safety, durability and functionality of vehicles. Traditional methods of measuring deformations, such as mechanical or optical systems, often require significant time and material costs, and also do not always provide the necessary accuracy and detail. In this regard, photogrammetry, as a method of remote measurement and creation of accurate 3D models of objects, is a promising solution to this problem.

**Ключевые слова:** ГИС – Геоинформационная система, НЛС – Наземное лазерное сканирование, СКО – Средняя квадратическая ошибка, MAX – Maximum (Максимум), MIN – Minimum (Минимум), SGM – Semi-global matching (Метод полуглобального отождествления), SIFT – Scale Invariant Feature Transform (Масштабно-инвариантная трансформация признаков), TLS – Terrestrial Laser Scanning (Наземное лазерное сканирование), TIN – Triangular Irregular Networks (Триангуляционная нерегулярная сеть), 3D – 3 – Dimensional (Трёхмерный)

**Keywords:** GIS – Geoinformation system, GLS – Ground-based laser scanning, ASE - The average square error, MAX – Maximum (Maximum), MIN – Minimum (Minimum), SGM – Semi-global matching (Semi-global identification method), SIFT – Scale Invariant Feature Transform (Scale-invariant transformation of features), TLS – Terrestrial Laser Scanning (Ground-based laser scanning), TIN – Triangular Irregular Networks (Triangulation Irregular Network), 3D – 3 – Dimensional (Three-dimensional)

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СЪЁМКА АВТОМОБИЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПОМОЩИ ФОТОГРАММЕТРИИ**

### **1. Полевой этап**

Особенности наземной фотограмметрической съёмки автомобиля были изложены выше. Исходя из этого, можно легко представить идеальные условия съёмки:

1. Автомобиль должен быть как можно менее блестящим, в идеале матовым, ржавым и грязным.

2. Место съёмки – открытый безлюдный просторный участок или специализированный бокс.

3. Освещение должно быть мягкое и рассеянное, например в пасмурный день.

4. Автомобиль должен стоять устойчиво и неподвижно.

5. Оборудование должно быть со штативом и отвечать всем современным стандартам.

Съёмка авто производилась утром 13 марта 2024 года по заранее рассчитанным маршрутам. Дневные колебания температур были умеренными, ветер был южный и очень слабый. Влажность 63% с относительным атмосферным давлением 757 мм ртутного столба. В целом, погода подходящая для съёмки. Единственную проблему представляла собой переменная облачность. Из-за неё первая половина съёмки проходила при мягком рассеянном свете, а вторая под ярким солнцем (рис. 3.1). Этот факт сказался не лучшим образом на качестве полученных снимков, но ничего критического обнаружено не было, автоматический режим Agisoft Metashape и ручной отбор подходящих кадров отлично справился.



Рис. 3.1 – Съёмочный процесс

Следующей проблемой, с которой нам предстояло столкнуться, это выбор места для съёмки. Когда вы имеете дело с таким габаритным объектом как автомобиль, приходится парковать его в строго отведенных для этого метрах. Лучшее решение было найдено на парковке соседнего двора.

В начале марта снег ещё не растаял и чёрный автомобиль отлично выделялся на заснеженном фоне. Однако в кадр то и дело попадали прохожие, которые зачастую сливались с кузовом авто, некоторых из них приходилось вырезать со снимков вручную. Возможным решением этой проблемы может стать строительная лента или другие обозначающие знаки вокруг объекта работы. Съёмка в безлюдные часы, такие как ранее утро или поздний вечер к хорошим результатам не привела, поскольку требуется дополнительные источники света и найти свободное место в это время в большом городе не представляется возможным.

Ещё одна проблема возникает с отсутствием достаточного места для соблюдения единого расстояния для съёмки объекта из-за естественных и искусственных преград. В связи с этим, иногда приходилось отступать от

намеченных маршрутов и делать дополнительные снимки, что так же не желательно и заняло в последствии больше времени на обработку.

Марки использовали обычные геодезические-светоотражающие, контрастного желтого цвета. Крепление представляло собой двухсторонний скотч, следы от которого легко убрать очистителем стекол. Как альтернатива можно крепить марки на магниты. Приклеивать их следует в метрах с наиболее сложной геометрией, месте контрольных точек и плоских поверхностях.

После проделывания всех этих работ у меня получилось 184 снимка. После быстрого просмотра отснятого материала, было заключено, что несмотря на невозможность в реальном времени выдерживать строгий базис и дистанцию фотографирования, снимки подходят для поставленной задачи.

## **2. Камеральный этап**

Для автоматизации и точной обработки снимков с минимальным вмешательством оператора была выбрана программа Agisoft Metashape. Этот выбор обусловлен её способностью к автоматическому поиску и выравниванию связующих точек на перекрывающихся областях снимков, а также возможностью самокалибровки, основанной на минимальных предположениях о снимке (например, известные только размеры стеклянной пластины, на которую снималось).

Технологическая схема фотограмметрической обработки включает следующие этапы:

- Импорт изображений;
- Измерение связующих точек и выравнивание изображений;
- При наличии опорной информации (например, опорные точки или контрольные отрезки) — измерение и использование этой информации для уточнения геометрических параметров;
- Уравнивание с использованием самокалибровки;

- Оценка точности полученных результатов;
- Формирование плотного облака точек;
- Классификация и фильтрация точек, при необходимости;
- Создание полигональной модели;
- Генерация текстуры для модели;
- Создание текстурированной модели;
- Построение цифровой модели поверхности (ЦМП), который в данной работе не применялся;
- Создание ортофотоплана, также не применялось в данном случае.

Agisoft Metashape Professional позволяет экспортировать полученные результаты в различные внешние программы для дальнейшей обработки.

## **2.1.Импорт изображений**

В процессе съёмки некоторые снимки могут получиться очень плохо. Например, смазанными или геометрически искаженными. В связи с этим, весь снятый материал рекомендуется просмотреть и удалить бракованные снимки. В последствии это повысит качество и скорость получения результата.

Кроме того, программа сама может оценивать качество изображений. Алгоритм основан на сравнении нескольких параметров, таких как чёткость одного снимка в совокупности с четкостью всех изображений в наборе. Значение этого параметра определяется с помощью уравнения четкости на наиболее резком участке фотографии.

Если после применения таких параметров коэффициент качества будет менее 0.5, а оставшиеся снимки полностью покрывают объект съёмки, такую камеру рекомендуется заблокировать, то есть исключить из обработки [4].

## 2.2. Фототриангуляция

Фототриангуляция – процесс определения элементов внешнего ориентирования снимков, координат и высот точек местности в системе координат объекта, путем построения и внешнего ориентирования фотограмметрической модели объекта (местности) по снимкам, принадлежащим одному или нескольким перекрывающимся маршрутам [1].

Ручная фототриангуляция в наземной фотограмметрии предполагает, что оператор вручную определяет точки соответствия на изображениях и измеряет их координаты. Обычно это требует выделения характерных точек на объектах или местности, а затем их сопоставления на различных изображениях для определения ориентации и положения камеры. Этот процесс трудоемкий и требует значительного времени и экспертизы для правильного выполнения.

Автоматическая фототриангуляция в наземной фотограмметрии, напротив, основана на использовании компьютерных алгоритмов для автоматического определения точек соответствия и измерения их координат. Этот метод значительно сокращает время обработки и уменьшает риск человеческих ошибок. Обычно он включает в себя применение современных технологий, таких как методы компьютерного зрения и машинного обучения, для выравнивания и измерения изображений.

Целью фототриангуляции в наземной фотограмметрии является получение точных трехмерных координат контрольных точек на местности. Эти точки затем используются для оценки и обеспечения точности различных геопространственных продуктов, таких как матрицы высот, цифровые модели местности, ортофотопланы и другие. Эти продукты играют важную роль в различных областях, включая градостроительство, инженерное дело, архитектуру и геологию, предоставляя необходимую точность и информацию для различных анализов и принятия решений.

После загрузки нужных снимков в Metashape, необходимо определить ориентацию и положение камеры для каждого кадра и построить разряженное облако точек.

Определение ЭВО и восстановление связи проектирующих лучшей в программе Agisoft Metashape происходит полностью в автоматическом режиме. Однако пользователю предлагается определенная настройка параметров [4]. Эту настройку необходимо производить исходя из характеристик исходных данных. Все фотографии идут по порядку съёмки, поэтому преселекцию выбираем «Порядку кадров». Поверхность автомобиля имеет обилие плоских и гладких элементов, которые легко отражают свет. Освещение так же было непостоянным, потому что съёмка велась на улице. В добавок, объект состоит из сложных геометрических форм. Такие изображения являются наиболее трудно распознающимися для автоматических алгоритмов отождествления. Поэтому для получения наиболее достоверного положения камер и обнаружения максимального количества точек нужно выбрать высокую точность.

После чего, нам удалось получить облако связующих точек, из него мы и получим плотное облако точек.

### **2.3. Построение плотного облака точек**

Программный комплекс Metashape обеспечивает функционал для создания и визуализации плотных облаков точек, которые являются результатом обработки изображений. Путем анализа расположения камер и выполнения вычислений, он формирует карты глубины для каждой камеры, затем объединяет их для создания плотного облака точек. Эти облака точек обычно обладают высокой плотностью, сравнимой с данными, полученными при использовании LIDAR. Кроме того, Metashape предоставляет возможность редактировать и классифицировать точки в облаке, а также использовать их для создания полигональных моделей, карт высот или тайловых моделей. Полученное облако точек может также быть



экспортировано для анализа в других приложениях, расширяя его применение в различных областях, таких как геодезия, архитектура и геология.

Некоторые связующие точки могут вылетать из интересующей нас области. Поэтому, для наиболее быстрой и правильной работы программы рекомендуется задать рабочую область с небольшим запасом в пределах объекта. Построение плотного облака так же происходит в автоматическом режиме, но для пользователя существует настройка некоторых параметров.

Качество будет напрямую влиять на детальность геометрии, более высокие значения параметра. В зависимости от качества, одна и та же модель может получиться существенно разной, если стоит задача увидеть различные деформации необходимо добиться максимальной точности. Обычно для этого необходима достаточно мощная вычислительная техника, но в случае небольшой модели справиться и стационарный ПК, хотя обработка и может занять существенное время. В случае выбора правильного режима построения, обработка снимков происходит с максимальной детализацией. А при снижении качества, каждая фотография уменьшится в 2 раза по каждой стороне. Мы не должны этого допустить.

Но сперва необходимо правильно рассчитать карты глубины для всех изображений. Ведь если на изображении присутствует много шумов, оно неправильно позиционировано или был нарушен фокус, некоторые точки могут вылететь из модели. Чтобы нивелировать это, следует выбрать подходящую фильтрацию в соответствии с требованиями задания.

Для нашей цели следует использовать высокое качество, и мягкая фильтрация, которая лучшим образом передаёт сложные геометрические формы авто (рис. 3.2). Так же, для большей информативности следует рассчитать цвета точек, хоть это и занимает определенное время обработки.



Рис. 3.2 – Плотное облако точек

Обработка построения плотного облака точек заняла:

- 4 минуты 25 секунд;
- было найдено 28.429.498 точек;

Уже по этим, предварительным результатам можно сделать некоторые выводы о будущей модели. Общая геометрия выглядит неплохо, даже сложные элементы отчётливо видны. На плоских деталях крыши и капота заметна более низкая плотность связующих точек, такое положение дел было ожидаемо и считается приемлемым.

#### **2.4. Построение 3D модели**

Далее, после формирования плотного облака точек, происходит создание триангуляционной модели. В этом процессе ближайшие точки облака соединяются линиями, образуя треугольники по принципу, определяемому алгоритмом триангуляции Делоне [4]. Эта модель служит важным инструментом в визуализации трехмерных объектов и анализе их структуры.

Обработка построения модели заняла:

- 6 минуты 44 секунд;
- было построено 2.693.065 полигонов;
- было рассчитано 1.348.291 вершин;

На этом этапе важно проконтролировать геометрию трехмерной модели и, при необходимости исправить ее. Была получена поверхностная полигональная трехмерная модель объекта, серьезных артефактов обнаружено не было.

## **2.5. Построение текстурированной 3D модели**

В завершении этапа обработки построим текстурированную (тайловую) 3D модель.

На следующем этапе используем построенную высокополигональную модель (рис. 3.3), которая была создана на предыдущем этапе. Эта модель сохраняет все детали на тайловой модели, предоставляя высокую степень детализации. Важно, чтобы полигональная модель была создана с высокой степенью детализации, чтобы гарантировать сохранение всех деталей на тайловой модели.

Затем нам необходимо присвоить пикселям определенный размер в метрах, это можно узнать в характеристиках фотокамеры. Следующим этапом будет задать размер тайла в пикселях. Чем больше блок, тем медленнее модель будет визуализироваться.

Что бы обеспечить максимальную детализацию текстуры, следует выбрать самое высокое качество полигонов. Построение текстурированной модели у нас заняла: - 14 минут 26 секунд.



Рис. 3.3 – Текстурированные 3D модели

## 2.6. Ориентирование модели

Чтоб модель была пригодна и удобна для измерений, её необходимо отмасштабировать и ориентировать (рис. 3.4).

Для этого необходимо поставить дополнительные опорные для задания плоскости. Желательно, чтобы они были распределены по всему дну модели. Или находились на специальном приборе. Однако, у нас была цель определить деформацию кузова авто максимально простым методом. В связи с чем мы не могли с самого начала утверждать, что дно автомобиля ровное. Именно поэтому было принято решение ориентировать и масштабировать её относительно запасного колеса. Расстояние, между болтами которого известны из открытых источников и другого быть не может. Так же для более точного задания масштаба следует применить масштабные линейки.

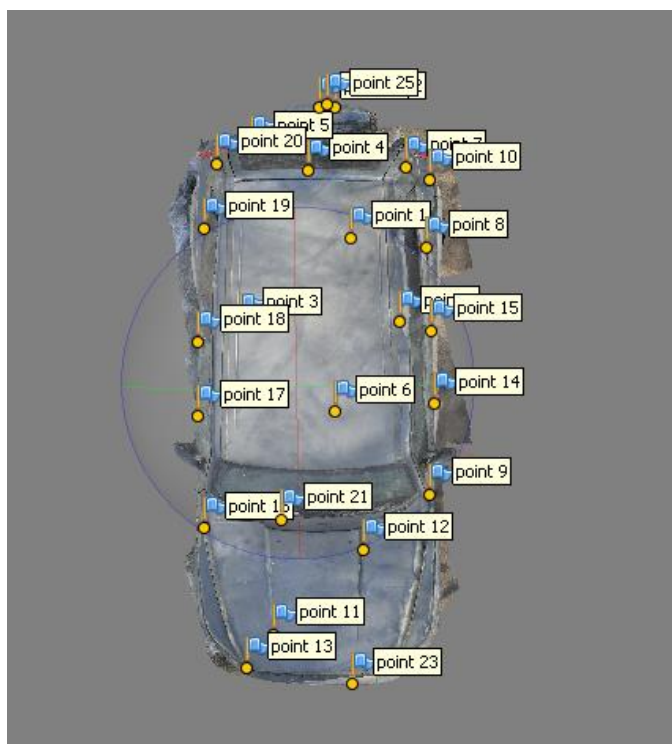


Рис. 3.4 – Модель вид сверху со всеми контрольными точками

### 3 Оценка качества полученной 3D-модели

#### 3.1. Оценка плотности модели (цифровой поверхностной плотности)

Плотность трехмерной модели ( $\rho$ ) определяет ее детализацию и способность отображать минимальные детали объекта. Оценка плотности трехмерной модели осуществляется путем определения количества точек, описывающих объект в пространстве. При этом необходимо учитывать габаритные размеры объекта, что требует масштабирования модели. Если модель обладает равномерной плотностью по всей поверхности, то для оценки плотности необходимо определить количество точек на единицу площади ( $\text{мм}^{-2}$ ):

$$\rho = \frac{k}{s} [\text{мм}^{-2}] \quad (3.1)$$

где  $\rho$  - плотность модели,

$K$  - количество точек модели,

$S$  - площадь поверхности модели

После этого определяем площадь одной точки на поверхности модели:

$$S_{point} = \frac{1}{\rho} [\text{мм}^{-2}] \quad (3.2)$$

Плотность модели автомобиля должна быть достаточной для того, чтобы обеспечить адекватное отображение всех необходимых деталей и особенностей формы автомобиля. В нашем случае плотность модели составила  $0,064 \text{мм}^{-2}$ , а площадь одной точки  $16 \text{мм}^2$ , что является приемлемым результатом. Определение оптимальной плотности зависит от конкретных потребностей и целей проекта. Однако обычно для создания реалистичной и детализированной модели автомобиля рекомендуется использовать высокую плотность, чтобы сохранить все мелкие детали, такие как рельефы, борозды и резьбы на кузове. Это позволяет получить более точное представление об объекте и использовать модель для различных целей, включая визуализацию, анализ и инженерные расчеты.

### 3.2. Оценка точности

Данные для сравнения:

- Контрольные промеры
- Заводские чертежи
- Полученная 3D модель



Вот мы и подобрались к самой главной части данной работы, к непосредственной оценке точности. Оценить, насколько полученный результат близок к истине можно несколькими способами:

- средняя квадратическая ошибка измерений (формула Гаусса – если количество измерений больше 25, формула Бесселя

- если количество измерений меньше 25);

- относительная ошибка измерений;

- предельная ошибка измерений. Так как было выполнено измерение всего 10 контрольных отрезков в каждом из залов, следовательно, для определения СКО будет использована формула Бесселя:

$$m = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}} \quad (3.1)$$

где:  $m$  - средняя квадратическая ошибка измерений;

$v$  - отклонение измерений контрольных линий на модели от измерений на местности;

$n$  - количество измерений.

В качестве контрольных отрезков выступает линия между контрольными точками на кузове авто. Точное расстояние этих отрезков представлено на чертежах, а в случае необходимости, посчитать дополнительные построения можно в ручном режиме (рис 3.6).





Рис. 3.6 – Пример промеров на модели

После этого, в Microsoft Excel выполнялся расчет ошибок измерений контрольных отрезков. Расчеты приведены в Таблице 2.

Таблица 1

Расчет ошибок измерений контрольных отрезков

№	Промер	А	В	С	v (мм)	v	v	v <sup>2</sup> (мм <sup>2</sup> )
		На местности (мм)	На чертеже (мм)	На модели (мм)		(мм)	(мм)	
		капот			А-В	А-С	В-С	В-С
1	1L-1R	828	804	833	-5	24	-29	841
2	2L-2R	1181	1158	1149	32	23	9	81
3	5L-5R	1553	1526	1515	38	27	11	121
4	2L-5R	872	831,5	824	48	40,5	7,5	56,25

5	5L-2R	876	831,5	828	48	44,5	3,5	12,25
	крыша							
6	7L-7R	1172	1154	1163	9	18	-9	81
7	9L-9R	1575	1530	1542	33	45	-12	144
8	12L- 12R	1034	1018	1029	5	16	-11	121
9	7L-12R	1986	1919	1931	55	67	-12	144
10	12L-7R	1974	1919	1926	48	55	-7	49
							сумма	1651

	(мм)
СКО	14
MAX	841
MIN	12,25

Из результатов измерений можно заключить, что точность измерения геометрии автомобиля фотограмметрическими методами больше, чем с помощью рулетки на местности. Это связано в первую очередь с тем, что кузов современных автомобилей имеет множество выпуклых элементов, которые просто невозможно точно измерить линейкой. Кроме того, к некоторым контрольным точкам вообще невозможно подобраться без специального инструмента. опираясь на ГОСТ [5], можно сказать, что съемка

с iPhone соответствует чертежам планам, разрезов, фасадов масштаба 1:100, но это довольно низкая точность для оценочных работ. На Стاپеле достигается точность в пределах 3 мм.

### Литература

1. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г. Фотограмметрия: Учебник для вузов // Под общ. ред. А.Г. Чибуничева. –М.: Изд-во МИИГАиК, 2016. – 295 с.: ил.
2. Руководство по применению фотограмметрических методов для составления обмерных чертежей инженерных сооружений. —М.: 1984
3. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. М., 2002,10
4. Руководство пользователя Agisoft Metashape: Professional Edition, версия 1.5 дата публикации 2019
5. Проведение обмерных и инженерно-геодезических работ на объектах культурного Москва Стандартиформ 2016
6. Petruccioli, A., Gherardini, F. & Leali, F. Assessment of close-range photogrammetry for the low cost development of 3D models of car bodywork components. *Int J Interact Des Manuf* 16, 703–713 (2022).
7. Petruccioli, A., Gherardini, F. & Leali, F. Assessment of close-range photogrammetry for the low cost development of 3D models of car bodywork components. *Int J Interact Des Manuf* 16, 703–713 (2022).
8. Guidi, G., Remondino, F.: 3D Modelling from real data. In: Modeling and Simulation in Engineering, edited by A. Catalin, 69–102. London: IntechOpen: (2012) doi: <https://doi.org/10.5772/30323>
9. Guidi, G., Remondino, F.: 3D Modelling from real data. In: Modeling and Simulation in Engineering, edited by A. Catalin, 69–102. London: IntechOpen: (2012) doi: <https://doi.org/10.5772/30323>
10. Никитин, В. Н. Использование дополнительных геометрических условий при решении геодезических и фотограмметрических задач [Текст] /

В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 4 (20). – С. 41–45.

11. Хабарова Ирина Андреевна, Валиев Джаваншир Сарыевич, Чугунов Владимир Алексеевич, Хабаров Денис Андреевич Современная цифровая фотограмметрия // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. №4-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennaya-tsifrovaya-fotogrammetriya> (дата обращения: 01.06.2024).

12. Рожкова Катерина Игоревна, Сурсанов Дмитрий Николаевич Классические и современные методы измерения деформаций основания // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2011. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassicheskie-i-sovremennye-metody-izmereniya-deformatsiy-osnovaniya> (дата обращения: 03.06.2024).

13. Гермак Оксана Викторовна, Калачева Наталья Александровна, Гугуева Оксана Александровна Возможности неметрических цифровых камер в наземной фотограмметрии // ИВД. 2013. №4 (27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-nemetricheskih-tsifrovyyh-kamer-v-nazemnoy-fotogrammetrii> (дата обращения: 03.06.2024).

14. Джарроуш Джад Цифровая камера как практический геодезический инструмент: проблемы и решения // ООО «ИндорСофт». 2014. №1 (2). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-kamera-kak-prakticheskiy-geodezicheskiy-instrument-problemy-i-resheniya> (дата обращения: 03.06.2024).

15. Балакина Е.В., Зотов Н.М., Доютов В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ШИНЫ МЕТОДОМ ФОТОГРАММЕТРИИ // Вестник магистратуры. 2015. №4-1 (43).