

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

На правах рукописи

РАСКАТКИНА Ольга Валерьевна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТРУДНОДОСТУПНЫХ СООРУЖЕНИЙ  
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

05.01.01 – Инженерная геометрия и компьютерная графика

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Доктор технических наук, профессор Е.В. Попов

Нижний Новгород – 2021

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. ПАРАМЕТРЫ ПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМЫ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	10
1.1. Классификация методов определения крена .....	13
1.1.1. Многосторонние методы .....	14
1.1.2. Односторонние методы .....	17
1.1.3. Перспективные методы .....	20
1.2. Выводы по 1 главе .....	21
Глава 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГППФ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ .....	23
2.1. Основные положения варианта фотограмметрического метода для определения ГППФ сооружений .....	23
2.1.1. Калибровка фотокамеры по вертикальному базису с целью измерения расстояния .....	27
2.1.2. Калибровка фотокамеры одновременно по горизонтальному и вертикальному базису с целью измерения расстояния .....	35
2.1.3. Контроль сооружений по высоте и прямолинейности с помощью фотограмметрического метода .....	40
2.1.4. Измерение расстояний и прямолинейности протяженных объектов фотограмметрическим методом .....	51
2.2. Методы определения ширины колеи подкрановых путей .....	58
2.2.1. Методы непосредственного определения ширины колеи .	59
2.2.2. Косвенные методы определения ширины колеи .....	60
2.2.3. Одновременное определение всех показателей подкрановых рельсов и траектории движения мостового крана фотограмметрическим методом .....	65
2.3. Выводы по 2 главе .....	73
Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГППФ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОДНОСТОРОННИМИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ .....	74
3.1. Определения крена сооружений башенного типа односторонним вариантом фотограмметрического метода .....	75
3.2. Мониторинг крена высотных сооружений фотограмметрическим методом с отвесом .....	82
3.3. Точность фотограмметрического метода для измерения вертикальности высотных сооружений .....	90
3.4. Двухэтапный вариант метода определения крена высотных- сооружений .....	101

3.5. Вариант фотограмметрического метода с продолженным отвесом .....	107
3.6. Применение фотограмметрического метода для одновременного определения крена куста дымовых труб .....	112
3.7. Выводы по 3 главе .....	114
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	 116
 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	 118
 ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	 134
 ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	 135

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** Крупногабаритные сооружения, включая высотные, являются одними из самых распространенных на всех территориях проживания человечества и во всех сферах его деятельности. Номенклатура подобных сооружений довольно широка — это: дымовые трубы, градирни, ректификационные колонны, водонапорные, силосные и другие башни, опоры радиотелевизионных антенн, рельсы подкрановых путей и многое другое. В силу непрерывного воздействия на них техногенных и природных факторов такие конструкции зачастую подвержены существенным изменениям геометрических параметров как в процессе строительства, так и эксплуатации. К тому же, в подавляющем большинстве случаев эти крупногабаритные конструкции расположены в зонах плотной или массовой застройки, что чаще всего делает их труднодоступными. Это не только существенно усложняет, но и чаще всего исключает использование контактных методов измерения геометрии этих объектов. Поэтому чрезвычайно актуальным является развитие бесконтактных методов измерений пространственного положения и формы этих конструкции в течение всего жизненного цикла конструкции, в том числе, включая ее строительство и эксплуатацию.

В свете современного представления о геометрической параметризации природных и рукотворных объектов под параметрами понимается набор свойств объекта, позволяющих однозначно отличить исследуемый объект от множества ему подобных. Параметры подразделяются на параметры положения, формы и величины. В качестве параметров положения высотных конструкций обычно выступает абсолютная величина их крена и его направления, закручивание конструкции и т. д. Причем, общая и потенциально опасная деформация высотных конструкций обычно характеризуется именно этими параметрами, деградация которых в большинстве случаев является следствием неравномерной осадки фундамента в результате нестабильной

гидрогеологии несущих грунтов, землетрясений тектонического или техногенного характера, ошибок в проектировании конструкции или геологических изысканиях и других факторов.

Существующие в настоящее время многочисленные методы определения крена высотных конструкций практически все довольно трудоемки и часто требуют серьезных мер безопасности при своей реализации. Все это приводит к необходимости разработки новых более надежных и эффективных средств и методов измерения геометрии высотных труднодоступных конструкций. В особенности эти средства необходимы при проведении работ в рамках предприятий среднего и малого бизнеса в силу ограниченности средств и возможностей данного типа предприятий. Развитие современных технологий и появление более совершенных, доступных и простых в использовании средств дистанционной фиксации геометрических параметров положения и формы (ГППФ) высотных конструкций позволяет реализовать «бесконтактные» методы, их еще называют «дистанционными», «косвенными» или «удаленными». Другим примером является определение ГППФ длинномерных труднодоступных конструкций типа подкрановых путей мостовых кранов. На практике наиболее часто необходимы измерения их планово-высотного положения и ширины колеи. Замеры ГППФ такого типа конструкций контактными методами обычно связаны с прямым выходом персонала на опасную зону конструкции на большой высоте. В этом случае также предпочтительно использование дистанционных методов. Использование любительских цифровых неметрических фотокамер в сочетании с методами компьютерной обработки цифровых изображений позволяет резко снизить трудоемкость определения ГППФ строительных конструкций, а также повысить их безопасность, точность и надежность. При этом не требуется использование дорогостоящего нестандартного оборудования и высококвалифицированного персонала без потери качества и достоверности результатов измерений исследуемых конструкций.

**Объектом исследования** – являются ГППФ высотных и протяженных в горизонтальном направлении сооружений.

**Предмет исследования** – методы фотограмметрии для определения ГППФ труднодоступных и крупногабаритных сооружений.

**Целью работы** является разработка простых и надежных вариантов фотограмметрического метода для определения ГППФ высотных объектов и горизонтально протяженных конструкций.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

– в результате анализа и обобщения научного опыта классифицировать методы определения ГППФ высотных и других крупногабаритных сооружений;

- разработать варианты фотограмметрического метода для определения ГППФ высотных и горизонтально протяженных сооружений;

- разработать двухэтапный вариант фотограмметрического метода определения ГППФ высотных сооружений;

- сравнить точность разработанных вариантов фотограмметрического метода с точностью других методов и подтвердить их эффективность.

**Методы исследования.** При решении сформулированных задач использованы методы инженерной геометрии и компьютерной графики, теории погрешностей измерений, теории математической обработки и геометрической интерпретации результатов измерений.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработана классификация существующих методов определения ГППФ высотных и протяженных в горизонтальном направлении и сформулированы перспективные направления развития этих методов.

2. Разработан математический аппарат оценки точности определения крена высотных сооружений фотограмметрическим методом.

3. Разработан вариант фотограмметрического метода для определения ГППФ высотных конструкций и колеи мостовых кранов по фотографиям, полученным цифровой камерой стандартного типа, путем их обработки в

среде стандартных растровых редакторов. Преимуществами разработанной версии являются простота, применимость в полевых условиях и отсутствие необходимости прямого контакта с исследуемым объектом. Кроме того, для применения метода достаточно использования стандартного и недорогого аппаратного и программного обеспечения.

4. Разработан двухэтапный вариант фотограмметрического метода для определения ГППФ высотных конструкций, позволяющий минимизировать трудоемкость измерений от габаритов объекта. В отличие от других методов, данный вариант позволяет определять геометрические параметры конструкций подобного типа в целом по всей высоте с нижней частью конструкции, окруженной постройками.

**Практическая значимость и внедрение.** Основу диссертации составляют результаты работ автора в рамках Договоров № 2019/160 от 15.10.2019 г («Строительно-техническая экспертиза по определению наличия угрозы жизни и здоровью граждан, соответствия градостроительным нормам и правилам») и № 2020/104 от 06.11.2020 г («Заключение о техническом обследовании объекта капитального строительства»), а также темы «Геодинамические исследования геодезическими методами». На диссертационном исследовании также базируется монография автора «Контроль пространственного положения и формы строительных конструкций с помощью неметрических цифровых камер». Результаты, полученные автором, также использованы ООО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ВВГБП» и ООО «ГИП-Проект» в ходе обследования строительных конструкций.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследований представлялись автором на международных и всероссийских научно-технических конференциях: на международных научно-промышленных форумах «Великие реки» (Н.Новгород, 2016, 2017), на международной научно-практической конференции «Научные исследования: от теории к практике» (Чебоксары, 2015, 2016), на международной научно-практической

конференции «Наука и образование: векторы развития» (Чебоксары, 2016), на международной научно-практической конференции «Технические науки: от теории к практике» (Новосибирск, 2016), на международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования: новое слово в науке» (Москва, 2016), на международной научно-практической конференции «Интеграционные процессы в науке в современных условиях» (Прага, 2016), на XIII международной конференции «Динамика Систем, Механизмов и Машин» (Омск, 2019).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Классификация методов определения ГППФ высотных сооружений.
2. Варианты фотограмметрического метода определения ГППФ высотных сооружений и протяженных в горизонтальном направлении труднодоступных объектов типа рельсовых путей мостовых кранов.
3. Двухэтапный вариант фотограмметрического метода определения ГППФ высотных сооружений.
4. Результаты сопоставления геометрических параметров перечисленных типов сооружений, полученных с использованием разработанного метода, с экспериментальными и иными данными.

**Вклад автора.** Автором лично разработана классификация методов определения ГППФ сооружений башенного типа, что зафиксировано в публикации автора «Методические и классификационные аспекты контроля пространственного положения сооружений башенного типа» [86]. Автор лично и непосредственно принимала участие в разработке вариантов фотограмметрического метода, подготовке и проведении работ по определению ГППФ высотных конструкций башенного типа и горизонтально протяженных конструкций типа рельсовых путей мостовых кранов, а также, обработке и интерпретации результатов, что зафиксировано в монографии «Контроль пространственного положения и формы строительных конструкций с помощью неметрических цифровых камер» [97] и остальных публикациях автора.

**Публикации по теме диссертации.** Основные результаты исследований опубликованы в 19 научных работах, в том числе 3 научные работы, опубликованные в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 1 – в журнале, индексируемом в наукометрической базе Scopus.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографического списка литературы, включающего 184 наименования, в том числе 20 иностранных. Общий объём составляет 135 страниц, 76 рисунков, 27 таблиц.

## **Глава 1. ПАРАМЕТРЫ ПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМЫ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

В свете современных научных представлений все природные и рукотворные объекты обладают уникальным набором признаков, которые позволяют однозначно отличать один объект от множества других объектов, в том числе и от ему подобных. Как правило в состав подобных признаков объектов входят их форма, величина и положение в пространстве. В работах [134, 135] предложено формализовать учет перечисленных признаков объектов в пространстве с помощью геометрических параметров.

*Параметрами называются признаки, позволяющие выделить объект из множества объектов их подмножество или единственный объект. Признаками следует считать положение в пространстве, форму, величину.*

Параметры позволяют однозначно отличить единственный объект или подмножество объектов от множества подобных объектов.

*Параметризацией объектов называется процесс выбора и подсчета количества параметров, позволяющих однозначно выделить единственный объект.*

Для однозначного выделения одного объекта от множества ему подобных требуется конечное число параметров, число которых должно быть минимально необходимым и достаточным. Это число условно можно записать в следующей форме  $\Sigma P = \text{ПП} + (\text{ПФ} + \text{ПВ}) - \text{ГУ}$ , где  $\Sigma P$  – необходимое и достаточное число параметров для однозначного определения объекта; ПП – признаки, определяющие положение любого объекта в пространстве относительно выбранной системы координат (СК); ПФ – признаки, позволяющие из множества объектов выделить объекты одной формы; ПВ – признаки, позволяющие из множества объектов одной формы выделить объекты одной величины (например, дымовые трубы одной

высоты);  $ГУ$  – число геометрических условий, определяемых взаимным отношением признаков объекта и уменьшающих число параметров, выделяющих его из множества ему подобных.

Взаимное отношение признаков объектов:

1. Инцидентность
2. Перпендикулярность
3. Параллельность
4. Симметрия
5. Сопряжение (касание)

В течение всего жизненного цикла высотных конструкции, в том числе, включая ее строительство и эксплуатацию, необходимо контролировать геометрические параметры положения и формы (ГППФ) этих конструкции, что является чрезвычайно сложной задачей. Определение ГППФ высотных сооружений производится с использованием различных измерений. Подобные измерения на примере свыше десятка дымовых труб ТЭЦ Нижегородской области описаны в работах [143, 145, 146, 155, 156, 162]. При этом используются как прямые, так и косвенные методы, а величины параметров либо непосредственно замеряются на объекте, если это возможно, либо измеряются дистанционно (бесконтактно) с помощью специальных средств [144].

Одним из наиболее важных вопросов, связанных с определением параметров положения и формы крупногабаритных высотных и протяженных строительных сооружений и конструкций является точность проводимых измерений. Традиционно точность подобных измерений нормируется допусками СНиП. Однако в современной отечественной и зарубежной практике нормирование точности измерений все чаще использует переход от допусков СНиП к среднеквадратичным ошибкам измерений  $m$  (СКО). В большинстве случаев при оценке точности измерений

допуски уточняются с помощью корректирующих коэффициентов  $k$ , которые по результатам различных исследований лежат в пределах 0,2-0,7.

Концепция перехода от нормативных допусков СНиП заключается в том, что каждый конкретный случай измерений должен сопровождаться фиксацией заданной степенью достоверности критической величины определяемого параметра [138, 139, 140]. Иными словами, переход от допусков СНиП  $d$  к среднеквадратичным ошибкам  $m$  измерений базируется на величине нормируемого множителя  $t$ , соответствующего определённой вероятности  $p$

$$m = \frac{kd}{t}. \quad (1)$$

Например, в табл. 1 представлены СКО  $m$  измерения крена металлической дымовой трубы высотой  $H = 50$  м при ряде величин  $t$  для  $d = 400$  мм. Универсальность формулы (1) была доказана в работе [12].

Т а б л и ц а 1

**Соотношение между  $m$  и  $t$  при  $d = 400$  мм и  $k = 0,2; 0,3; 0,4$**

$t$	Вероятность, $p$	СКО $m$ , мм		
		0,2	0,3	0,4
1,6	0,890	50	75	100
2,0	0,955	40	60	80
2,5	0,988	32	48	64
3,0	0,997	27	40	53

Практика строительства и эксплуатации высотных зданий и сооружений показывает, что их общая и потенциально опасная деформация в виде крена, закручивания и т. д. обычно характеризуется их параметрами положения и формы, деградация которых в большинстве случаев является следствием неравномерной осадки фундамента в результате нестабильной гидрогеологии несущих грунтов, землетрясений тектонического или техногенного характера, ошибок в проектировании конструкции или геологических изысканиях и других факторов. От ветровых нагрузок, одностороннего солнечного нагрева сильно зависят величина и направление

крена, часто верхняя часть сооружения подвергается вынужденным колебаниям [23,38, 69, 70, 129, 174, 176, 34]. Например, в работе [42] описаны случаи, когда у башенной конструкции высотой 316м амплитуда колебаний достигала 460 мм, а у дымовой трубы высотой 160м максимальные термические деформации в летний сезон были равны от 30 мм до 75 мм [179]. В [23, 105] описан ряд мер, которые могут снизить влияния ветровой нагрузки и солнечной радиации.

В настоящее время разработано большое количество методов определения крена высотных сооружений. Традиционно измерения крена и других ГППФ высотных сооружений выполняется методами, соответствующими требованиям ряда нормативных и руководящих документов [65, 105, 108, 109, 110, 114].

Анализ научных трудов показал, что существует большое количество методов определения крена высотных сооружений. Причём номенклатура методов постоянно возрастает. Все известные методы определения крена высотных сооружений описаны в работах [8, 13, 19, 24, 26, 43, 47, 105, 143, 156, 162]. Практически все они существенным образом зависят от характера и количества окружающих их разного рода природных объектов и строительных сооружений. В большинстве случаев данное обстоятельство затрудняет, а чаще всего, делает невозможным расположение фиксирующего прибора для производства измерений с нескольких направлений.

### **1.1. Классификация методов определения крена**

В работе [86] описана классификация существующих методов определения крена высотных сооружений, разработанная на основе их анализа. Классификация представлена на рис. 1. В данной классификации кроме существующих методов предполагается существование других, на данный момент еще не разработанных методов

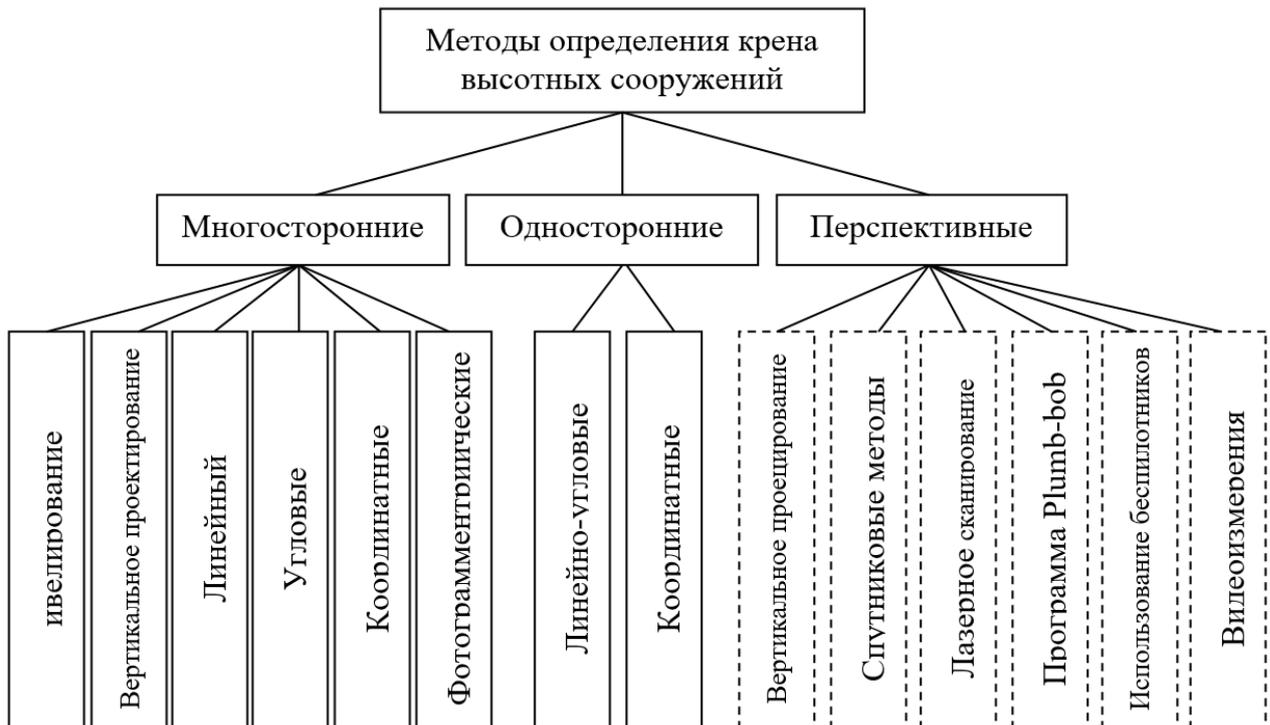


Рис. 1. Классификация методов определения крена высотных сооружений

Как видно из Рис.1, все три основные группы методов обладают своими характерными чертами. Многосторонние методы предполагают производство замеров прибором, устанавливаемом в более, чем одной точке, что позволяет осуществлять замеры ГППФ объекта с разных сторон. При выполнении замеров односторонними методами прибор устанавливается в одной точке. Под перспективными методами понимаются методы, которые пока еще не нашли широкого применения, но уже потенциально применимы, опираясь на новые достижения науки и техники.

### 1.1.1. Многосторонние методы

**Нивелирование.** Метод использует высокоточное геометрическое или гидростатическое нивелирование осадочных марок, заложенных примерно на одном горизонте цокольного сечения башенного сооружения [7, 8, 10, 17, 31, 105, 127, 133].

С помощью этого метода можно измерять только приращение крена между двумя измерениями, однако невозможно определять его абсолютную

величину. Этот метод, в силу его особенностей используется как контрольный, дополняющий другие методы.

**Вертикальное проецирование.** Обычно при использовании этого метода визирным лучом, формируемым любым доступным прибором (например, теодолитом), верхняя точка сооружения проецируется на установленную у его основания горизонтальную рейку [18, 22, 24, 105, 112, 123].

Недостатками этого метода является возможность его использования только в условиях хорошей видимости и хорошего доступа к основанию сооружения. Точность получаемых результатов зависит от отклонения луча теодолита от вертикали. Способы устранения этого недостатка описаны в [43, 156]. В работах [145, 148, 156, 162] детально изложен метод проецирования применительно для башен треугольной формы.

**Линейный метод** предусматривает использование электронного тахеометра безотражательного типа, позволяющего определять горизонтальные проложения  $d$  от точки, где установлен прибор до середины сооружения (например, дымовой трубы) в трех сечениях, внизу сооружения, в середине по высоте, и вверху. Частный и общий крен сооружения определяется путем сравнения суммы  $d$  и радиусов соответствующих сечений.

Большинство описанных в работах [75, 158] косвенных методов определения радиуса [33, 71, 106, 115, 120] позволяют определять радиус только нижнего сечения сооружения. С применением электронного тахеометра безотражательного типа появляется возможность замеров параметров любого сечения по высоте сооружения [149, 168]. Кроме того, это дает возможность одновременно определять крен и радиусы сечений сооружения [156].

**Угловые методы.** Таких методов насчитывается три разновидности: метод горизонтальных углов, метод малых углов и метод направлений. Во всех трех вариантах определяется разность углов между направлениями от

прибора в центры трех сечений по высоте сооружения [8, 24, 28, 37, 41, 102, 111, 125, 131]. Вычисленные разности позволяют получить углы крена сооружения как частные, так и общие. Углы затем пересчитываются в линейные величины.

Угловые методы удобны для систематических измерений крена высотных сооружений. Минусом является необходимость измерений минимум с двух различных точек.

Что касается **метода зенитных расстояний** [24, 27, 105], то он предусматривает размещение четырех марок на верхнем уровне сооружения и четыре кронштейна для установки теодолита на цокольном сечениях. Кроме того, для теодолита необходимо использовать специальные насадки на трубу.

Аналогичные сложности возникают при замене теодолита фотокамерой для фотосъемки марок. На точность обоих вариантов этого метода большое влияние оказывает вертикальная рефракция от конвекционных токов воздуха при нагреве дымовых труб, что вызывает колебания изображений марок.

**Метод координат описан** в работах [3, 8, 10, 11, 22, 42, 48, 51, 56, 58, 105, 117, 164] и заключается в осуществлении прямой угловой засечки, с помощью которой в начальном цикле измерений определяются декартовы координаты центров сечений сооружения вверху и внизу. При необходимости также замеряются центры промежуточных сечений. В последующие циклы проверяются координаты центров только вверху и в промежуточных сечениях сооружения.

Недостатком метода является практическая невозможность совмещения наблюдаемых точек, расположенных одновременно на координатной оси трубы и на диаметре трубы. Этот недостаток устранен в модифицированном варианте метода (см. [147]). Однако, в любом случае радиусы каждого наблюдаемого сечения должны быть известны. Точность определения крена напрямую зависит от точности этих радиусов.

**Фотограмметрические методы** [36, 45, 124, 166, 169, 176, 179] позволяют измерять изменение ГППФ путем фиксации приращения координат характерных точек сооружения по их фотоснимкам через определенные промежутки времени их жизненного цикла. Под фотограмметрией понимается научно-техническая дисциплина, занимающаяся определением формы, размеров, положения и иных характеристик объектов по их фотоизображениям. В настоящее время получили распространение две разновидности фотограмметрических методов – это собственно фотограмметрия и стереофотограмметрия. В первом случае приращения ГППФ фиксируются только в плоскости фотоснимка, во втором случае возможно определение приращения ГППФ в любой плоскости.

Опыт использования фотограмметрических методов показал их высокую чувствительность к уровню квалификации обслуживающего персонала. Кроме того, как правило необходимо использование специального оборудования и программного обеспечения. В мировой практике для обработки фотоизображений наиболее часто используется компьютерный стереокомпаратор KSK-4 или цифровые фотограмметрические системы (ЦФС) типа ERDAS, ENVI, PHOTOMOD.

### **1.1.2. Односторонние методы**

Существенным недостатком многосторонних методов определения крена высоких сооружений является необходимость измерений с более чем одного направления, что в зонах плотной или массовой застройки в большинстве случаев невозможно. В этом отношении существенным преимуществом обладают односторонние методы, позволяющие производить замеры полного крена с одного направления.

**Метод направления с одного пункта** [66, 67, 105, 126]. При использовании этого метода на цоколе иверху сооружения устанавливаются визирные марки в створе направления с точки установки измерительного прибора на центр каждого из соответствующих сечений

сооружения. Фиксируется горизонтальное проложение между точкой установки прибора и центром цокольного сечения, а также превышение верхней марки над нижней. Крен вычисляется по величине горизонтального угла между визирными линиями на цокольную и верхние марки с учетом превышений верхних марок над цокольной. Этот угол позволяет судить о частных кренах по осям заданной системы координат.

В [66, 67, 105, 126] показано заметное влияние на точность этого метода величины проложения оси цокольного сечения от точки установки прибора, что сказывается на точности определения величины превышения верхней марки над цокольной, и в целом на точность определения крена сооружения.

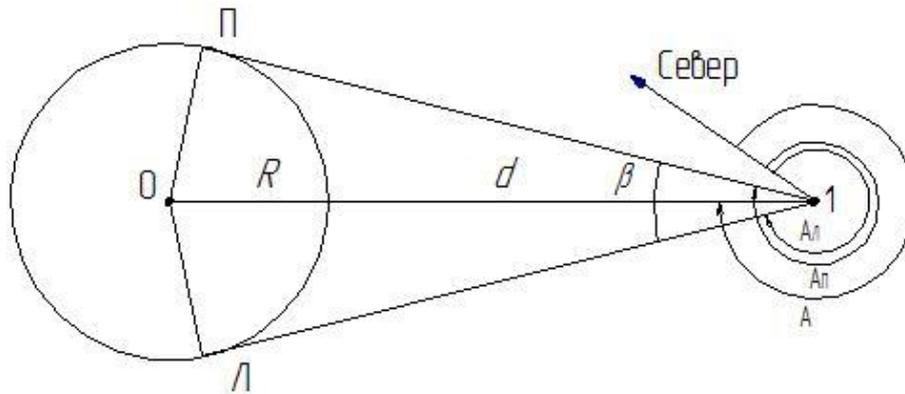


Рис. 2. Схема определения крена трубы линейно-угловым методом

**Односторонний линейно-угловой метод [72, 73].** При реализации данного метода выбирается точка, с которой видна труба по всей высоте, а нижняя ее часть и верхняя доступны для измерений. В эту точку устанавливается лазерный тахеометр (точка 1 на Рис.2). Замеряются угловые координаты направлений до точек касания П и Л на контуре сечения трубы вверху и внизу (см. Рис. 2). При необходимости то же самое делается и в средней части трубы в ряде сечений по ее высоте. В качестве направлений часто используются магнитные азимуты  $A_{Л}$  и  $A_{П}$ . Вычисления производятся по следующим формулам: средний азимут  $A = (A_{П} + A_{Л})/2$ , угол между азимутами  $\beta = A_{П} - A_{Л}$ . Для каждого сечения величина  $d$  измеряется тахеометром, с установленным средним азимутом на его горизонтальном

круге. В работах [117, 72] описана схема вычисления радиусов сечений с помощью величин  $d$  и  $\beta$ . Величины частных и общего крена по направлению 1-0 [73] вычисляются с использованием сумм  $(d + R)$  и  $(d_H + R_H)$ .

**Односторонний координатный метод** может с успехом применяться для определения крена любых высотных сооружений [152, 153, 156]. Существует два варианта данного метода. С помощью первого варианта (см. работу [156]) определяется координата средней точки верхнего сечения относительно системы координат с началом в центре цокольного сечения, а ось абсцисс направлена перпендикулярно вверх. Второй вариант основан на методе трёх точек окружности, схема его применения поясняется Рис. 3. Его особенность заключается в том, что не меняя точки установки электронного тахеометра безотражательного типа определяются декартовы координаты любых, минимум трёх точек 1, 2, 3 нескольких сечений сооружения по его высоте. По этим трем точкам вычисляются центры этих сечений. При этом считается, что сечение сооружения (например трубы) является идеально круглым. Затем по координатам центров ряда сечений вычисляются частные и общий крен сооружения.

В работе [79] показано, что односторонний координатный метод является высокопроизводительным и эффективным благодаря применению для обработки результатов измерений современных математических пакетов программ. Например, использование пакета MatLab [80, 157], позволяет в результате обработки замеров получать исследуемые параметры как в аналитической, так и в графической форме.

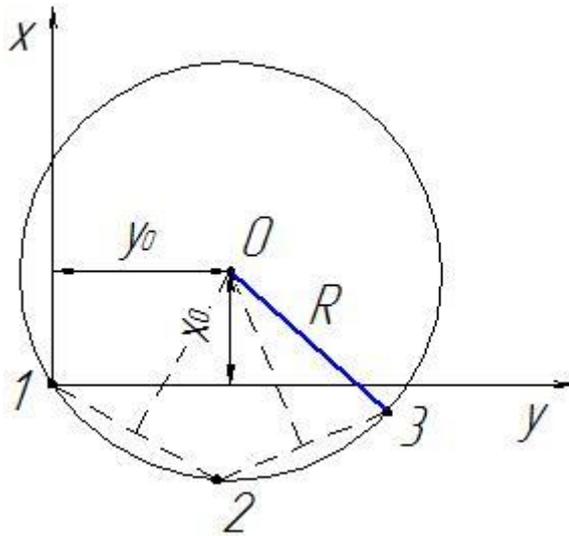


Рис. 3. Схема применения одностороннего координатного метода

### 1.1.3. Перспективные методы

**Вертикальное проецирование с помощью специальных приборов** [2, 148, 159]. В инструментальный набор таких приборов входит формирование отвесных визирных осей (аппараты типа Зенит-ОЦП, ПОВП, ПВП-Т, ПВП-В, PZL), отвесных лазерных лучей (лазерные ОЦП типа ЛЗЦ-1, LL-132, APLO-КРЗ). Подобные спецсредства обладают высокой точностью. У оптических приборов она достигает 1-2 мм на 100 м, а у лазерных приборов в среднем составляет 15 мм на 300 м. Дальность проецирования может достигать более 600 м. Однако при этом точность измерений в большой степени зависит от условий видимости.

**Спутниковые методы** [126] основаны на фиксации GPS-сигналов при строительстве и эксплуатации высотных сооружений.

**Наземное лазерное сканирование** [116, 151] позволяет замерять координаты визуально доступных точек сооружения с высокой степенью точности.

Существующее приложение к смартфонам современная **Программа Plumb-bob** [146] обеспечивает при фотографировании объектов постоянное наличие вертикальной линии (Рис. 4), что существенно упрощает вопрос

формирования на фотоизображениях вертикальной референтной линии, которая служит базой для проведения всех измерений.

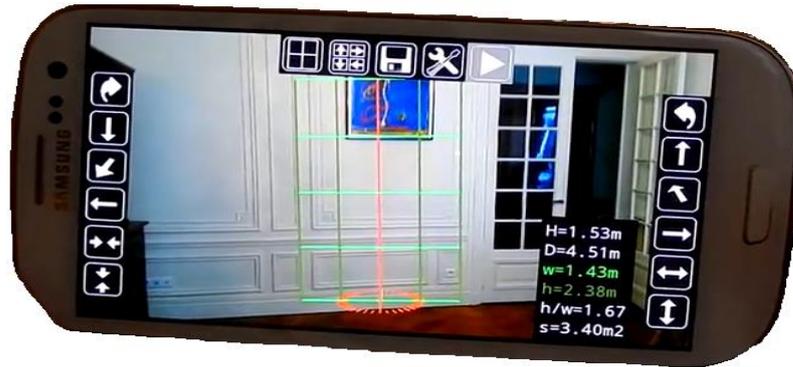


Рис. 4. Смартфон с программой Plumb-bob

**Использование беспилотных летательных аппаратов**, это технология, которая переводит на принципиально новый уровень проведение всех работ, связанных с аэрофотосъемкой, а следовательно дальнейшее совершенствование фотограмметрических методов. Данное направление также представляется перспективным для развития методов измерения ГППФ высотных конструкций.

**Видео измерительные системы** [14, 15] позволяют формировать и обрабатывать видеоизображения исследуемого объекта с помощью компьютерных технологий.

Анализ всех перечисленным методов позволяет сделать вывод о том, что наибольшее предпочтение при проведении измерений геометрических параметров крупногабаритных, труднодоступных объектов типа башенных и других сооружений может быть отдано фотограмметрическим методам, поскольку они обладают несомненными и явными преимуществами перед другими методами. К ним можно отнести относительно низкую стоимость и доступность применяемого оборудования, возможность применения в полевых условиях, относительно невысокие требования к квалификации персонала. Эти преимущества позволяют широко использовать фотограмметрические методы в условиях предприятий малого и среднего

бизнеса, для которых не всегда возможно приобретение дорогостоящего оборудования.

## **1.2. Выводы по 1 главе**

На основе анализа методов определения ГППФ высотных сооружений разработана их классификация.

Установлено, что определение ГППФ высотных сооружений в процессе эксплуатации сопряжено с трудностями, вызванными их доступностью для выполнения измерений. В этих условиях полную информацию о пространственном положении и форме башенных сооружений можно получить путём совершенствования известных и разработки новых методов определения их геометрических параметров.

## **Глава 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГППФ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

В работе [81] в результате анализа существующих методов определения параметров положения и формы строительных конструкций зданий и сооружений показано, что современный тренд развития средств измерения направлен в сторону новых бесконтактных и фотограмметрических методов. При этом технической основой является использование ручных безотражательных дальномеров, электронных тахеометров, цифровых фотокамер в комплексе с современными компьютерными технологиями. Одним из наиболее перспективных методов определения параметров положения и формы крупногабаритных труднодоступных строительных объектов представляется вариант фотограмметрического метода на основе фотоизображений, полученных фотокамерой на штативе с определенной точки стояния.

### **2.1. Основные положения варианта фотограмметрического метода для определения ГППФ сооружений**

Появившиеся в последнее десятилетие ПЗС-матрицы, на основе которых функционируют неметрические цифровые фото и видео камеры, позволяют существенным образом сократить трудоемкость применения фотограмметрических методов [130]. Камеры подобного типа позволяют получать фотоснимки, координированные в растровом пространстве. Это означает, что единицами измерения на подобных фотоснимках в растровых координатах являются пиксели. В этом случае наличие современной компьютерной техники и систем редактирования растровых фотоизображений, полученных фотокамерами данного типа, формируют условия для разработки различных вариантов фотограмметрического метода измерения геометрических параметров протяженных объектов, включая высотные сооружения [150]. Для этого полученное фотокамерой изображение подвергается обработке с использованием стандартных систем

редактирования растровых изображений. Для обеспечения возможности подобной обработки и измерений необходимо наличие на изображении вертикальной референтной линии. Кроме того, необходимо снимок отмасштабировать для перевода результатов в линейные единицы. Для выполнения масштабирования фотокамера подвергается калибровке.

В работе [157] приведено исследование влияния различных вариантов формирования вертикальных референтных линий при замерах крена башни треугольной формы путем сопоставления результатов с полученными методом вертикального проецирования.

Наиболее простым способом формирования референтной линии является расположение шнурового отвеса на фоне фотографируемого объекта. Рис.5 иллюстрирует изображение телебашни с референтной линией как при вертикальном расположении фотокамеры (Рис. 5а), так и при наклонном положении камеры (Рис. 2б).

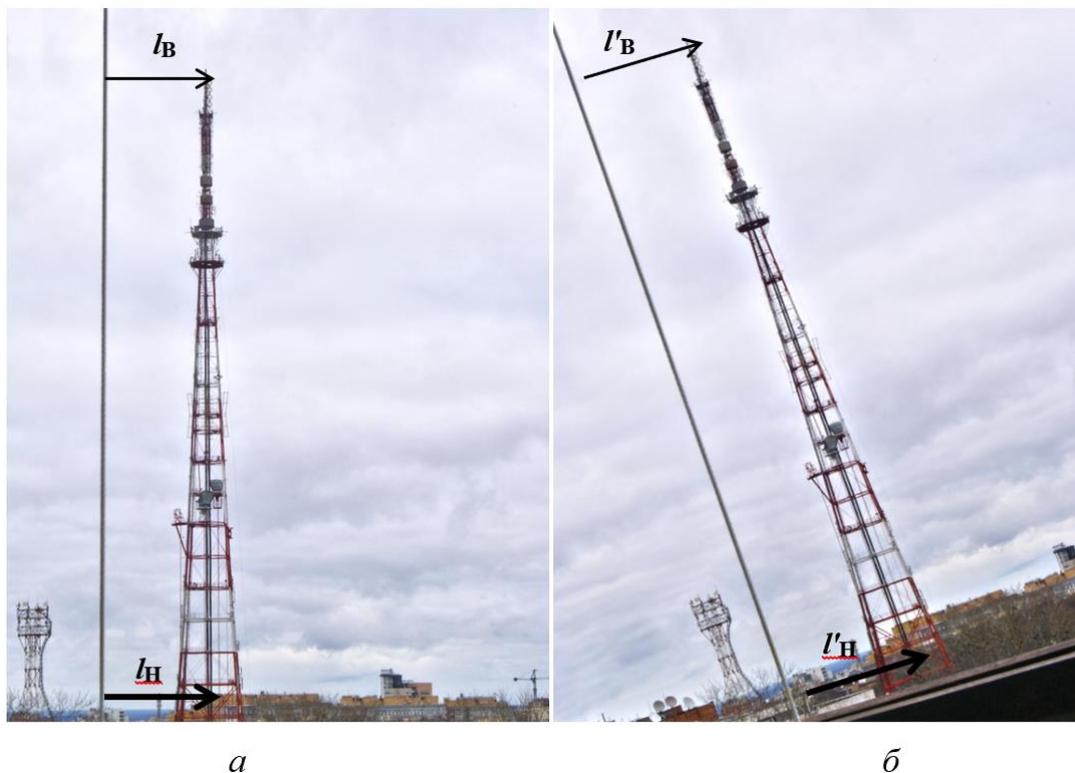


Рис. 5. Фотографии телебашни и шнурового отвеса

Референтная линия может занимать разное положение относительно оси сооружения, например, трубы (Рис.6). В любом случае измеряются растровые расстояния  $l_B$ ,  $l'_B$  и  $l'_H$ ,  $l_H$  от краёв сооружения до референтной линии сверху и внизу соответственно. Растровые расстояния от линии до оси трубы вычисляются сверху  $B = (\Pi_B - \Lambda_B)/2$  и внизу  $H = (\Pi_H - \Lambda_H)/2$  (Рис.3а) или  $B = (\Lambda_B - \Pi_B)/2$  и  $H = (\Lambda_H - \Pi_H)/2$  (Рис.3б). Крен трубы  $K$  в растровых единицах вычисляется как разность величин  $B$  и  $H$ . Перевод крена в линейные единицы производится по формуле  $K = B\delta_B - H\delta_H$ , где  $\delta_B$  и  $\delta_H$  – метрическая цена пиксела соответственно для двух крайних сечений сооружения, мм/пкс. В случае совпадения референтной линии с центром верхнего сечения трубы (Рис.7) крен будет равен  $K = H\delta_H$ .

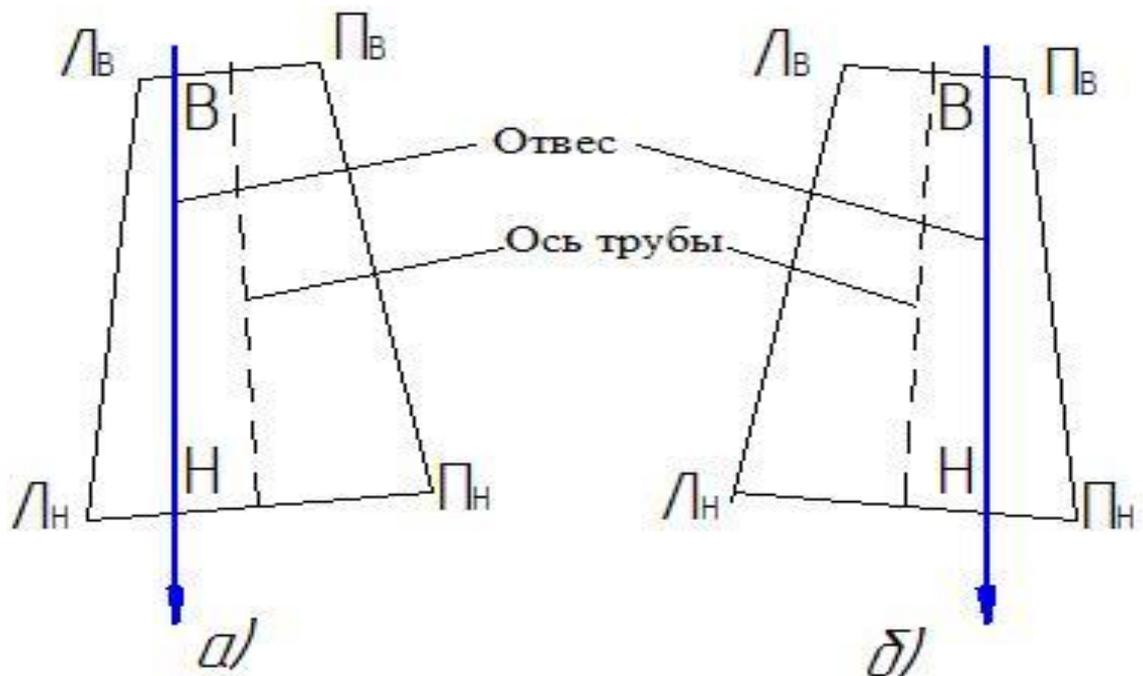


Рис. 6. Схемы к определению крена сооружения при расположении отвеса слева (а) и справа (б) от оси

Данная версия фотограмметрического метода характеризуется малой трудоемкостью проведения замеров и получения результатов. Метод применим также для изучения изменения вертикальности высотных зданий и сооружения в режиме мониторинга.

Результаты измерений в линейных единицах могут быть получены с использованием метрического масштабирования снимков. В работах [71, 76] описана процедура обработки снимка с целью установления соответствия между растровыми и метрическими системами координат, что в итоге позволяет определить масштабную цену одного пиксела в метрических единицах для всех сечений трубы по высоте. От точности определения данных величин главным образом и зависит точность определения крена.

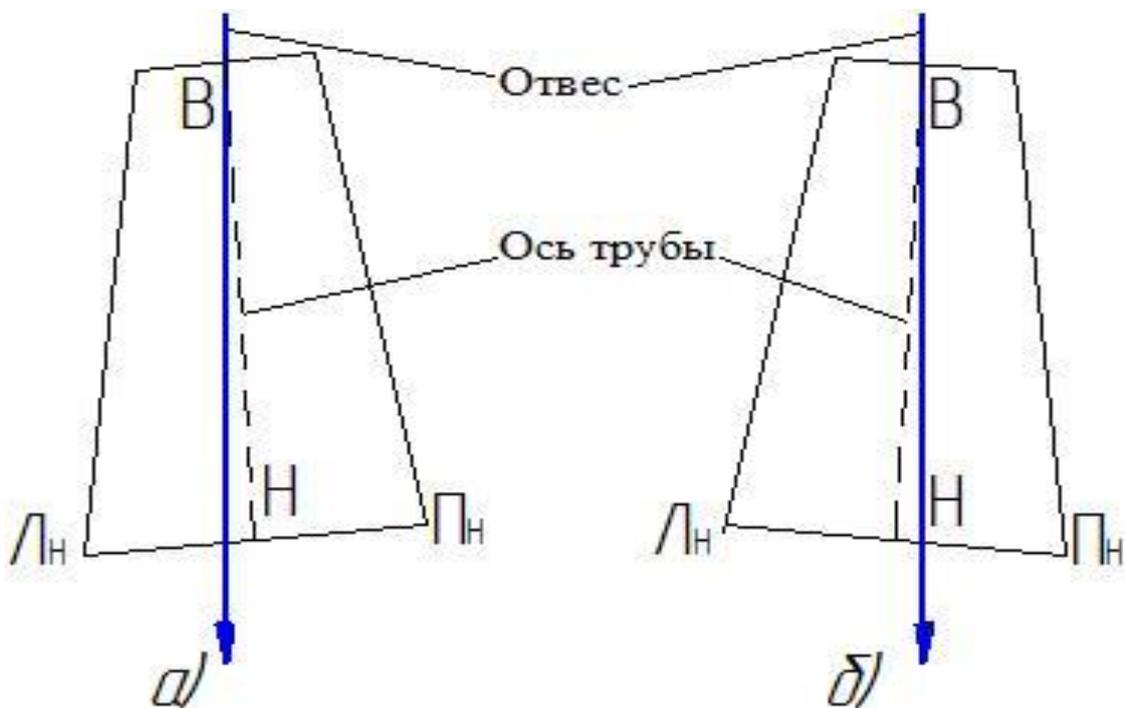


Рис. 7. Оптимальное расположение референтной прямой

Кроме того, при определении геометрических параметров строительных объектов башенного типа возникает проблема дисторсии фотоизображения. в вертикальном направлении. На практике оба этих обстоятельства обычно учитываются проведением соответствующей калибровки фотокамеры, которая является ключевым звеном метода обработки фотоизображений. При этом особую важность приобретает калибровка фотокамеры по вертикальному базису.

### 2.1.1. Калибровка фотокамеры по вертикальному базису с целью измерения расстояния

В работе [77] процедура калибровка фотокамеры *Nikon COOLPIX S9100* по горизонтальному базису производилась на снимках, которые также пригодны для калибровки по базису вертикальному. Для этого рейка фотографировалась с ряда точек с шагом 0,5 м в интервале от 3 до 30 м для нескольких базисов 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 3,0 м (Рис.8а).

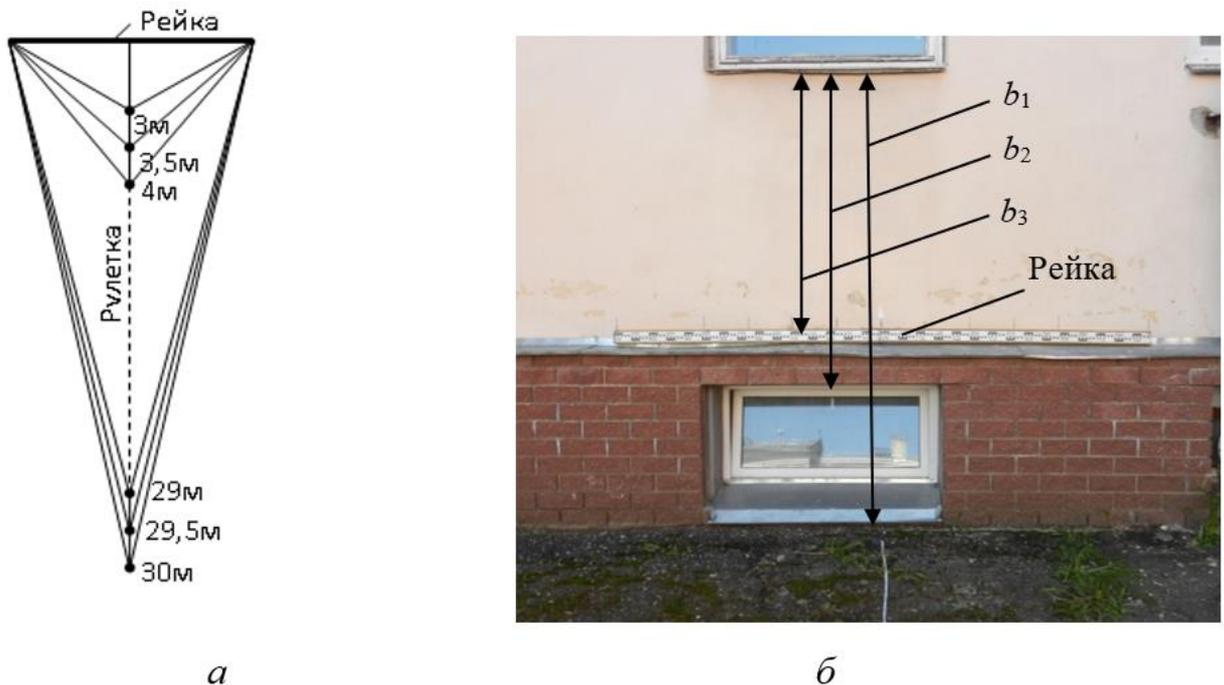


Рис.8. Схема калибровки с нивелирной рейкой и вертикальные базисы на фотоснимках

Растровые длины  $\Delta$ , пкс метрического базиса  $b$ , м (будем далее называть эту величину метрической ценой пиксела) определялись редактором *Paint*, входящим в состав ОС Windows, в результате чего выяснилось, что цена пиксела  $\delta = b/\Delta$ , зависит только от расстояния  $d$  и не зависит от величины базисов  $b$ . Для всех базисов эта зависимость представлена на Рис.9, и может быть вычислена по формуле

$$\delta_i = \delta_n + \frac{(d_i - d_n)(\delta_k - \delta_n)}{(d_k - d_n)}, \quad (2)$$

где  $\delta_i$ ,  $\delta_n$ ,  $\delta_k$  цена пиксела при расстояниях  $d_i$ ,  $d_n = 3$  м и  $d_k = 30$  м соответственно.

Калибровки по вертикальному базису сводилась к измерениям величин  $b_1 = 2,58$  м,  $b_2 = 1,87$  м и  $b_3 = 1,48$  м в месте расположения рейки. Эти величины выступали в роли трёх вертикальных базисов (рис. 8б).

В растровом редакторе (в нашем случае *Paint*) замерялись растровые координаты обоих концов базисов на каждой фотографии с интервалами в 1 метр, начиная с 4 м.

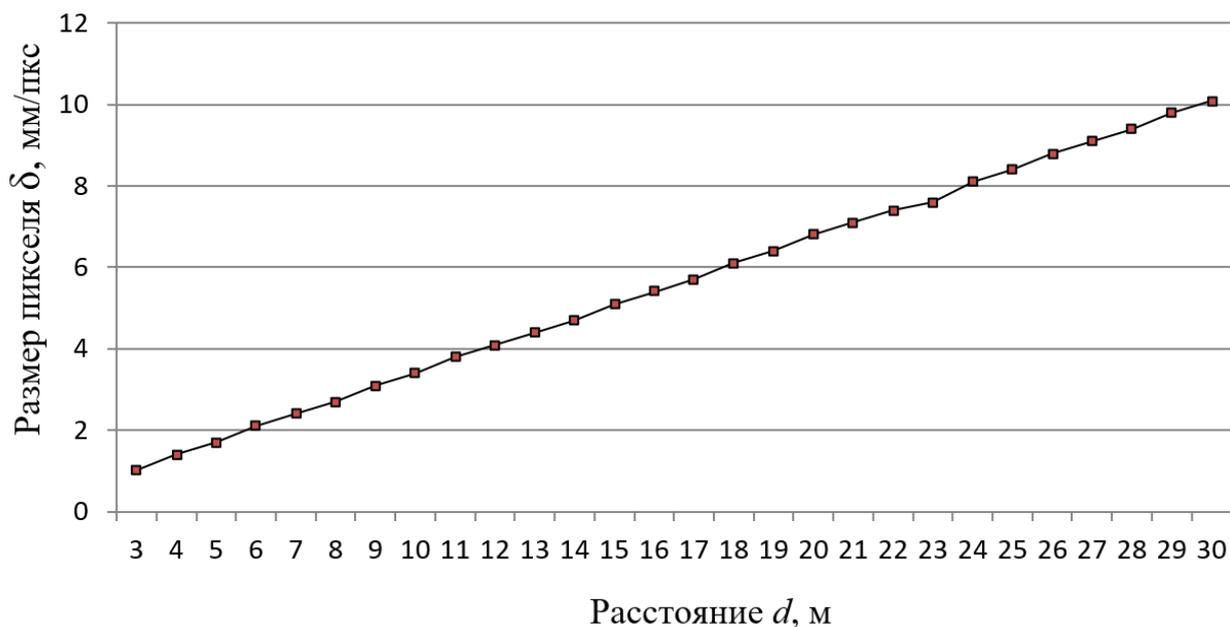


Рис.9. График зависимости цены пикселя от расстояния до горизонтального базиса

Результаты калибровки приведены в Табл.2.

Т а б л и ц а 2

### Результаты калибровки фотокамеры *Nikon COOLPIX S9100*

$d$ , м	Верхние В и нижние Н координаты, пкс				Разности $\Delta = H - B$ , пкс			Размер пикселя $\delta$ , мм		
	$B_{1,2,3}$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	245	2147	1567	1333	1902	1322	1088	1,4	1,4	1,4
5	425	1960	1495	1305	1535	1070	880	1,7	1,7	1,7
6	545	1832	1444	1285	1287	899	740	2,0	2,1	2,0
7	653	1832	1475	1325	1100	822	672	2,3	2,3	2,2
8	793	1755	1465	1345	962	672	552	2,7	2,8	2,7
9	725	1586	1327	1221	861	602	496	3,0	3,1	3,0
10	829	1603	1371	1273	774	542	444	3,3	3,5	3,3
11	877	1584	1372	1289	707	495	412	3,6	3,8	3,6
12	985	1630	1437	1361	645	452	376	4,0	4,1	3,9
13	1205	1792	1613	1541	587	408	336	4,4	4,6	4,4

14	1203	1754	1587	1581	551	384	378	4,7	4,9	3,9
15	1346	1857	1701	1638	511	355	292	5,0	5,3	5,1
16	1331	1809	1664	1605	478	333	274	5,4	5,6	5,4
17	1358	1807	1670	1614	449	312	256	5,7	6,0	5,8
18	1308	1736	1607	1554	428	299	246	6,0	6,3	6,0
19	1365	1772	1649	1599	407	284	234	6,3	6,6	6,3
20	1276	1661	1545	1498	385	269	222	6,7	7,0	6,7
21	1310	1677	1566	1521	367	256	211	7,0	7,3	7,0
22	1385	1734	1628	1586	349	243	201	7,4	7,7	7,4
23	1326	1658	1558	1517	332	232	191	7,8	8,1	7,7
24	1524	1844	1747	1798	320	223	274	8,1	8,4	5,4
25	1435	1741	1648	1611	306	213	176	8,4	8,8	8,4
26	1341	1636	1548	1512	295	207	171	8,7	9,0	8,7
27	1416	1701	1615	1581	285	199	165	9,1	9,4	9,0
28	1422	1696	1613	1579	274	191	157	9,4	9,8	9,4
29	1200	1467	1386	1354	267	186	154	9,7	10,1	9,6
30	1277	1534	1457	1426	257	180	149	10,0	10,4	9,9

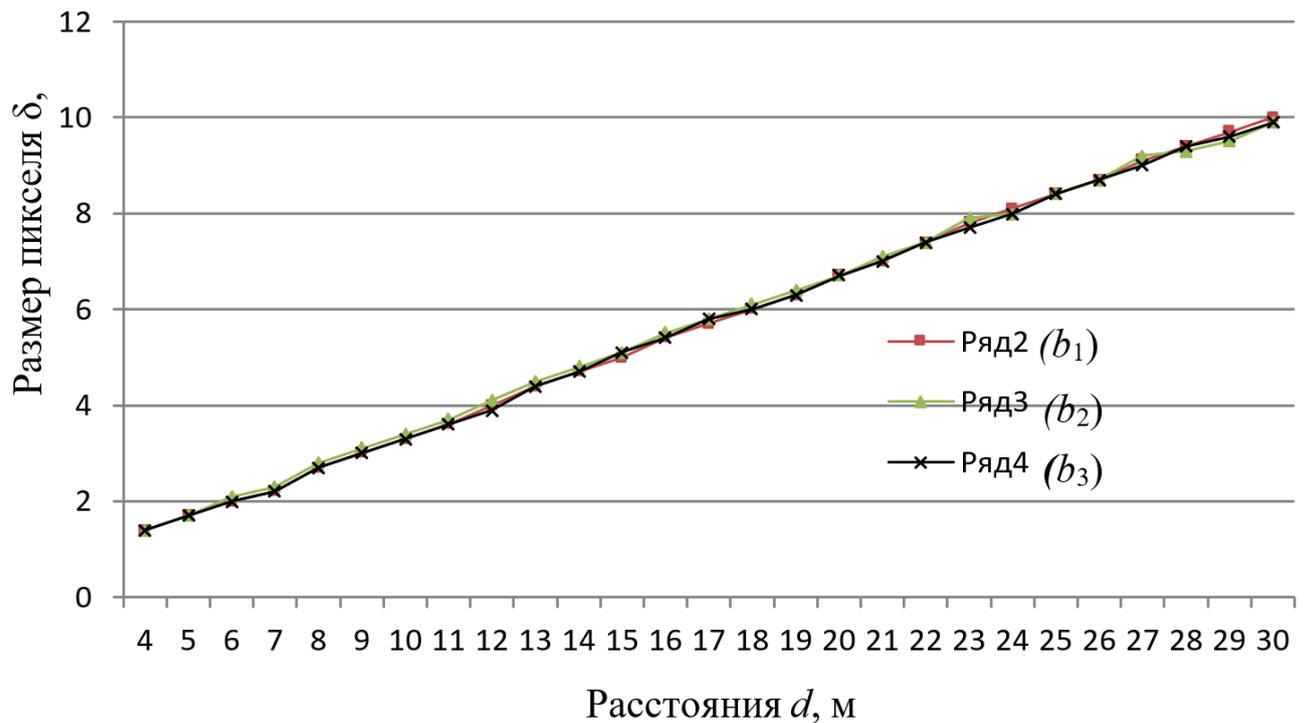


Рис.10. График зависимости цены пикселя  $\delta$  от расстояния до базиса

Цена пикселя  $\delta = b/\Delta$  зависит только от расстояния  $d$  и не зависит от величины базиса  $b$ . Эта зависимость вычисляется по формуле (2) и представлена на Рис.10. Видно, что зависимости на Рис.10 и Рис.9 идентичны.

На практике можно ограничиться тщательным определением  $\delta_n$  и  $\delta_k$ , а цена пиксела  $\delta_i$  может быть найден по формуле (2). В частном случае, когда фотокамера расположена в начальной точке линии, то есть  $d_n = 0$  м, формула (2) упрощается и принимает вид

$$\delta_i = \delta_k \frac{d_i}{d_k} \quad (3)$$

Величина  $\delta_i$  может использоваться, во-первых, для перевода растровых величин в метрическую систему единиц и, во-вторых, для контроля правильности определения  $d_i$ . Для этого, определив  $\Delta_i$  и  $d_i$ , следует по формулам (2) или (3) вычислить фактическую величину  $\delta_f$  и сравнить с теоретическим её значением.

Для фотокамеры *Nikon COOLPIX S9100* на основании данных табл. 5 построены графики зависимости расстояний  $d$  от количества пикселей  $\Delta$ , приходящихся на базисы длиной  $b_1, b_2, b_3$ . Причём эти графики полностью идентичны построенным по горизонтальному базису. По таким графикам, вычерченным в крупном масштабе, можно определять графически расстояния  $d'$  в зависимости от  $\Delta'$  для применяемого базиса определённой длины (Рис.11).

Описанная калибровка камеры имеет целью исключение влияния дисторсии объектива, поскольку, во-первых, изображение базиса должно всегда занимать на снимке центральное положение, а цена пиксела, определённая по изображению базиса, не применяется для других частей снимка. Действительно, если точки  $i$  и  $i+1$  (Рис.12) дают правильные расстояния  $d_i$  и  $d_{i+1}$  независимо от наличия или отсутствия дисторсии объектива, то и промежуточная точка  $i'$  также зафиксирует правильное расстояние  $d'$ . Поэтому для предлагаемой калибровки не требуется использование специальных цифровых фотограмметрических систем типа *ERDAS, ENVI, PHOTOMOD Lite*.

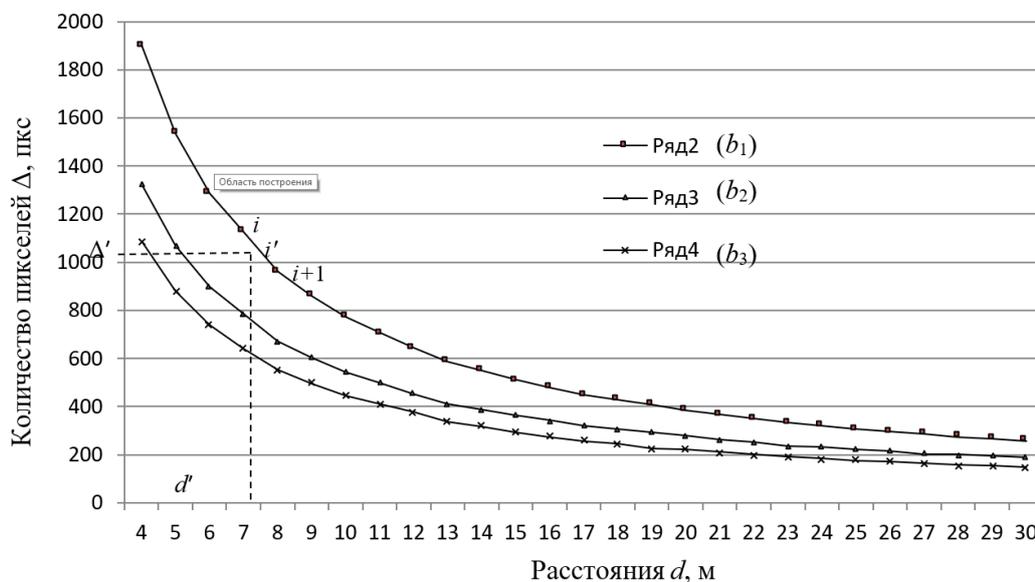


Рис.11. Графики зависимости расстояния  $d$  от количества пикселей для базисов длиной  $b_1, b_2, b_3$

Определение конкретной величины  $d'$  по измеренному значению  $\Delta'$ , соответствующему этому расстоянию, производится методом линейной интерполяции по интервалу  $(d_i - d_{i+1})$ , определяемому так, как показано на Рис.11 и в Табл.2. В соответствии с Рис.12 расстояние  $d'$  вычисляется по формуле, при учете,  $d_i - d_{i+1} = 1$

$$d' = d_i + \frac{1 \times \Delta''}{\Delta}. \quad (4)$$

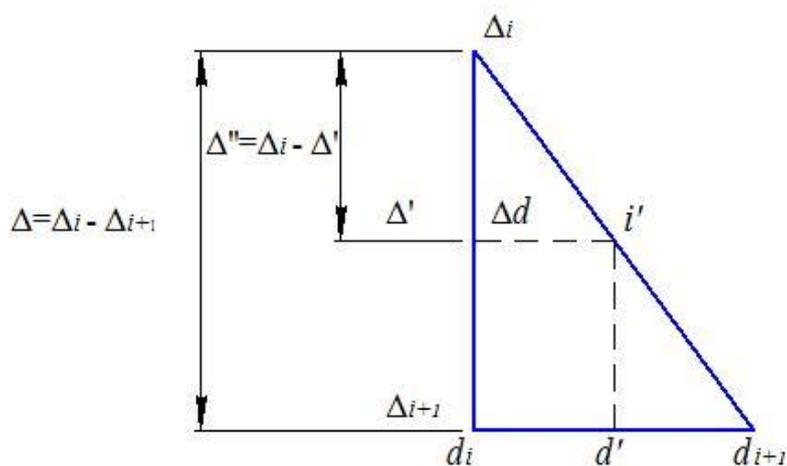


Рис.12. Вычисление расстояния методом линейной интерполяции

В процессе калибровки была найдена аналитическая зависимость  $d$  от  $\Delta$  для определения расстояния до объекта съёмки по его фотографии. Для этого были использованы данные, представленные в табл. 5. Аналитическая

зависимость был определена методом наименьших квадратов. Для этого в качестве базовой функции была выбрана зависимость

$$d = \frac{A}{\Delta}. \quad (5)$$

Величина  $A$  была найдена с использованием метода наименьших квадратов [155] по формуле

$$A = \frac{\sum_{i=3}^n d_i / \Delta_i}{\sum_{i=3}^n 1 / \Delta_i^2}, \quad n = 27 \quad (6)$$

Используя данные из Табл.2, для каждого базиса были вычислены значения:  $A_1 = 7691,6$  м×пкс для  $b_1$ ;  $A_2 = 5367,9$  м×пкс для  $b_2$ ;  $A_3 = 4506,3$  м×пкс для  $b_3$ .

Контроль достоверности формулы (6) был осуществлен путем сравнения точности определения расстояний  $d$  от величин  $\Delta$  на расстояниях от 4 м до 30 м. Полученные значения были сравнены с величинами из табл. 2. По результатам вычисления ошибок значений  $d_i$  по отношению к табличным  $d$  построены графики, приведенные на Рис.13.

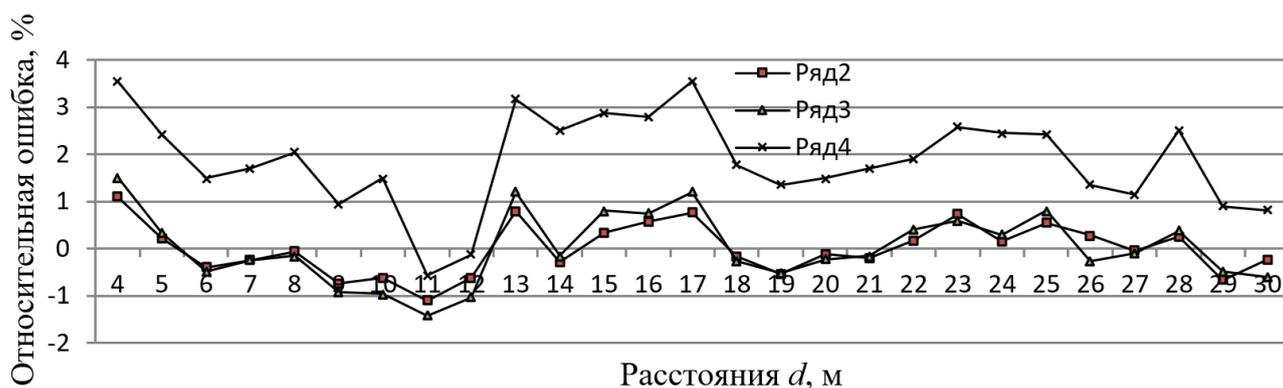


Рис.13. Зависимости ошибки вычисления величин  $d$  по формуле (3) для базисов  $b_1, b_2, b_3$

Из Рис.13 видно, что относительные ошибки вычисленных по формуле (5) величин  $d_i$  для базисов  $b_1$  и  $b_2$  в рассмотренном диапазоне лежат в диапазоне +1,5 до -1,4%, а для базиса  $b_3$  в диапазоне +3,5 до -0,6%. В

среднем относительные ошибки для базисов  $b_1$  и  $b_2$  составили 0,003% и 0,012%, в то время как для базиса  $b_3$  она оказалась равной 1,860%.

Повышение точности определения расстояний в величины  $\Delta$  предлагается введение поправок. Для этого по формуле (5) следует определить растровую величину, соответствующую расстояниям 4,5,...,29,30 м (графы 5, 6, 7 Табл.3)

$$\Delta_0 = A/d, \quad (7)$$

Т а б л и ц а 3

**Поправки в измеренные значения  $\Delta$  (камера Nikon COOLPIX S9100)**

$d, \text{ м}$	Количество пикселей в базисах $b_1, b_2, b_3$			$\Delta_0 = A/d, \text{ пкс}$			$p = \Delta_0 - \Delta, \text{ пкс}$		
	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$A_1/d$	$A_2/d$	$A_3/d$	$p_1$	$p_2$	$p_3$
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	1902	1322	1088	1922,9	1342,0	1126,6	20,9	20,0	38,6
5	1535	1070	880	1538,3	1073,6	901,3	3,3	3,6	21,3
6	1287	899	740	1281,9	894,7	751,1	-5,1	-4,3	11,1
7	1100	822	672	1098,8	816,8	662,8	-1,2	-5,2	9,2
8	962	672	552	961,5	671,0	563,3	-0,5	-1,0	11,3
9	861	602	496	854,6	596,4	500,7	-6,4	-5,6	4,7
10	774	542	444	769,2	536,8	450,6	-4,8	-7,2	6,6
11	707	495	412	699,2	488,0	409,7	-7,8	-11,0	-2,3
12	645	452	376	641,0	447,3	375,5	-4,0	-4,7	-0,5
13	587	408	336	591,7	412,9	346,6	4,7	0,9	10,6
14	551	384	378	549,4	383,4	321,9	-1,6	2,6	3,9
15	511	355	292	512,8	357,9	300,4	1,8	-7,1	8,4
16	478	333	274	480,7	335,5	281,6	2,7	7,5	7,6
17	449	312	256	452,4	315,8	265,1	3,4	-5,2	9,1
18	428	299	246	427,3	298,2	250,4	-0,7	-7,8	4,4
19	407	284	234	404,8	282,5	237,2	-2,2	-10,5	3,2
20	385	269	222	384,6	268,4	225,3	-0,4	-10,6	3,3
21	367	256	211	366,3	255,6	214,6	-0,7	-7,4	3,6
22	349	243	201	349,6	244,0	204,8	0,6	-9,0	3,8
23	332	232	191	334,4	233,4	195,9	2,4	-3,6	4,9
24	320	223	274	320,5	223,7	187,8	0,5	-9,3	3,8
25	306	213	176	307,7	214,7	180,3	1,7	-8,3	4,3
26	295	207	171	295,8	206,5	173,3	0,8	-7,5	2,3
27	285	199	165	284,9	198,8	166,9	-0,1	-4,2	1,9
28	274	191	157	274,7	191,7	160,9	0,7	-9,3	3,9
29	267	186	154	265,2	185,1	155,4	-1,8	-10,9	1,4
30	257	180	149	256,4	178,9	150,2	-0,6	-9,1	1,2

Поправки в измеренным растровым величинам  $\Delta$  в пикселах (графы 2, 3, 4) вычисляются как разности  $p = \Delta_0 - \Delta$  (графы 8, 9, 10 Табл.3). Зависимость поправок от расстояния приведена на Рис.14, которая показывает, что с увеличением расстояния величина поправки уменьшается и, начиная с некоторого момента (в нашем случае примерно с 15 м), остаётся постоянной, а для базиса  $b_1$  практически равной нулю.

Аналогичный образом могут быть построены графики, показывающие зависимость величины поправки  $p$  от  $\Delta$ . По таким графикам, вычерченным в крупном масштабе, можно определять графически  $p'$  в зависимости от  $\Delta'$  для базиса определённой длины по схеме на Рис.12 по (4).

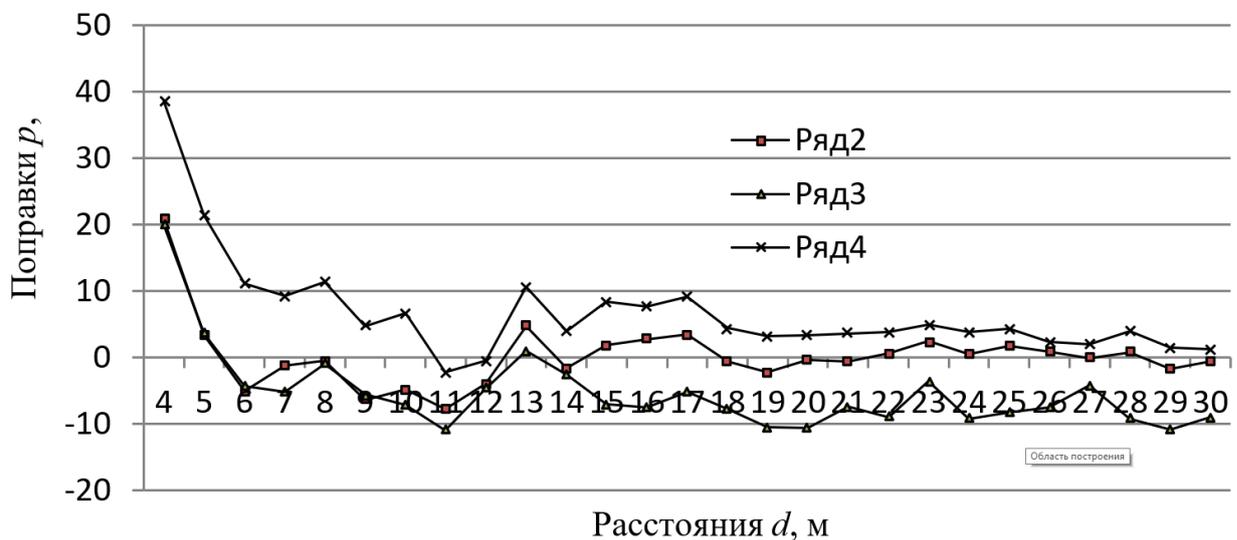


Рис.14. График зависимости поправок  $p$  от расстояния  $d$

Как видно, калибровка цифровой фотокамеры по вертикальному базису выполнена с высокой точностью. Результаты калибровки представлены как в графической, так и в аналитической форме. Установлено, что точность измерений зависит от величины и расположения на снимке изображения базиса, которое должно находиться в центральной части снимка. Однако на практике часто необходимо производить замеры параметров фото методом не только объектов башенного типа, но и протяженных объектов, таких, например, как рельсовые пути мостовых кранов и др. Это требует совместного использования горизонтального и вертикального базисов.

### 2.1.2. Калибровка фотокамеры одновременно по горизонтальному и вертикальному базису с целью измерения расстояния

Одновременная калибровка цифровой фотокамеры по горизонтальному и вертикальному базисам делает возможным проведение одновременного определения прямолинейности подкрановых рельсов и нивелирования подкранового пути с помощью цифровой фотокамеры[82].



Рис.15. Горизонтальный и вертикальный базисы

Измерения выполнялись цифровой камерой *Nikon S9100*. В качестве базисов использовались две нивелирные 1,5 – метровые рейки, скреплённые между собой в центральной их части в виде креста (Рис.15). Установленная на высоте равной половине рейки фотокамера направлялась так, чтобы крест занимал на снимке центральное положение. Базисы фотографировались на расстояниях  $d = 30, 29, 28, \dots, 5, 4, 3$  м от камеры. На снимке на каждой фотографии замерялись растровые координаты всех четырех концов реек. По

этим координатам вычислялись растровые длины обеих рек  $\Delta_{\Gamma} = \Pi - \text{Л}$  и  $\Delta_{\text{В}} = \text{В} - \text{Н}$ , по которым вычислялась цена пиксела  $\delta = b/\Delta$ , соответствующая конкретному расстоянию  $d$  от фотокамеры до базисов.

В процессе калибровки было выяснено, что растровые длины на всех расстояниях равны друг другу (Табл.4), что подтверждается совпадением графиков на Рис.16. По этим графикам можно определять графически расстояния  $d'$  в зависимости от  $\Delta'$  как описано в п. 2.1.1.

Данное обстоятельство позволяет использовать в формулах (5) и (6) близкие друг к другу величины  $A_{\Gamma} = 5747,624$  м×пкс для горизонтального базиса и  $A_{\text{В}} = 5756,136$  м×пкс для базиса вертикального.

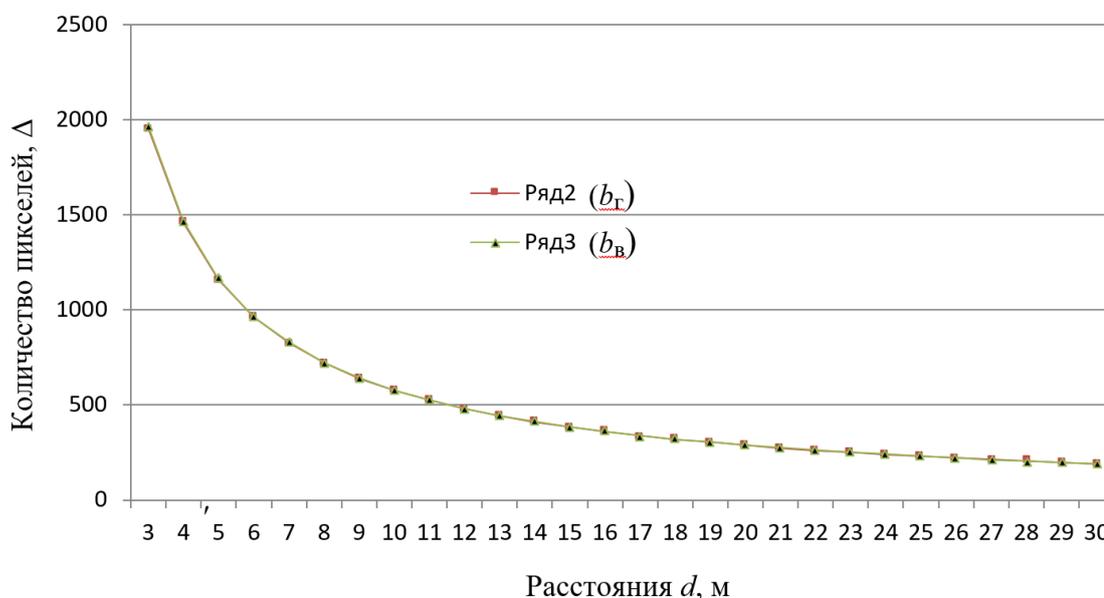


Рис.16. Зависимости  $d$  от растровой величины  $\Delta$

Была выполнена проверка точности определения расстояний  $d$  от величин  $\Delta$  в диапазоне расстояний от 3 м до 30 м. Для этого по формуле (5) были вычислены значения величин  $d_i$  в точках  $\Delta_i$  и сравнены с фактическими значениями. По их разности были найдены относительные ошибки вычисленных значений  $d_i$  по отношению к фактическим  $d$  (см. Рис.17).

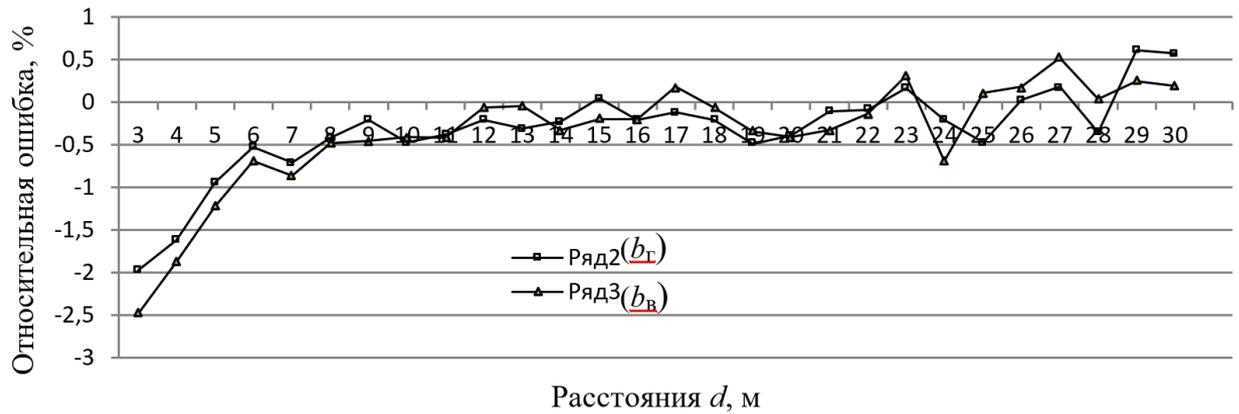


Рис. 17. Графики зависимости ошибки вычисления величин  $d$  по формуле (5)

Как следует из Рис.17, относительные ошибки величин  $d_i$  для обоих базисов в диапазоне от 3 до 30 м находятся в пределах от  $-2,5$  до  $+0,6\%$ . Максимальных значений они достигают при малых расстояниях от 3 до 6 метров. На расстояниях свыше 6 м ошибки остаются практически одинаковыми в пределах от  $-0,5$  до  $+0,6\%$ , что соответствует точности нитяного дальномера геодезического прибора.

Т а б л и ц а 4

### Поправки в результаты измерений

$d, \text{ м}$	Данные для горизонтального базиса $b_G$			Данные для вертикального базиса $b_B$		
	$\Delta_G, \text{ пкс}$	$\Delta_0 = A/d$	$p = \Delta_0 - \Delta$	$\Delta_B, \text{ пкс}$	$\Delta_0 = A/d$	$p = \Delta_0 - \Delta$
1	2	3	4	5	6	7
3	1954,5	1915,9	-38,63	1965,5	1918,7	-48,79
4	1460,5	1436,9	-23,6	1466,5	1439,0	-27,46
5	1160,5	1149,5	-10,98	1165,5	1151,2	-14,27
6	963	957,9	-5,06	966	959,4	-6,64
7	827	821,1	-5,91	829,5	822,3	-7,19
8	721,5	718,5	-3,05	723	719,5	-3,48
9	640	638,6	-1,38	642,5	639,6	-2,93
10	577,5	574,8	-2,74	578	575,6	-2,39
11	524,5	522,5	-1,99	525,5	523,3	-2,21
12	480	479,0	-1,03	480	479,7	-0,32
13	443,5	442,1	-1,38	443	442,8	-0,22
14	411,5	410,5	-0,96	412,5	411,2	-1,35
15	383	383,2	0,17	384,5	383,7	-0,76
16	360	359,2	-0,77	360,5	359,8	-0,74
17	338,5	338,1	-0,4	338	338,6	0,6
18	320	319,3	-0,69	320	319,8	-0,21
19	304	302,5	-1,49	304	303,0	-1,05

20	288,5	287,4	-1,12	289	287,8	-1,19
21	274	273,7	-0,3	275	274,1	-0,9
22	261,5	261,3	-0,24	262	261,6	-0,36
23	249,5	249,9	0,4	249,5	250,3	0,77
24	240	239,5	-0,52	241,5	239,8	-1,66
25	231	229,9	-1,1	230	230,2	0,25
26	221	221,1	0,06	221	221,4	0,39
27	212,5	212,9	0,37	212	213,2	1,19
28	206	205,3	-0,73	205,5	205,6	0,08
29	197	198,2	1,19	198	198,5	0,49
30	190,5	191,6	1,09	191,5	191,9	0,37

По схеме, описанной в п. 2.1.1, были вычислены поправки (см. Табл.4 графы 4, 7) к  $\Delta$ , характер изменения которых в зависимости от расстояния иллюстрируется на Рис.18. Графики наглядно показывают, как с увеличением расстояния величина поправки уменьшается и, начиная с некоторого момента (в нашем случае примерно с 8 м), остаётся постоянной и практически равной нулю.

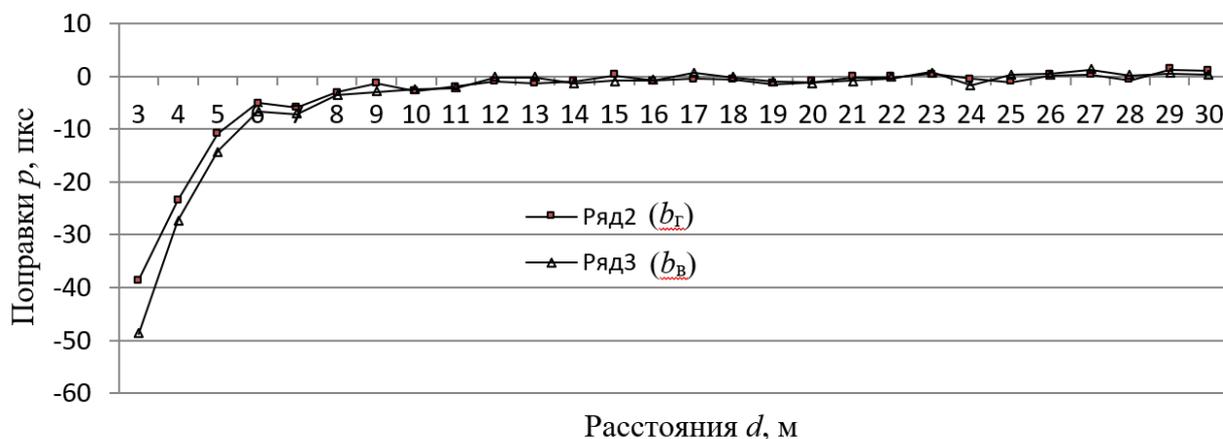
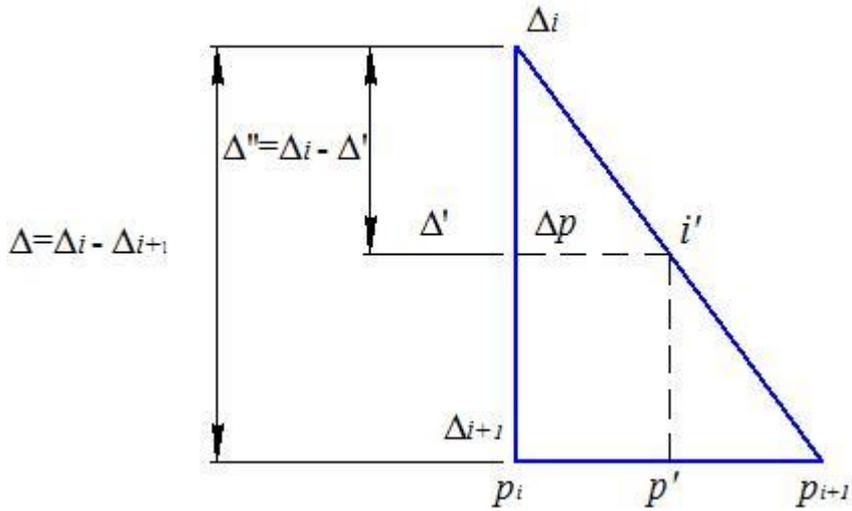


Рис. 18. Графики зависимости поправок  $p$  от расстояния  $d$

При вычислении  $p'$  использовалась линейная интерполяция. Измеренное значение  $\Delta'$  используется для нужного интервала  $\Delta_i$  и  $\Delta_{i+1}$  по табл. 7, внутри которого оно располагается.

Рис. 19.К вычислению поправки  $p'$ 

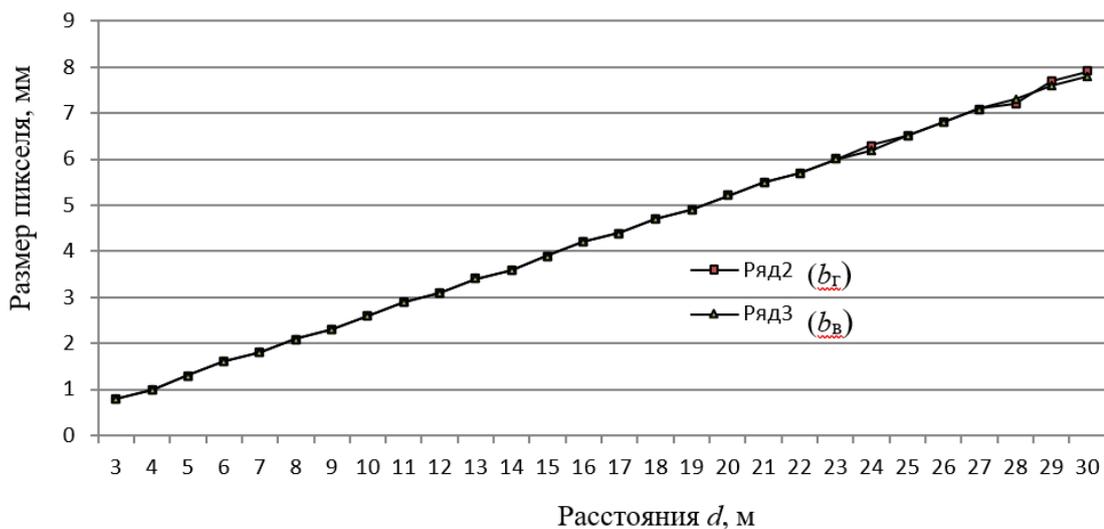
Для нахождения поправки выбираются крайние значения  $\Delta_i$  и  $\Delta_{i+1}$  этого интервала (Рис.19)

$$p' = p_i - \frac{1 \times (\Delta_i - \Delta')}{[(\Delta_i - \Delta_{i+1})]} = p_i - \frac{1 \times \Delta''}{\Delta}. \quad (8)$$

С учётом поправки, расстояние вычисляется по формуле

$$d' = \frac{A}{\Delta + p'}. \quad (9)$$

Было установлено, что цена пикселя  $\delta$  одинакова для обоих базисов и зависит только от расстояния  $d$ . (см. Рис.20) и может вычисляться по формуле (2).

Рис. 20. Цена пикселя  $\delta$  в зависимости от расстояния  $d$

Цена пиксела линейно зависит от расстояния, что следует из Рис.10 и Рис.20. Поэтому на практике можно ограничиться лишь величинами  $\delta_3$  и  $\delta_{30}$ , а  $\delta_i$  может быть найдена по формуле (8).

### 2.1.3. Контроль сооружений по высоте и прямолинейности с помощью фотограмметрического метода

Результаты измерений вертикального базиса  $b_v$  также могут с успехом использоваться для определения разности высот двух и более точек земной поверхности, то есть нивелирования фотограмметрическим методом (Рис.21). Использование данного типа измерений является эффективным для определения ГППФ труднодоступных горизонтально протяженных объектов типа рельсовых путей мостовых кранов. Установленной в точке  $O$  линии фотокамерой на высоте  $b_v/2$  фотографируется вертикальный базис в конечной точке  $K$  этой линии так, чтобы его изображение располагалось в центральной части снимка. Затем базис последовательно фотографируется в точках  $L, M$  с постоянной точки установки фотокамеры.

Далее на каждой фотографии замеряются растровые координаты верхнего и нижнего концов базиса  $V_{K,L,M...}$  и  $H_{K,L,M...}$  в пикселах. Далее вычисляется количество пикселей  $\Delta_{K,L,M...} = H_{K,L,M...} - V_{K,L,M...}$  и вычисляется цена пиксела  $\delta_{K,L,M...} = b_v/\Delta_{K,L,M...}$ . Затем вычисляются величины  $C_K = (V_K + H_K)/2$  (см. Рис.21) и  $d_K, d_L, d_M, \dots$

Величина  $h'_L = H_L - C_L$ , что следует из Рис.21. Величина  $C_L = d_L C_K / d_K$ , что следует из подобия треугольников с основаниями  $C_K$  и  $C_L$ . Таким образом, превышение  $h_L$  точки  $L$  над линией  $KO$  определяется как разность  $b_v/2 - h'_L$  или, в метрическом выражении

$$h_L = b_v/2 - (H_L - d_L C_K / d_K) \delta_L . \quad (10)$$

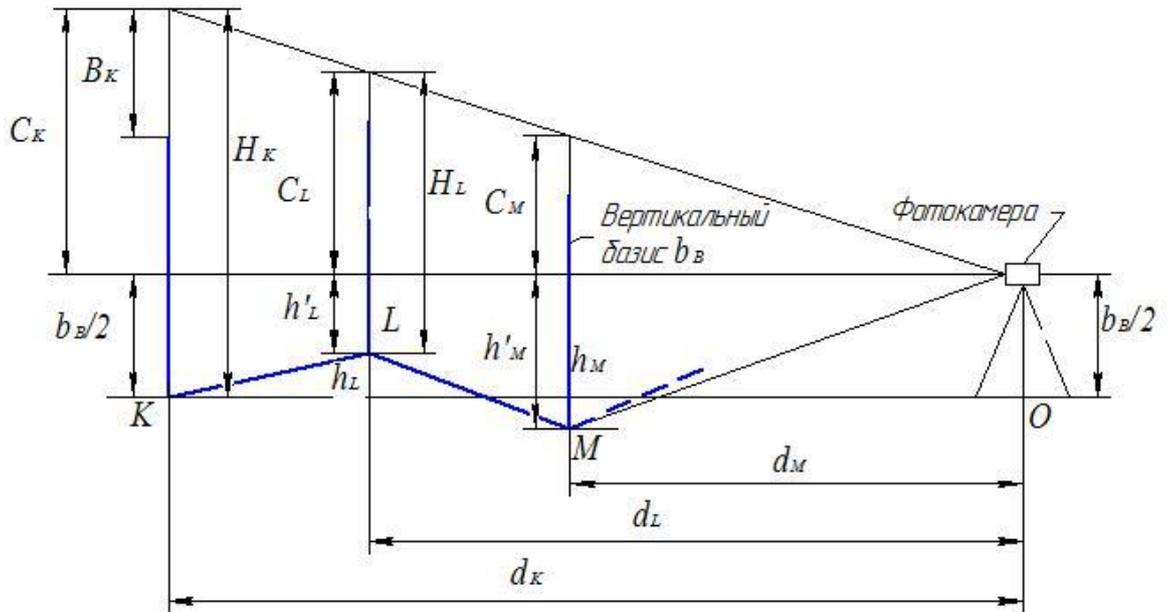


Рис. 21. Контроль по высоте фотограмметрическим методом

Аналогичным образом можно вычислить превышение  $h_M$  точки  $M$  над линией  $KO$ , которое в соответствии с Рис.21 будет иметь знак минус

$$H_M = b_B/2 - (H_M - d_M C_K / d_K) \delta_M, \quad (11)$$

и так для всех нивелируемых точек.

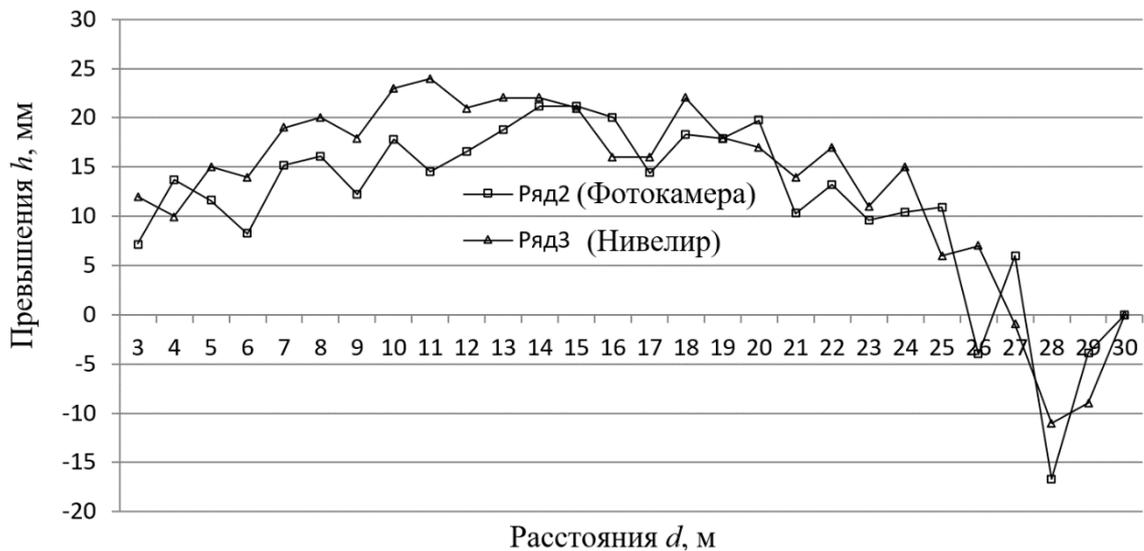


Рис. 22. Продольный профиль линии 3-30 м

Вышеописанные результаты контроля профиля линии были сравнены с результатами геометрического нивелирования с помощью нивелира 2Н-3Л (Рис.22).

Невязка результатов находится в пределах от  $-9,5$  до  $+7,0$  мм, что объясняется относительно низким качеством обработки растровых изображений редактора *Paint*. Результат может быть улучшен после предварительной обработки снимков в более качественном программном обеспечении типа *Camera Raw* или *PhotoMod Lite*.

С целью повышения точности нивелирования фотограмметрическим методом была также разработана иная схема. В схеме горизонтально продолженная конструкция типа подкрановых рельсов моделировалась двумя параллельными полосами в коридоре учебного корпуса ННГАСУ. На обеих полосах (Рис.23а, б) были закреплены по 9 точек с шагом 5 м.

Моделирование производилось по схеме, описанной в работе [83]. Фотокамера центрировалась в станции 1 (начальная точка). Замерялась «высота инструмента» до центра объектива. В станции  $n$  (конец линии) на вертикально установленной нивелирной рейке фиксировалась оптическая ось камеры на «высоте инструмента», после чего рейка фотографировалась.



Рис. 23. Расположение точек на линиях, моделирующих подкрановые рельсы

Рейка последовательно устанавливалась в заданных точках и фотографировалась камерой *Canon PowerShot S2 IS*. Полученные снимки обрабатывались с помощью редактора *Paint.NET*.

Растровые координаты пересчитываются в линейные в режиме **Пиксели** растрового редактора Paint.NET. Этот режим содержится в пункте меню **Вид**. Выбирается режим выделения рамкой с помощью инструмента **Выбор прямоугольной области** (Рис.24). Цена пиксела вычисляется путем деления известного размера по нивелирной рейке на растровый размер области который появляется в строке состояния.

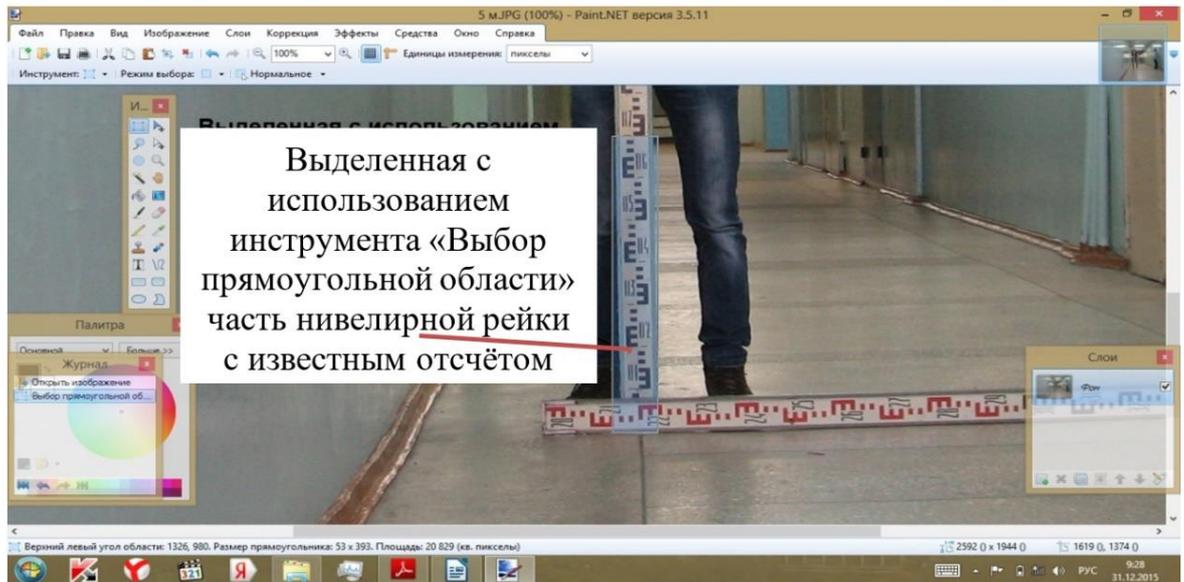


Рис.24. Пример работы со снимком в программе Paint.NET при его масштабировании

В Табл. 5 и 6 представлены результаты масштабирования по обеим рейкам.

Т а б л и ц а 5

### Масштабирование снимков по вертикальной рейке

Расстояние, м	Левая линия			Правая линия		
	Координаты по рейке		$\delta$ , мм/пкс	Координаты по рейке		$\delta$ , мм/пкс
	пкс	мм		пкс	мм	
1	2	3	4	5	6	7
5	423	750	1,77	420	750	1,79
10	210	750	3,57	210	750	3,57
15	140	750	5,36	141	750	5,32
20	106	750	7,08	104	750	7,21
25	84	750	8,93	854	750	8,82
30	71	750	10,56	71	750	10,56
35	60	750	12,50	61	750	12,30
40	53	750	14,15	52	750	14,42

### Масштабирование снимков по горизонтальной рейке

Расстояния, м	Левая линия			Правая линия		
	Координаты по рейке		$\delta$ , мм/пкс	Координаты по рейке		$\delta$ , мм/пкс
	пкс	мм		пкс	мм	
5	226	400	1,77	227	400	1,76
10	112	400	3,57	112	400	3,57
15	75	400	5,33	75	400	5,33
20	56	400	7,14	56	400	7,14
25	45	400	8,89	45	400	8,89
30	38	400	10,53	38	400	10,53
35	32	400	12,50	32	400	12,50
40	28	400	14,29	28	400	14,29



Рис.25. К обработке снимка в *Paint.NET* на этапе фиксации базиса.

В данной схеме необходимо зафиксировать вертикальный базис на снимке рейки, расположенной на последней станции. На снимке на изображении рейки фиксируется известная отметка (Рис.25а) и далее с помощью инструмента **Линия** проводится прямая (базис) на отсчете в данном случае 750 мм (Рис.25б).

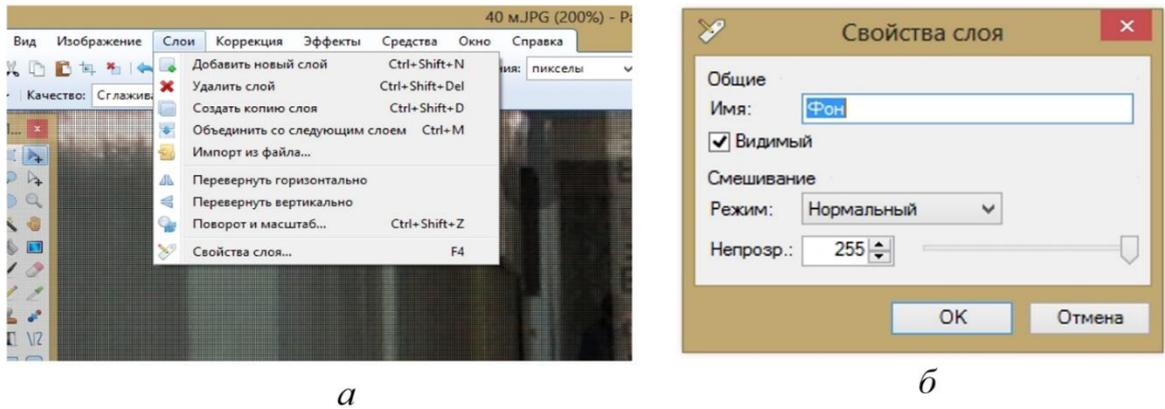


Рис.26. К обработке снимков в Paint.NET на этапе наложения фотографий

Далее фотографии станций ( $n-1$ ), ( $n-2$ ) и т. д. накладываются последовательно на фотографию станции  $n$ . Для этого в строке меню **Слои** выбирается функция **Импорт из файла** (Рис.26а). После импорта снимка в строке меню **Слои** с помощью функции **Свойства слоя** (Рис.26б) необходимо в открывшейся карточке (Рис.26б) выбрать режим **Нормальный** с прозрачностью слоя 100 – 130. Эти действия позволят совместить оба снимка на одном экране.

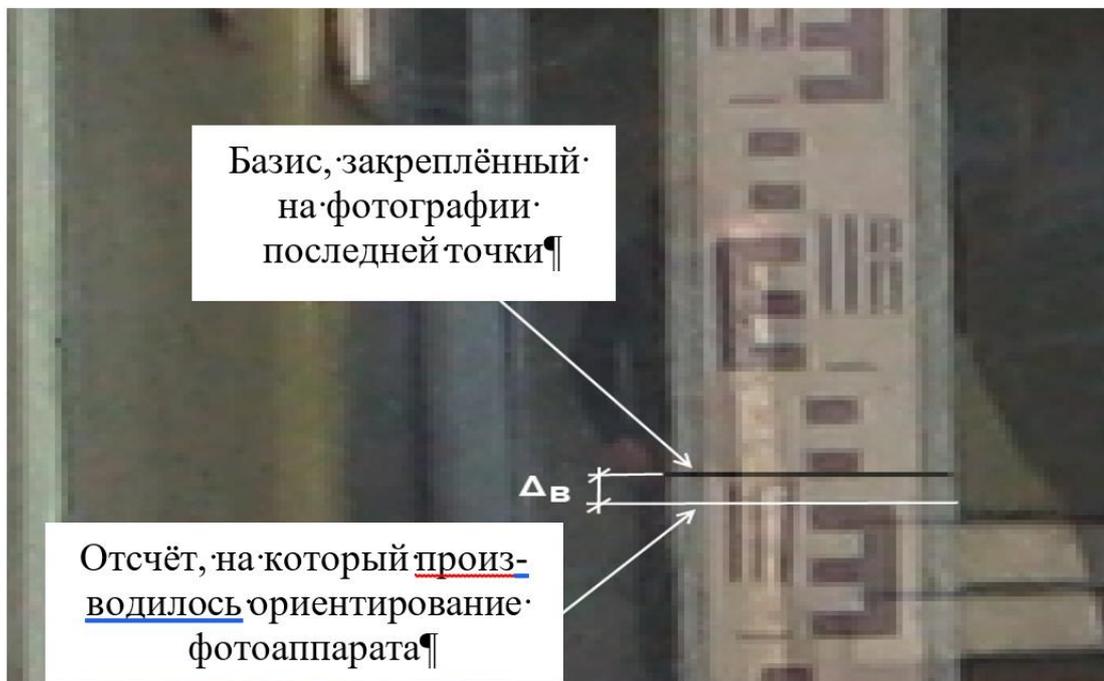


Рис.27. К обработке снимков в Paint.NET на этапе определения превышения.

На заключительном этапе с помощью инструмента **Выбор прямоугольной области** рамкой выделяется часть рейки от отметки ориентирования, выполненной по схеме на Рис.24, до зафиксированного

базиса. Знак полученной величины  $\Delta_B$  (Рис.27) будет зависеть от его положения по отношению к отметке ориентирования: «минус», если ниже, «плюс», если выше. Величина  $\Delta_B$  с учетом ее знака добавляется к отметке ориентирования, а полученный результат после перевода в метрическую систему по результатам калибровки позволяет определить превышение между нивелируемыми точками.

Результаты нивелирования точек левой и правой линий на Рис.23 фотограмметрическим методом представлены в Табл.7 и 8.

Т а б л и ц а 7

### Результаты нивелирования левой линии

Расстояние, м	Координаты (фото) $\Delta_B$		Отсчёт ориентирования	Отсчёт по рейке (фото),мм	Превышение (фото),мм	Отсчёт (нивелир) мм	Превышение (нив.),мм	$\Delta$ , мм
	пкс	мм						
1	2	3	4	5	6	7	8	0
0	-	-	750	750,00	0,00	1346	0	0,0
5	7	12,41	750	762,41	12,4	1357	11	1,4
10	7	25,00	750	775,00	12,6	1368	11	1,6
15	5	26,79	750	776,79	1,8	1371	3	-1,2
20	4	28,30	750	778,30	1,5	1377	6	-4,5
25	4	35,71	750	785,71	7,4	1383	6	1,4
30	1	10,56	750	760,56	-25,2	1354	-29	3,8
35	1	12,50	750	762,50	1,9	1358	4	-2,1
40	-	0,00	750	750,00	-12,5	1346	-12	-0,5

Т а б л и ц а 8

### Результаты нивелирования правой линии

Расстояние, м	Координаты (фото) $\Delta_B$		Отсчёт ориентирования	Отсчёт по рейке (фото),мм	Превышение (фото),мм	Отсчёт (нивелир) мм	Превышение (нив.),мм	$\Delta$ , мм
	пкс	мм						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	-	750	750,00	0,00	1344	0	0,0
5	3	5,36	750	755,36	5,4	1348	4	1,4
10	3	10,71	750	760,71	5,4	1357	9	-3,6
15	3	15,96	750	765,96	5,2	1365	8	-2,8
20	3	21,63	750	771,63	5,7	1373	8	-2,3
25	1	8,82	750	758,82	-12,8	1361	-12	-0,8
30	0	0,00	750	750,00	-8,8	1351	-10	1,2
35	1	12,30	750	762,30	12,3	1358	7	5,3
40	-	0,00	750	750,00	-12,3	1344	-14	1,7

Полученные результаты были сопоставлены с результатами классического нивелирования. Для этого нивелир 2Н-3Л устанавливался в точке 1 и измерялась «высота инструмента», далее нивелир наводился на отметку, равную «высоте инструмента», на рейке, установленной в станции  $n$ . Затем, при постоянной визирной оси нивелира, замерялись превышения по рейке, устанавливаемой последовательно на станциях  $(n-1)$ ,  $(n-2)$  и т. д. Численные результаты нивелирования приведены в табл. 7 и 8, а в графическом виде на Рис.28 и Рис.29.

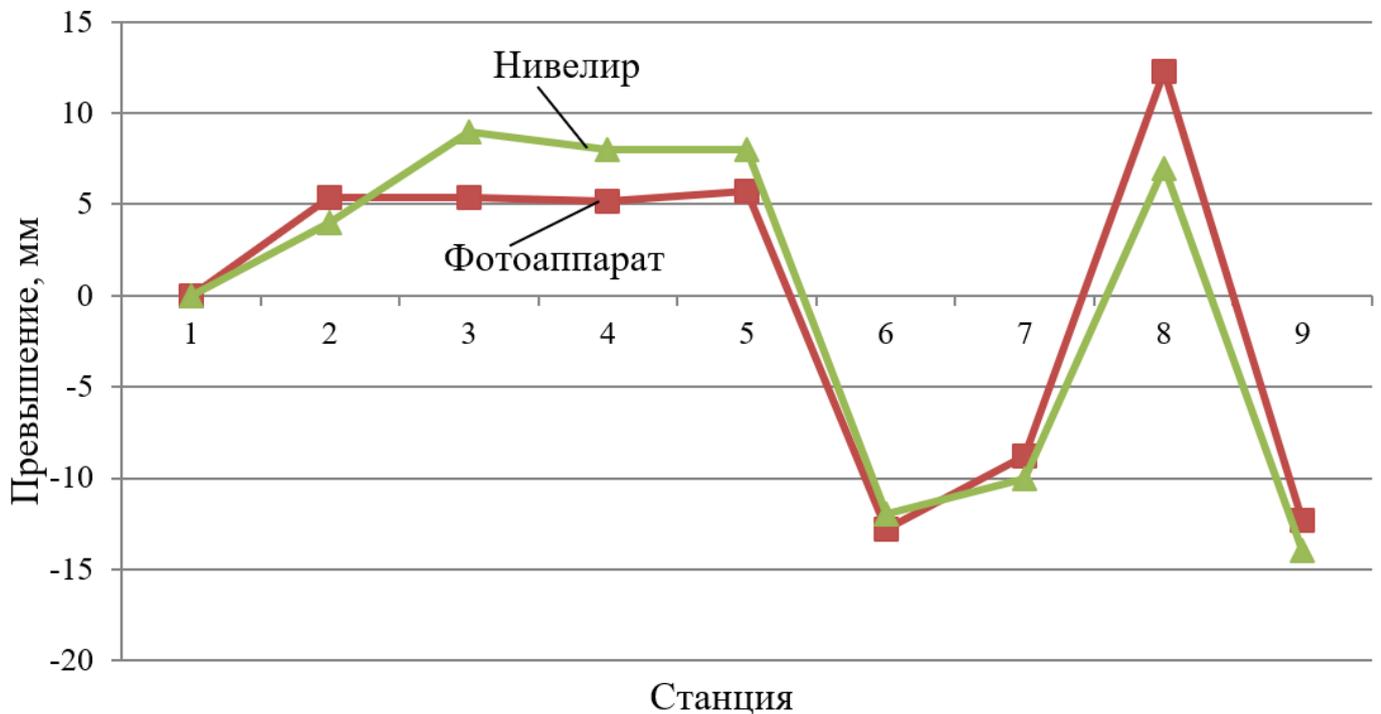


Рис.28. Продольный профиль правой линии

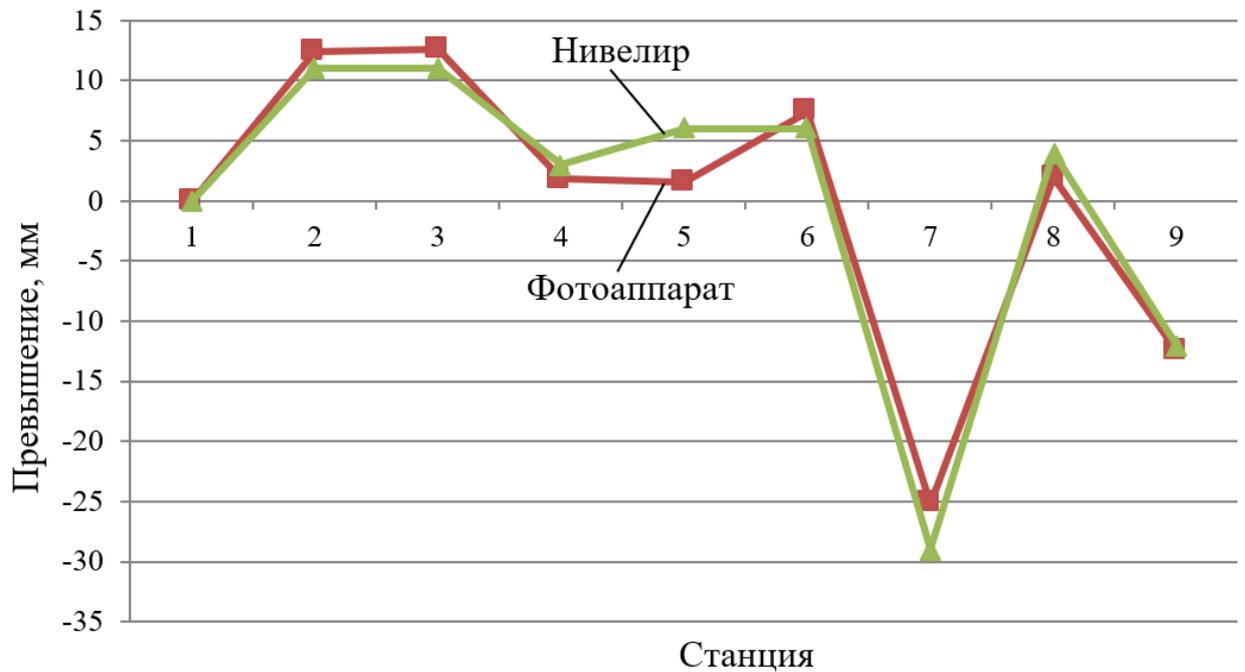


Рис.29. Продольный профиль левой линии

Как видно из табл. 7 и 8, а также Рис.28 и Рис.29, корреляция результатов, полученных обоими методами, является высокой, что позволяет судить о высокой степени надежности и достоверности использования фотограмметрического метода для измерения планово-высотного положения путей мостового крана.

Фотограмметрический метод также может использоваться для определения прямолинейности рельсовых путей (Рис.30). Для этого необходимо использовать, результаты измерений горизонтального базиса  $b_{Г}$ . Последовательность проведения замеров полностью соответствует последовательности, описанной выше при контроле линии по высоте, за тем исключением, что вместо вертикального базиса используется горизонтальный базис последовательно устанавливаемый в контрольных точках на высоте установки фотокамеры.

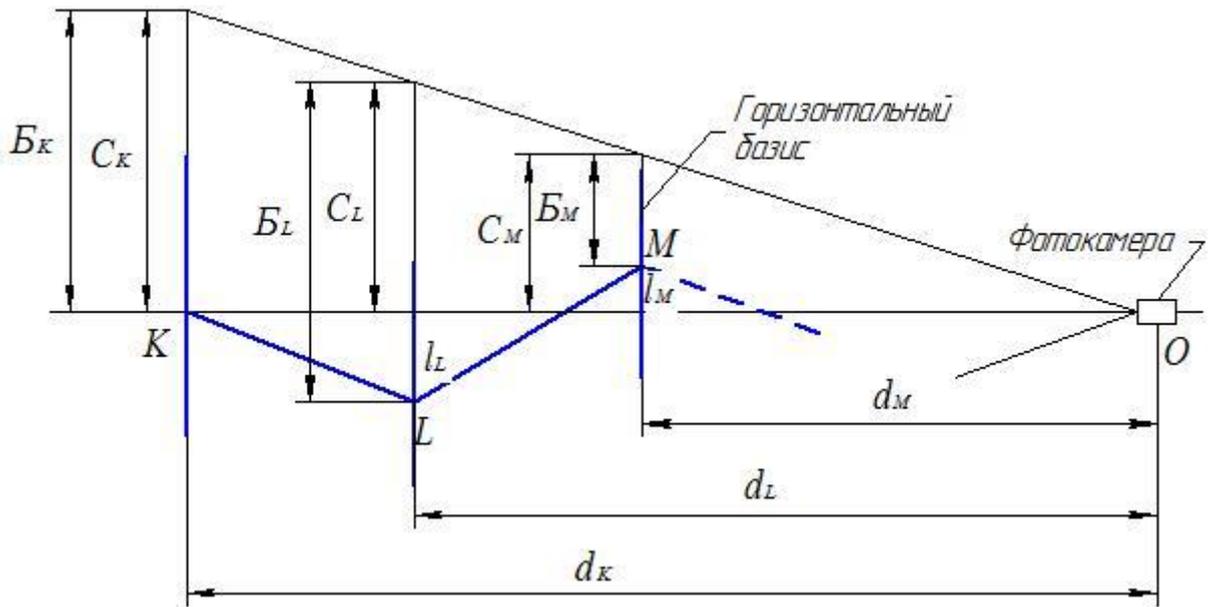


Рис.30. Схема определения прямолинейности фотограмметрическим методом

Аналогичным образом замеряются растровые координаты обоих концов базиса  $L_{K,L,M...}$  и  $\Pi_{K,L,M...}$ . Последовательно вычисляются растровые длины базиса  $\Delta_{K,L,M...} = \Pi_{K,L,M...} - L_{K,L,M...}$ . По этим величинам определяется цена пиксела  $\delta_{K,L,M...} = b_r / \Delta_{K,L,M...}$  соответствующий текущему расстоянию  $d$  от фотокамеры до базиса. Кроме того, вычисляются величины  $C_K = B_K = (\Pi_K + L_K) / 2$ ,  $B_L = (\Pi_L + L_L) / 2$ ,  $B_M = (\Pi_M + L_M) / 2, \dots$  и  $d_K, d_L, d_M, \dots$

Величина  $C_L = d_L C_K / d_K$  (см. Рис.30), что следует из подобия треугольников с основаниями  $C_K$  и  $C_L$ , следовательно  $l_L$  в точке  $L$  вычисляется как разность  $l_L = B_L - C_L$  или в линейной измерении

$$l_L = \delta_L (\Pi_L + L_L) / 2 - \delta_K d_L (\Pi_K + L_K) / 2 d_K. \quad (12)$$

Аналогично величина  $l_M$  в точке  $M$ , которая в соответствии с Рис.30 отрицательна, равна

$$l_M = \delta_M (\Pi_M + L_M) / 2 - \delta_K d_M (\Pi_K + L_K) / 2 d_K, \quad (13)$$

Для имитации этого процесса был выполнен контроль прямолинейности одной из полос в коридоре пятого корпуса ННГАСУ через 5-метровый интервал. Результаты измерений и обработки снимков в программе Adobe Photoshop CS6 иллюстрируются графиком на Рис.31.

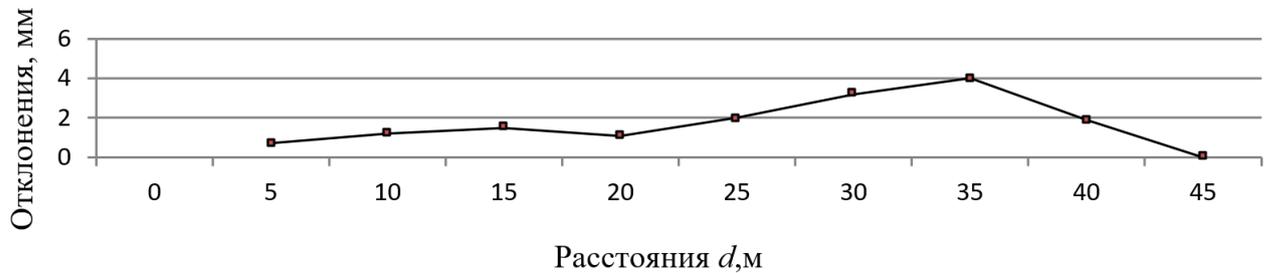


Рис.31. Результаты измерения прямолинейности

Также данный метод можно использовать для реализации варианта метода створных измерений прямолинейности, который основан на использовании горизонтальных референтных линий. Для этого контрольные точки створа фотографируются путем размещения оптическую ось камеры вдоль него. В этом случае линию створа можно использовать в качестве референтной линии, от которой измерять отклонения контрольных точек, используя растровый редактор.

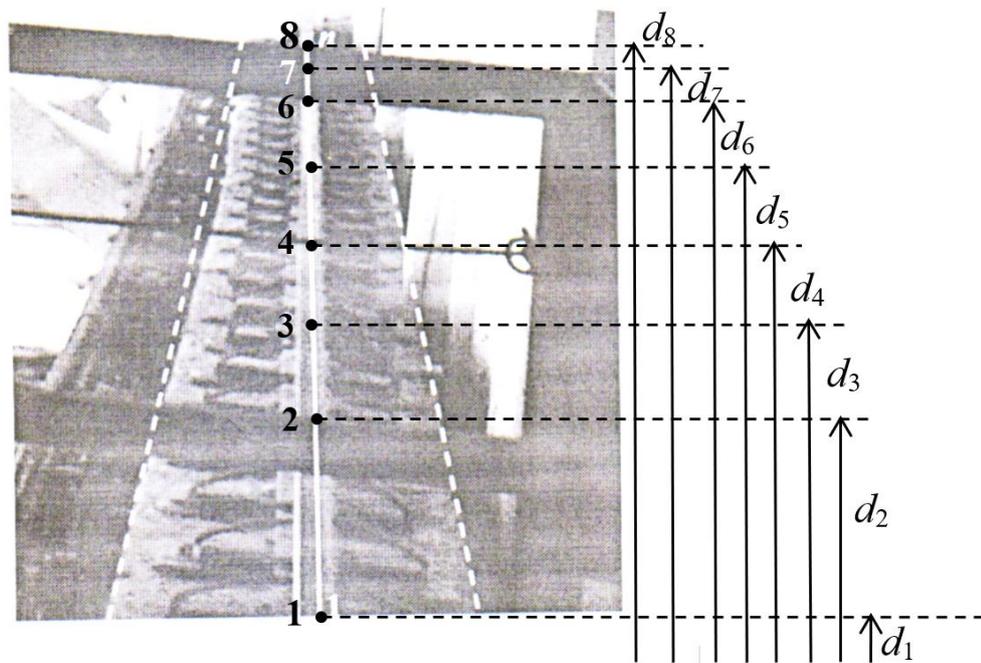


Рис.32. Фотография рельса со схемой измерения

Для измерения отклонения рельса от референтной линии 1-8 в точках 2...7 фотокамера устанавливается в точке 1 (Рис.32) и фотографирует рельс по направлению в точку 8. Минусом данного варианта является необходимость фотографирования большого числа точек с базисом. Однако в работе [101] показано, каким образом можно избавиться от этого минуса.

#### 2.1.4. Измерение расстояний и прямолинейности протяженных объектов фотограмметрическим методом

Калибровка фотокамеры по горизонтальному и вертикальному базисам описаны в разделе 2.1.2. Было выполнено 30 фотографий «креста» через 1 м в интервале 2 – 30 м горизонтальной линии. На снимках были замерены растровые координаты концов вертикальной рейки и её середине  $p_H$ ,  $p_C$  и  $p_B$ . Результаты см. Табл.9 (графы 2- 4), где величины  $A$  определяются как

$$A = dp, \quad (14)$$

Т а б л и ц а 9

#### Результаты измерения снимков и их обработки

Расстояния $d$ , м	Растровые координаты $p$ , пкс			Значения $A$ , мхпкс			Цена пиксела $\delta$ , мм/пкс
	$p_H$	$p_C$	$p_B$	$A_H$	$A_C$	$A_B$	
1	2	3	4	5	6	7	8
2	3344	1871	388	6688	3743	776	0,51
3	2839	1858	870	8517	5574	2610	0,77
4	2581	1850	1116	10324	7400	4464	1,03
5	2433	1849	1260	12165	9245	6300	1,29
6	2329	1844	1358	13974	11064	8148	1,55
7	2260	1844	1426	15820	12908	9982	1,81
8	2207	1845	1478	17656	14760	11824	2,07
9	2163	1840	1518	19467	16560	13662	2,33
10	2131	1842	1551	21310	18420	15510	2,59
11	2106	1841	1576	23166	20251	17336	2,86
12	2080	1839	1599	24960	22068	19188	3,12
13	2059	1837	1614	26767	23881	20982	3,38
14	2044	1837	1633	28616	25718	22862	3,64
15	2030	1836	1644	30450	27540	24660	3,90
16	2015	1834	1653	32240	29344	26448	4,16
17	2008	1836	1666	34136	31212	28322	4,42
18	1999	1837	1677	35982	33066	30186	4,69

19	1991	1836	1686	37829	34884	32034	4,95
20	1979	1834	1691	39580	36680	33820	5,21
21	1972	1834	1697	41412	38514	35637	5,47
22	1964	1831	1702	43208	40282	37444	5,73
23	1960	1834	1709	45080	42182	39307	5,99
24	1955	1834	1714	46920	44016	41136	6,25
25	1951	1831	1718	48775	45775	42950	6,51
26	1942	1829	1719	50492	47554	44694	6,77
27	1939	1832	1725	52353	49464	46575	7,04
28	1935	1830	1727	54180	51240	48356	7,30
29	1931	1832	1734	55999	53128	50286	7,56
30	1930	1834	1738	57900	55020	52140	7,81

На основании данных Табл.9 построены графики зависимости расстояний  $d$  от  $p$  при высоте расположения камеры 0,75 м, равной половине базиса (Рис.33). Графики позволяют выявить возможных грубых ошибок в отсчётах  $p_H$ ,  $p_C$ ,  $p_V$  и определения графически или аналитически расстояния  $d_i$  в зависимости от количества пикселей  $p_i$  по Рис.12.

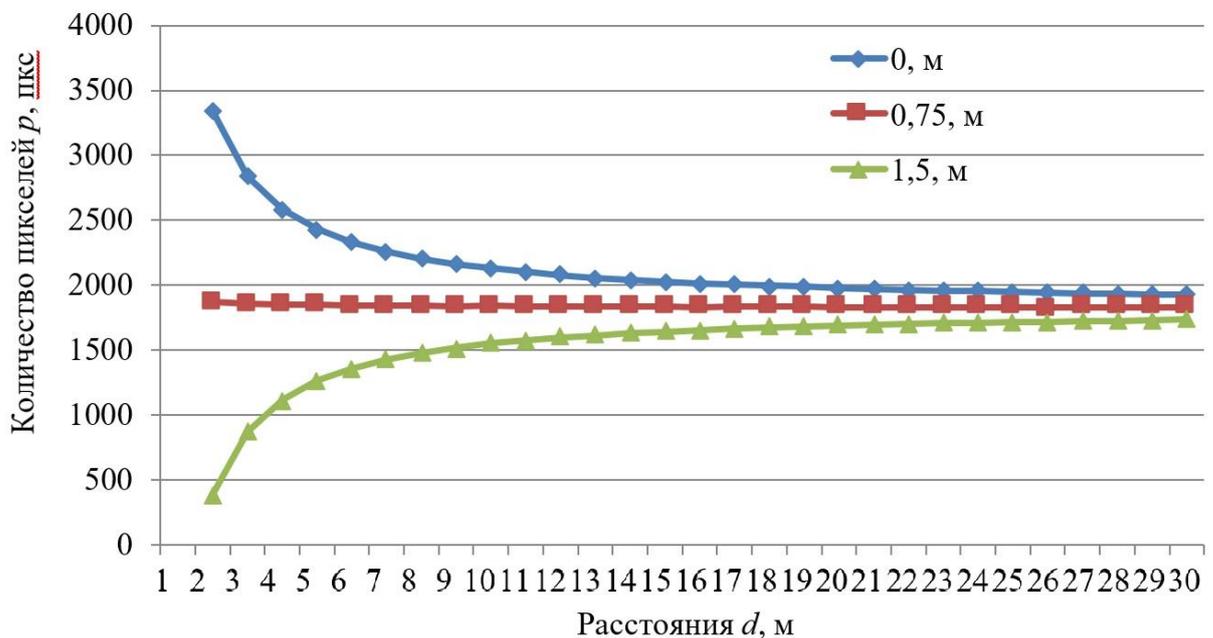


Рис.33. Графики зависимости расстояния  $d$  от  $p$  и высоты расположения камеры 0,75 м

Однако более рациональный и точный бесконтактный метод определения расстояний заключается в следующем.

Вычисленные величины  $A$  линейно зависят от расстояния  $d$ . Эта закономерность справедлива для любой высоты базиса, что продемонстрировано на Рис.34.

Поскольку зависимость  $A$  от  $d$  линейна, то на практике можно ограничиться тщательным определением  $A_H$  и  $A_K$  всего по двум фотографиям базиса в начале и в конце контролируемого участка, а любой размер коэффициента  $A_i$  может быть найден по формуле

$$A_i = A_H + \frac{(d_i - d_H)(A_K - A_H)}{(d_K - d_H)}, \quad (15)$$

где  $A_i$ ,  $A_H$  и  $A_K$  – коэффициент  $A$  соответственно на расстояниях  $d_i$ ,  $d_H$  и  $d_K$ .

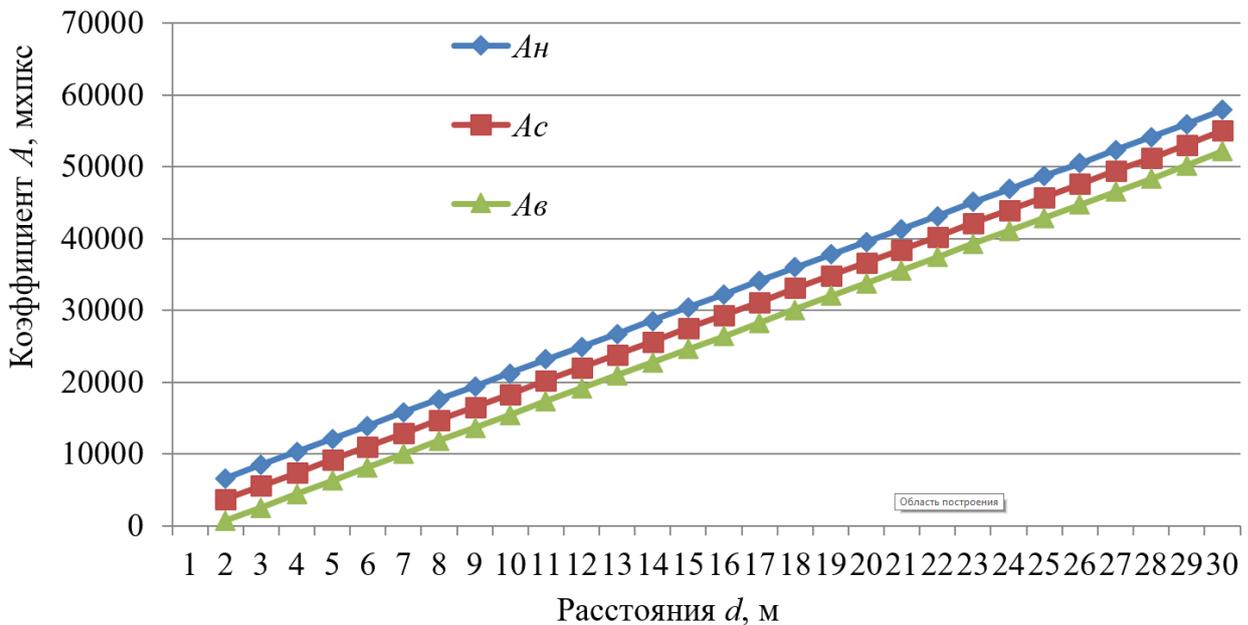


Рис.34. Графики зависимости коэффициента  $A$  от расстояния  $d$  и высоты расположения камеры 0,75 м

В частном случае, когда фотокамера расположена в начальной точке линии, то есть  $d_H = 0$  м, формула (15) упрощается и принимает вид

$$A_i = \frac{d_i}{d_K} A_K, \quad (16)$$

Задаваясь любым расстоянием  $d_i$ , можно вычислить по формулам либо (15), либо (16) коэффициент  $A_i$ , поделив который на это расстояние, можно

найти соответствующую ему величину  $p_i$ , по которой можно найти положение заданной точки на снимке.

С целью определения точности данного варианта метода были вычислены по соотношению (15) теоретические значения  $A_T$  и теоретические значения  $p_T = A_T/d$ , соответствующие каждому расстоянию  $d$ . Были найдены разности  $(p_\phi - p_T)$ , которые с учетом цены пиксела  $\delta$  использованы для определения ошибки замеров расстояния, которые не превысили  $\pm 19$  мм.

Для перевода полученных результатов в метрическую систему единиц (мм) использовались  $\Delta_{\text{пкс}}$ , с учетом  $\delta_{\text{мм/пкс}}$  (графа 8 Табл.9), которые вычислялись по (2).

Величины  $\delta_H$  и  $\delta_K$ , входящие в формулу (2), вычислялись путем деления известной (в мм) длины отрезка на снимке на соответствующую цену пиксела. В данном случае в качестве такого отрезка выступала длина вертикальной рейки 1500 мм, которой соответствовало  $3344 - 388 = 2956$  и  $1930 - 1738 = 192$  пкс соответственно на расстоянии 2 и 30 м. Тогда цена пиксела  $\delta_H = 1500/2956 = 0,51$  мм/пкс и  $\delta_K = 1500/192 = 7,81$  мм/пкс.

Ошибки определения расстояния представлены на Рис.35. Для расстояний, которые определялись по нижнему концу рейки, случайные ошибки  $\Delta_{\text{мм}}$  находятся в пределах  $-12 + 24$  мм, а для расстояний, которые определялись по верху рейки,  $\Delta_{\text{мм}}$  составили  $-19 + 30$  мм.

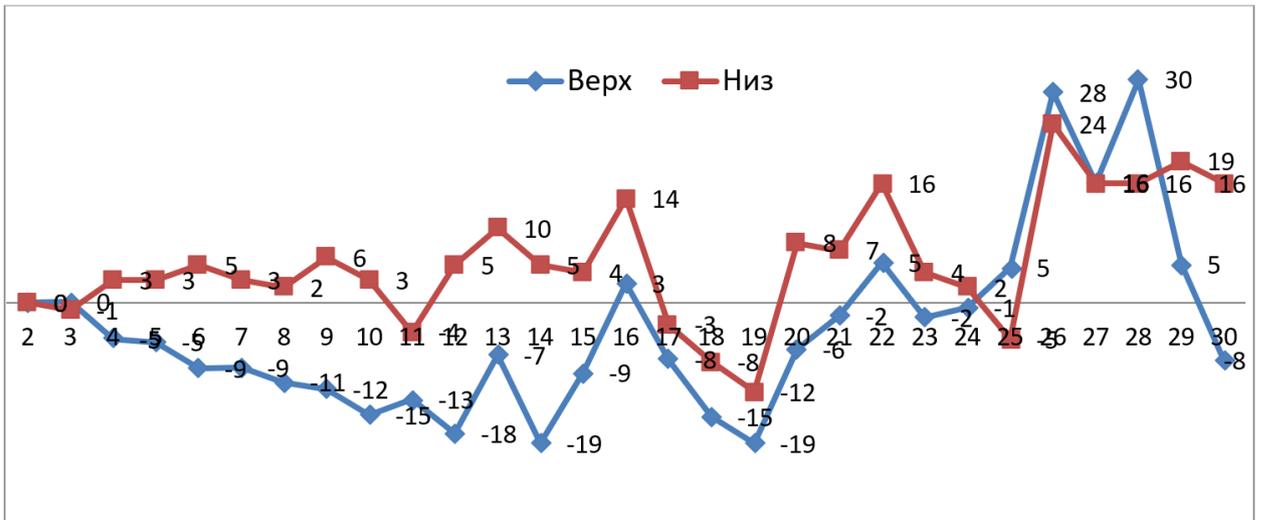


Рис.35. Случайные ошибки  $\Delta$  определения расстояний (мм)

Полученные данные говорят о том, что для исключения ошибок, вызванных неперпендикулярностью рейки, измерения  $p_{\text{нач}}$  и  $p_{\text{кон}}$  следует производить по её нижнему концу.

Данный алгоритм может быть использован для определения расстояния до заданной точки линии на снимке. Для этого, обозначив в формуле (15)  $A_i = d_i p_i$  и  $(A_{\text{к}} - A_{\text{н}})/(d_{\text{к}} - d_{\text{н}}) = k$ , получим формулу

$$d_i = \frac{A_{\text{н}} - d_{\text{н}}k}{p_i - k}. \quad (17)$$

Рассмотрим пример определения расстояний до точек съёмки при контроле прямолинейности рельса мостового крана (Рис.32) на участке длиной 12 м. Фотокамера устанавливалась над рельсом в начале контролируемого участка на некотором расстоянии от точки 1. Рельс фотографировался по направлению на его конечную точку 8 так, чтобы его изображение располагалось в центральной части снимка. Если фотокамера будет располагаться на расстоянии 1, 2 или 3 м от точки 1, то  $d_{\text{н}}$  и  $d_{\text{к}}$  будут соответственно равны 1, 2, 3 м и 13, 14, 15 м. В Табл.10 приведены результаты измерений и обработки данных.

**Результаты измерения снимка и его обработки  
при  $d_H = 1, 2$  и  $3$  м**

Точ- ки	$p_i$ , пкс	Коэффициент $k$ , пкс при $d_H$ $= 1/2/3$ м	Расстояния $d_i$ , м при различных $d_H$			Расстояния $(d_{i+1} - d_i)$ , м при различных $d_H$		
			1м	2м	3м	1м	2м	3м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	495	40/5/-30	1	2	3	0,449	0,808	1,102
2	354	40/5/-30	1,449	2,808	4,102	0,364	0,619	0,805
3	291	40/5/-30	1,813	3,427	4,907	0,569	0,910	1,128
4	231	40/5/-30	2,382	4,336	6,034	1,145	1,639	1,880
5	169	40/5/-30	3,527	5,976	7,915	1,703	2,057	2,117
6	127	40/5/-30	5,230	8,033	10,032	1,879	1,866	1,722
7	104	40/5/-30	7,109	9,899	11,754	5,891	4,101	3,246
8	75	40/5/-30	13	14	15	$\Sigma = 12$	$\Sigma = 12$	$\Sigma = 12$

По вычисленным расстояниям от фотоаппарата до точек 1, 2, ..., 8 (графы 4, 5, 6 Табл.10) были найдены расстояния 1-2, 2-3, ..., 7-8 между этими точками (графы 7, 8, 9). Контролем таких вычислений является равенство суммы расстояний между точками длине рассматриваемого участка 12 м.

Таким образом, разработанный вариант фотограмметрического метода позволяет решать различные задачи. Во-первых, можно по заданному расстоянию до точки на протяжённом объекте найти её положение на снимке. Во-вторых, можно определить расстояние до любой точки такого объекта на снимке или определить расстояние между любыми его точками. Для этого достаточно знать длину объекта и расстояние от фотоаппарата до начальной точки этого объекта.

В случае протяженного створа 1- $n$  его разбивают на примерно равные части. Фотографирование производится так, чтобы последняя измеряемая точка на снимке предыдущего частного створа являлась начальной точкой для последующего створа. При этом оптическая ось фотокамеры при съёмке всякий раз ориентируется на последнюю точку  $n$  общего створа.

Прямолинейность рельса измеряется с помощью описанного варианта (Рис.32) следующим образом. На фотоснимке строится референтная линия 1-

8 по центральным точкам рельса 1 и 8. Затем на фотографии замеряются растровые координаты последовательно левого края рельса, в точках 1, 2, 3,... референтной линии и правого края рельса Л, О и П. В Табл.11 представлены результаты подобных измерений и вычислений.

Т а б л и ц а 11

**Результаты определения непрямолинейности фотограмметрическим методом**

Точки	Растровые координаты, пкс			$\Delta$ , пкс	$l$ , пкс	$\delta$ , мм/пкс	$\Delta$ , мм
	Л	О	П				
1	2	3	4	5	6	7	8
1	820	846	872	0	52	1,923	0
2	827	844	862	-0,5	35	2,857	-1,4
3	830	842	857	-1,5	27	3,704	-5,6
4	829	840	854	-1,5	25	4,000	-6,0
5	830	838	852	-3	22	4,545	-13,6
6	827	836	846	-0,5	19	5,263	-2,6
8	825	834	843	0	18	5,556	0

Отклонения  $\Delta$  (графа 5) оси рельса от референтной линии вычисляются с использованием граф 2, 3, 4 Табл.11

$$\Delta = O - (L + P)/2, \quad (18)$$

знак плюс означает отклонение влево, знак минус – вправо.

Для перевода подсчитанных по формуле (18) результатов  $\Delta$  в метрическую систему единиц (графа 8) необходимо их значения умножить на соответствующую величину  $\delta$  (графа 7), который может быть найден по одной из изложенных выше методик или по формуле

$$\delta = \frac{l_{\text{мм}}}{l_{\text{пкс}}}. \quad (19)$$

где  $l_{\text{мм}} = 100$  мм – ширина головки рельса в мм;  $l_{\text{пкс}} = P - L$  – ширина головки рельса в пкс (графа 6).

По данным Табл.11 построен график (Рис.36), иллюстрирующий отклонения оси рельса от референтной линии.

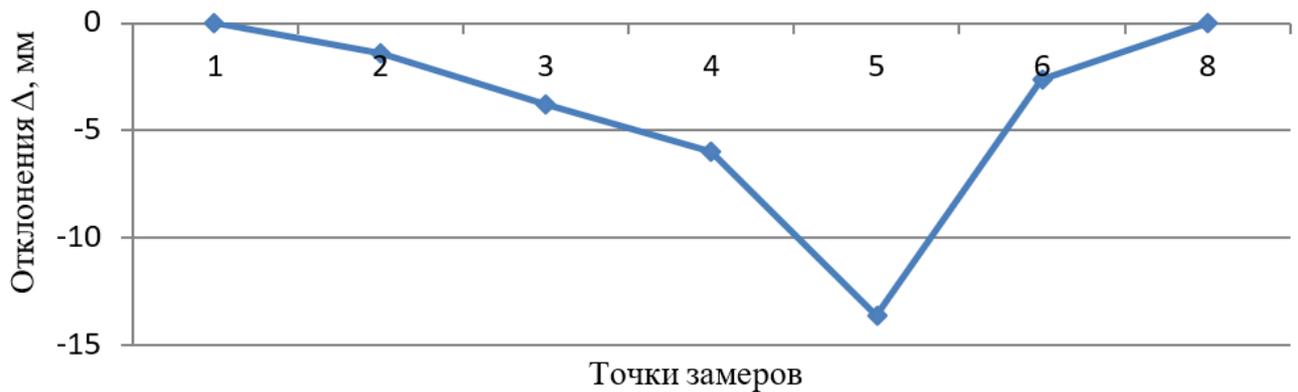


Рис.36. График отклонений оси рельса от референтной линии 1-8

Описанный вариант метода позволяет сразу визуально определять участки, где имеет место как искривление рельса, так и подкрановой балки (см. Рис.32). Следует учитывать, что чем выше расположена фотокамера над рельсом, тем нагляднее получаемая фотография, но тем больше цена одного пиксела в мм.

## 2.2. Методы определения ширины колеи подкрановых путей

Традиционно контроль эксплуатируемых надземных подкрановых путей сопровождается наличием высокой степени опасности в силу большой высоты расположения объекта измерений и близость токопроводящих линий. Ширина колеи является одним из наиболее ответственных параметров, так как её сужение или уширение может препятствовать свободному прохождению крана по рельсовому пути, способствовать преждевременному износу реборд ходовых колёс и боковых граней рельсов и быть причиной аварии в результате схода крана с рельсов.

В работе [90] описана классификация методов и подходов определения ширины колеи, которая не ограничивается только известными методами, а предполагает существование других, пока не разработанных (Рис.37).

Все методы замеров ширины колеи подразделяются на две основные группы (см. [90]): непосредственные и косвенные. В первую группу следует отнести «прямые» методы, которые позволяют получить измеряемую величину непосредственным путем. Вторая группа измерений обычно

используется, когда прямым путем величину измерить невозможно. В этом случае измеряется величина, которая находится в непосредственной зависимости от искомой величины. Искомая величина при этом является вычисляемой от измеренной.



Рис.37. Классификация методов определения ширины колеи

### 2.2.1. Методы непосредственного определения ширины колеи

**Контактный метод** предполагает непосредственные измерения ширины колеи измерительным инструментом типа обычной рулетки, проволоки, ленты со шкалой и пр. В настоящее время часто для этих целей используется лазерная рулетка, применение которой описано в работе [156].

Данный метод обладает наибольшей простотой, однако не во всех случаях реализуем. Например, в случае если ширина колеи превышает измерительную базу прибора, либо подкрановые пути недоступны для измерений, в этих, и многих других случаях, этот метод неприменим.

Для реализации **механического метода** требуется создание специальных приспособлений или устройств, которые подробно описаны в

[142]. Однако большинство из них на практике применяются достаточно редко в силу своей сложности.

Одним из необходимости выхода персонала на подкрановый путь для проведения работ является главным и основным недостатком контактных и механических методов. По этой причине наиболее предпочтительным является использование метода «дистанционных» измерений. Этот метод, предполагает проведение измерений непосредственно с крана с помощью ЛЗУ (лазерно-зеркального устройства) (ЛЗУ) [89]. В настоящее время этот метод довольно часто используется для измерений ширины колеи и других недоступных или труднодоступных объектов.

### **2.2.2. Косвенные методы определения ширины колеи**

Известные косвенные методы определения ширины колеи основаны на линейно-угловых построениях, позволяющих на определенных этапах замерять плановые координаты осевых точек рельсов.

**Базисный метод** из косвенных считается самым наиболее часто используемым. Существуют две его разновидности - одно и двух базисный методы. Двух базисный еще часто называется «методом четырёхугольника». (см. работы [142, 156]).

**Координатный метод** основан на измерениях электронным тахеометром 2D и 3D координат точек рельсов, лежащих на их осях. При измерениях 3D координат достигается полная картина состояния кранового пути. [142, 156].

**Линейно-угловой метод** использует электронный тахеометр *SET530R/R3* (путем задействования функций SDh и ОНР). Достоинство метода заключается в возможности отдельного измерения всех геометрических показателей осевых точек рельсов со стационарной точки установки прибор, что позволяет решать все задачи определения качества рельсовых путей.

Современные цифровые фотокамеры а также компьютерные технологии позволяют кардинально изменить технологию контроля планово-высотного положения путей мостового крана.

При относительно небольшой ширине колеи предлагается использование варианта **фотограмметрического метода**, схема применения которого поясняется на Рис.38 и подробно описана в [90]. В этом методе используются два крана, работающий и неработающий. На первом закрепляются две марки 1 и 2, между которыми длина  $S$  измеряется и считается базисом. На втором устанавливается фотокамера. Кран с базисом перемещается до створа двух колонн в пролёте. В этом же створе устанавливают на рельсы две марки 3 и 4. Кран фотографируется со всеми четырьмя марками. Фото базиса служит для масштабирования снимка с целью получения результатов измерения на нём в метрической системе.

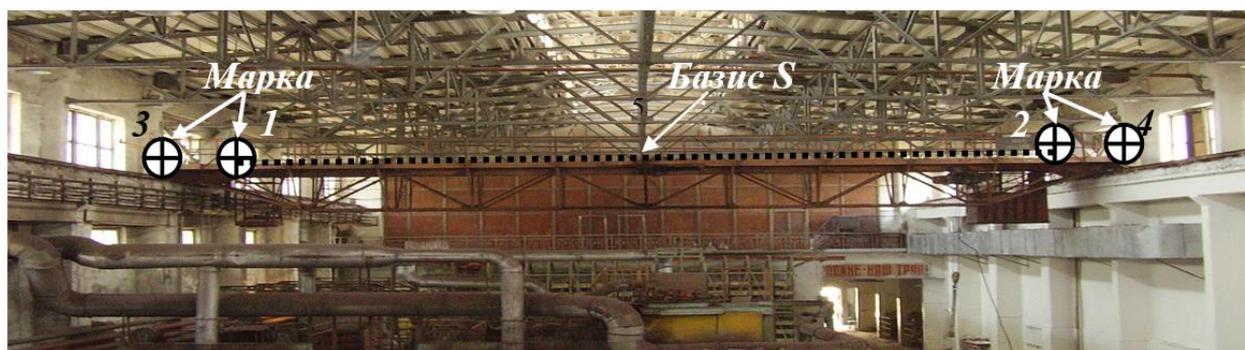


Рис.38. Схема определения ширины колеи мостового крана фотограмметрическим методом

Сначала на фотоснимке в растровом редакторе определяется длина базиса 1-2 в пикселах  $S_{\Pi}$  и расстояние между марками 3-4  $l_{\Pi}$  также в пикселах. Далее вычисляются ширина колеи  $L$  по формуле:

$$L = \frac{S}{S_{\Pi}} l_{\Pi}, \quad (20)$$

где  $S/S_{\Pi}$  – размер одного пиксела, мм/пкс.

Действия становятся неприменимыми в случае, когда кран с марками невозможно целиком разместить на снимке.

С целью проверки работоспособности фотограмметрического метода было выполнено моделирование процесса определения ширины колеи рельсовых путей мостового крана. Пути моделировались двумя параллельными полосами в коридоре учебного корпуса ННГАСУ (Рис.39). Фотографирование осуществлялось аппаратом *Nikon D3100* с фиксированным фокусным расстоянием 55 мм [111].

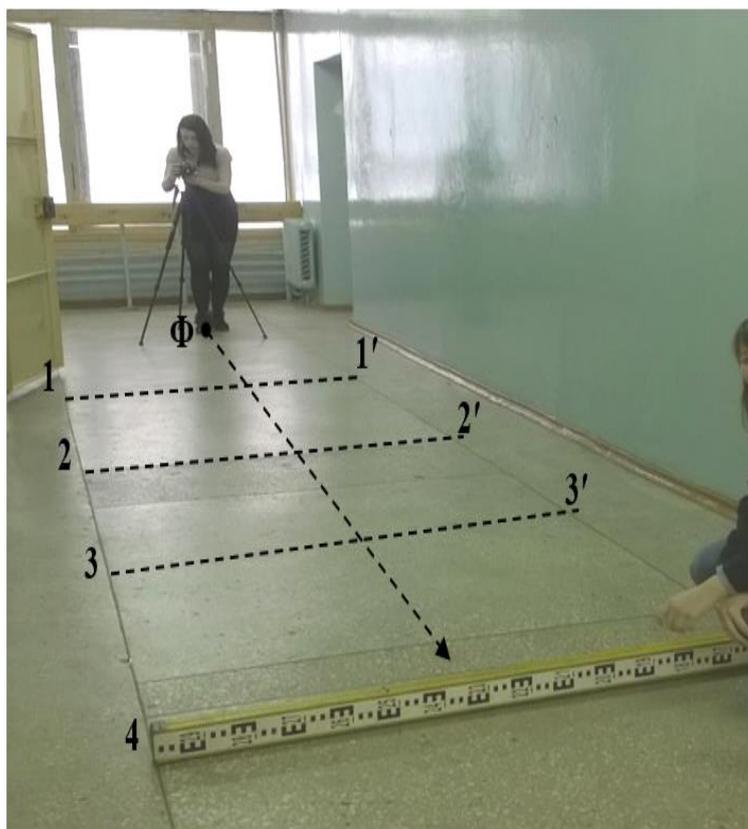


Рис.39. Схема применения метода обработки фотоизображений для определения ширины колеи

При фотографировании рейка длиной 1,5 м последовательно располагалась в пролётах модели 1-1', 2-2', ..., 14-14' на расстояниях  $d_1, d_2, \dots, d_{14}$  от точки  $\Phi$ . Реальная ширина пролётов  $L_{\text{ист}}$  и расстояния  $d_{\text{ист}}$  измерялись лазерной рулеткой HD150.

В данном случае полученные снимки обрабатывались в среде системы ArchiCAD 18, в которой определялись растровые значения ширины пролётов и рейки длиной  $b_{1,2,3} = 1,5; 1,0; 0,5$  м.

Замеры пролетов с их реальными значениями позволили вычислить их СКО фотограмметрическим методом, которые составили от  $-3$  до  $+3$  мм для рейки 1,5 м, от  $-3$  до  $+4$  мм для рейки 1,0 м и от  $-5$  до  $+5$  мм для рейки 0,5 м. На основании этого можно заключить, что, во-первых, этот метод обладает требуемой точностью, и, во-вторых, подтверждено предположение о том, что с увеличением базиса  $b$  точность увеличивается.

Совмещение рассмотренных выше операций по определению ширины колеи и прямолинейности подкрановых рельсов, совместно с нивелированием подкранового пути может повысить производительность данного метода. Схема совмещения поясняется на Рис.40 и заключается в следующем.



Рис.40. Мостовой кран с марками 1, 2 и горизонтальными и вертикальными базисами

Измеряется расстояние  $S$  между двумя марками 1 и 2, установленными на кране. Схема проведения замеров здесь аналогична вышеописанной за тем исключением, что вместо горизонтального базиса  $S$  на работающем кране устанавливается два базиса известной длины  $b_v$  и  $b_g$ , горизонтальные и вертикальные, скрепленные между собой взаимно перпендикулярно. Кран перемещают в конец цеха, до створа двух колонн в пролёте, где на рельсы устанавливаются еще четыре аналогичным базиса.

Фотосъемка производится двумя фотокамерами, установленными на левый и правый рельсы в начальной точке путей, и отцентрированными по ним. Предварительно перед съемкой фиксируется оптическая ось каждой фотокамеры, которая направляется вдоль рельса на вертикальный базис по «высоте инструмента». Фотосъемка базисов осуществляется с неподвижной точки при последовательном перемещении крана совместно с переустановкой базисов в створе других колонн.

Снимки с помощью любого редактора растровых изображений используются для подсчета растровых длин  $\Delta_v$  и  $\Delta_r$ , вертикальных и горизонтальных базисов. Кроме того, определяется растровое расстояние  $L$  и  $\Pi$  между вертикальными базисами и марками 1 и 2 и определяются растровая координата центра рельса.

Посредством величины  $\Delta_r$  вычисляется цена пиксела  $\delta_r = b_r/\Delta_r$ , которая используется для вычисления линейной координаты рельса по ее растровому значению. Отклонение оси рельса от прямой линии вычисляется посредством разности координат каждой точки отсчета с координатами начальной точки.

Величины  $\Delta_r$  или  $\Delta_v$  используются также для определения расстояний между камерами и базисами, как было показано выше.

Ширины колеи  $L$  в метрических единицах вычисляется по формуле (21), где метрические величины  $L' = \delta_r L$  и  $\Pi' = \delta_r \Pi$

$$L = S + L' + \Pi'. \quad (21)$$

Описанная процедура использования варианта фотограмметрического метода продемонстрировала эффективность и достоверность его применения для проверки и мониторинга планово-высотного положения путей мостовых кранов.

### 2.2.3. Одновременное определение всех показателей подкрановых рельсов и траектории движения мостового крана фотограмметрическим методом

Традиционные методы наблюдения за геометрическими параметрами подкрановых путей, являясь контактными, связаны с многократным задействованием мостового крана, необходимостью выхода исполнителей на подкрановый путь и обозначения на рельсах точек съёмки. При этом требуется наличие специальных приспособлений и выполнение большого количества угловых, линейных или иных измерений, что в условиях действующих цехов сопряжено со значительными трудностями.

В работе [100] описан вариант фотограмметрического метода, позволяющего с одной точки установки фотокамеры и за один проход мостового крана определить одновременно непрямолинейность подкрановых рельсов контролируемого участка пути, ширину колеи любого размера и траекторию движения крана. При этом исключается необходимость выхода исполнителей на подкрановый путь, специальной маркировки на рельсах съёмочных точек и выполнения каких-либо угловых, линейных или иных измерений.

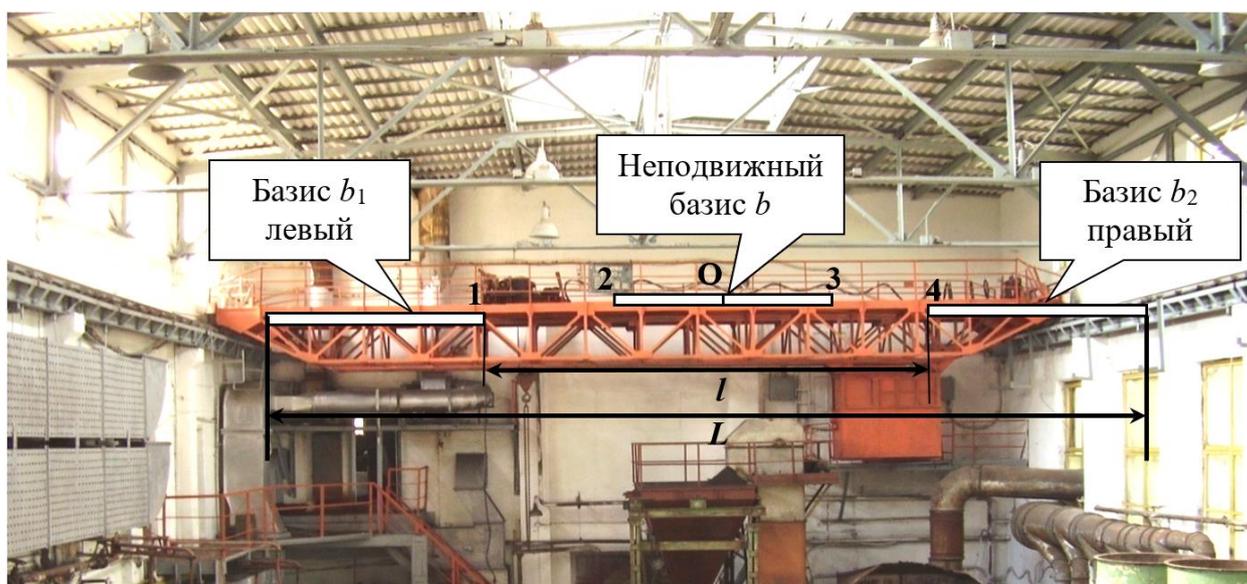


Рис.41. Мостовой кран с тремя горизонтальными базисами

Фотокамера в данной схеме измерения (Рис.41) может устанавливаться на любом кране, в том числе и неработающем в его середине. На работающем кране также в середине устанавливается неподвижный горизонтальный базис известной длины  $b$ . Кран перемещается до створа двух колонн в конце контролируемого участка. В этом же створе устанавливаются на рельсы два горизонтальных базиса  $b_1$  и  $b_2$ . Фотокамера направляется на центр  $O$  неподвижного базиса, и закрепляется. Фотографирование базисов осуществляется так, чтобы их изображения располагались в центральной части снимка. Дальнейшие измерения в створах других колонн производится без изменения направления фотокамеры

Измерения на снимках должны включать фиксацию растровых величин правого конца **1** базиса  $b_1$ , обоих концов **2, 3**, середины  $O$  базиса  $b$  и левого конца **4** базиса  $b_2$ , и  $p_1, p_l, O, p_{II}$  и  $p_2$  (Рис.41).

Далее вычисляются разности  $p = p_{II} - p_l$  базиса  $b$  и расстояние между концами базисов  $b_1$  и  $b_2$   $p_l = p_2 - p_1$ . Ширина колеи  $L$  между внутренними гранями рельсов равна

$$L = b_1 + l + b_2 = b_1 + p_l \frac{b}{p} + b_2, \quad (22)$$

где  $b/p$  – цена пиксела, а  $b_1, b$  и  $b_2$  могут быть одинаковыми.

Как следует из формулы (22), для реализации предлагаемого подхода достаточно иметь на снимке изображение базиса  $b$  и концов базисов  $b_1$  и  $b_2$ , что позволяет реализовывать его даже при малых расстояниях съёмки и большой ширине колеи. Что касается точности определения ширины колеи, то она в основном будет зависеть от точности  $m_p$  и  $m_{pl}$  измерения  $p$  и  $p_l$ .

В Табл. 12 приведен пример вычисления ширины колеи по фотографии на Рис.41 при одинаковой длине базисов  $b_1 = b = b_2$ , равных 1, 2 и 3 м.

В результате исследования формулы (22) с позиций теории ошибок при условии равенства  $m_p = m_{pl}$ , после соответствующих преобразований СКО определения ширины колеи

$$m_L = \frac{b}{p} m_p \sqrt{1 + \frac{p_l^2}{p^2}}. \quad (23)$$

Т а б л и ц а 12

**Пример вычисления ширины колеи**

Базисы, м	Отсчёты по курсору, пкс				Разность, пкс		l, мм	L, мм
	p <sub>1</sub>	p <sub>Л</sub>	p <sub>П</sub>	p <sub>2</sub>	p	p <sub>l</sub>		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	229	444	516	729	72	500	6944	8944
2	271	424	534	689	110	418	7600	11600
3	314	401	559	648	158	334	6342	12342

Поскольку размеры базисов ничем не лимитированы, то примем значение дроби под знаком радикала равным 1, тогда  $m_L = \frac{b}{p} m_p \sqrt{2}$ . В свою очередь  $m_p = m\sqrt{2}$ , где  $m$  – ошибка определения растровых координат, пкс. Теперь окончательно будем иметь

$$m_L = 2 \frac{b}{p} m = 2\delta m. \quad (24)$$

Таким образом, можно констатировать, что точность определения ширины колеи предлагаемым методом зависит только от  $\delta$  и точности  $m$ . В свою очередь цена пиксела зависит только от расстояния съёмки и теоретически не зависит от величины базиса.

Для определения степени влияния высоты расположения камеры над головкой рельса на цена пиксела было выполнено фотографирование цифровой фотокамерой *Nikon COOLPIX S9100* 30-метрового бордюра с высоты 1,0 и 1,5 м над ним.

В растровом редакторе на снимках были определены растровые координаты левого и правого краям бордюрного камня с интервалом 1 м. По разности этих координат и ширине бордюрного камня 120 мм были подсчитаны размеры цены пиксела  $\delta$  мм/пкс для каждого расстояния  $d$ . Полученные результаты продемонстрированы на Рис.42.

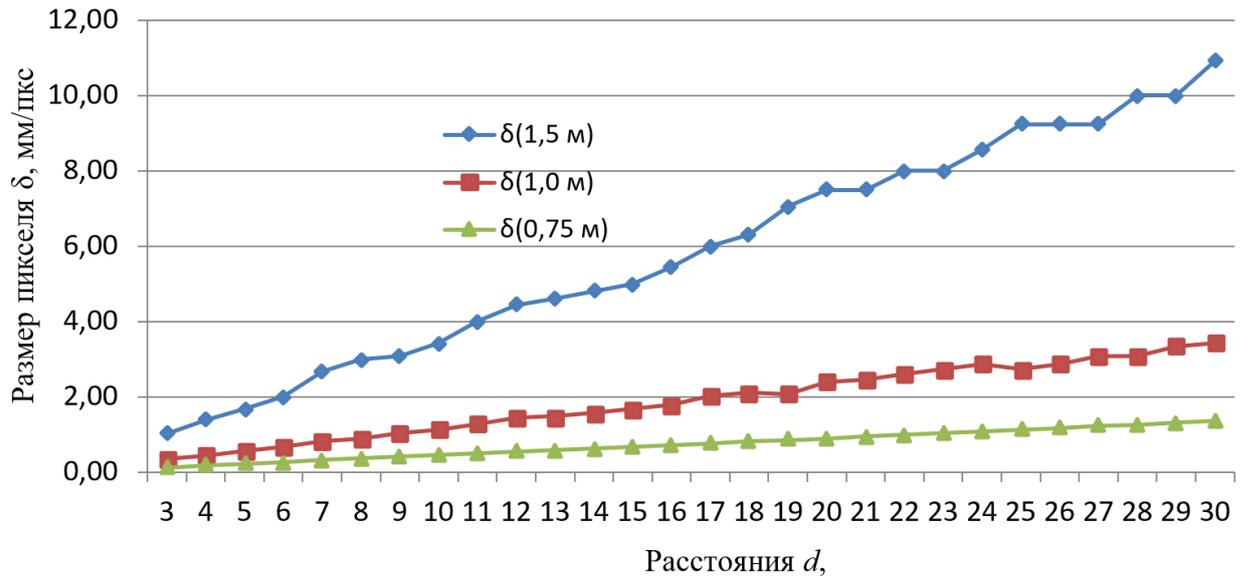


Рис.42. Зависимость цены пикселя  $\delta$  от расстояния  $d$  и высоты расположения фотокамеры

Величина  $\delta$  зависит от  $d$  линейно, причем, с уменьшением высоты фотографирования над объектом съёмки уменьшается и цена пикселя.

Опыт показал, что наиболее правильным является расположение фотокамеры и базисов на одном уровне. В этом случае цена пикселя не превысил 2 мм/пкс, в то время как для высоты 1,0 м и 1,5 м она составила соответственно 3,2 и 10,9 мм/пкс на расстоянии 30 м.

В качестве эксперимента фотограмметрический метод был использован для определения ширины колеи. В качестве модели выступала часть кафельной стены (Рис.43), при этом  $b_1 = 301$  мм,  $b = 301$  мм,  $b_2 = 301$  мм,  $l = 603$  мм,  $L = 1206$  мм.

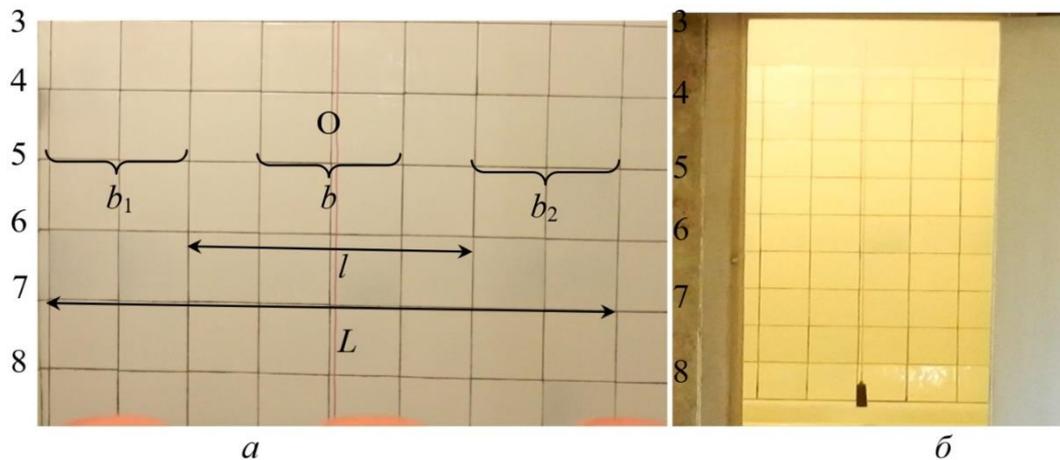


Рис.43. Фрагменты фотографий модели с расстояния 1 м ( $a$ ) и 6 м ( $b$ )

Фотографирование модели было выполнено с расстояний 1, 2, 3, 4, 5 и 6 м. Измерения снимков осуществлялись по линии 5-5, расположенной на одной высоте с фотокамерой. Результаты измерений и вычислений по формуле (22) см. в Табл.13.

С целью имитации траектории движения крана, фотокамера в процессе фотографирования располагалась примерно над линией 0-1-2-3-4-5-6 м. Это и неточное расположение нулевого деления **О** в центре снимков повлияло на погрешность полученных здесь и далее результатов. Поэтому расхождения экспериментального значения  $\Delta$  величины  $L$  (графа 9 Табл.13) с эталонной величиной 1206 мм колеблются в пределах от  $-2,9$  до  $+1,9$  мм (графа 10).

Т а б л и ц а 13

### Результаты определения ширины колеи по линии 5-5

$d$ , м	Растровые координаты, пкс				Разность, пкс		$l$ , мм	$L$ , мм	$\Delta$ , мм
	$p_1$	$p_L$	$p_{II}$	$p_2$	$p$	$p_l$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1630	1889	2403	2658	514	1028	602,0	1205,0	-1,0
2	1869	2030	2346	2504	316	635	604,9	1207,9	1,9
3	1986	2106	2346	2465	240	479	600,7	1203,7	-2,3
4	1972	2068	2256	2348	188	376	602,0	1205,0	-1,0
5	2013	2092	2248	2324	156	311	600,1	1203,1	-2,9
6	2039	2107	2239	2304	132	265	604,3	1207,3	1,3

С целью исследования влияния местоположения базисов на снимке выше или ниже его центральной части была сфотографирована та же модель с расстояния 0,9 м при горизонтальном расположении оптической оси фотокамеры. Полученный снимок был обработан в *Paint* по изложенной выше схеме. Результаты измерений и вычислений по линиям модели 1-1, 2-2,..., 8-8 представлены в Табл.14.

Из Табл. 14 (графа 10) видно, что расположение базисов на снимке выше или ниже его центральной части практически не оказывает влияния на точность определения ширины колеи. Аналогичный вывод относится и к размеру пиксела, вычисленного по каждой линии модели, что и иллюстрируется графиком на Рис.44.

### Результаты определения ширины колеи по линиям модели

Ли- нии	Растровые координаты, пкс				Разность, пкс		$l$ , мм	$L$ , мм	$\Delta$ , мм
	$p_1$	$p_L$	$p_{II}$	$p_2$	$p$	$p_l$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1546	1803	2322	2584	519	1038	602,0	1205,0	-1,0
2	1545	1801	2318	2579	517	1034	602,0	1205,0	-1,0
3	1542	1797	2313	2575	517	1033	601,4	1204,4	-0,4
4	1537	1793	2306	2567	513	1030	604,3	1207,3	1,3
5	1533	1789	2301	2561	512	1028	604,4	1207,4	1,4
6	1534	1788	2299	2557	511	1023	602,6	1205,6	-0,4
7	1531	1786	2296	2553	510	1022	603,2	1206,2	0,2
8	1533	1785	2293	2549	508	1016	602,0	1205,0	-1,0

Определения траектории движения мостового крана и непрямолинейности подкрановых рельсов обычными методами [64, 74, 172] требуют многократного задействования мостового крана и выхода персонала на подкрановый путь или основаны на применении лазерно-зеркального устройства в сочетании со створными измерениями с помощью теодолита [161]. Фотограмметрический метод позволяет значительно упростить решение этой задачи.

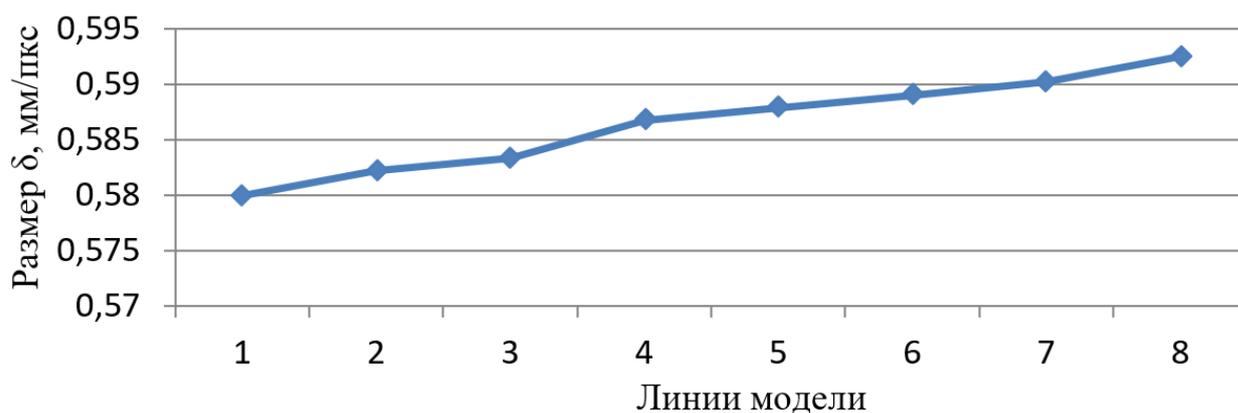


Рис.44. Зависимость цены пиксела  $\delta$  от местоположения линии модели

Для определения траектории движения крана примем за точку отсчета растровые координаты  $O$  базиса  $b$  (см. графу 2, Табл.15). В случае равенства этих величин кран передвигается по прямой линии. В противном случае имеет место криволинейная траектория его движения. Для её определения

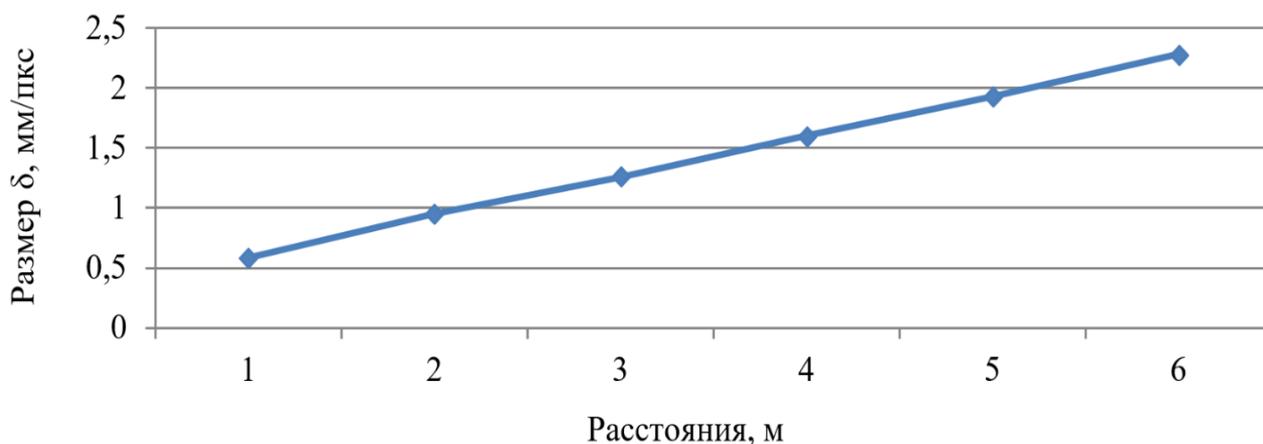
используется растровое отклонение  $\Delta_k$  крана от референтной прямой 0-1-2-3-4-5-6 как разность  $O_i - O_6$  (графа 3). Затем с учетом цены пиксела  $\delta$  вычисляется линейная величина этого отклонения  $\Delta_k$  в мм (графа 5)

Т а б л и ц а 15

### Определение траектории движения крана и непрямолинейности рельсов

d, м	O, пкс	$\Delta_k$ , пкс	$\delta$ , мм/пкс	$\Delta_k$ , мм	Расстояния				Отклонения, мм	
					пкс		мм			
					$O-p_1$	$p_2-O$	$O-p_1$	$p_2-O$	$\Delta_l$	$\Delta_p$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2146	-27	0,586	-16	516	512	302	300	-19	-14
2	2188	15	0,953	14	319	316	304	301	13	17
3	2226	53	1,254	(25)	240	239	301	300	62	67
4	2162	-11	1,601	-18	190	186	304	298	-19	-19
5	2170	-3	1,929	-6	157	154	303	297	-8	-7
6	2173	0	2,280	0	134	131	306	299	0	0

Проверка достоверности данного подхода производится по графику (см. Рис.45), иллюстрирующего прямолинейную зависимость цену пиксела  $\delta$  от расстояния фотографирования.

Рис.45. Зависимость цены пиксела  $\delta$  от расстояния

Путем ориентирования оптической оси фотокамеры вдоль оси рельсового пути существует возможность определять параметры траектории крана в мм. Для этого достаточно на каждом снимке, перемещая курсор вдоль базиса  $b$ , устанавливать его на исходный отсчёт  $O$  и читать по рейке отклонение  $\Delta_k$  непосредственно в линейных единицах.

Таким же образом определяется непрямолинейность подкрановых рельсов. Для этого достаточно найти растровые разности  $O - p_1$  и  $p_2 - O$  (графы 6 и 7 Табл.15), умножив которые на соответствующий величину  $\delta$ , возможно получение расстояния в мм от центра  $O$  до точек базиса  $b_1$  и  $b_2$  (графы 8 и 9). Разности  $(O - p_1)_i - 306$  и  $(p_2 - O)_i - 299$  в сумме с  $\Delta_k$  из графы 3 равны отклонениям  $\Delta_l$  и  $\Delta_p$  от референтной прямой 0-...-6 (графы 10 и 11).

Поскольку в нашем примере ширина колеи на всех снимках остаётся неизменной, то траектория движения мостового крана должна полностью совпадать с конфигурацией кранового пути (см. Рис.46).

Сравнение траектории движения крана с конфигурацией кранового пути позволит специалистам выявлять места возможных в дальнейшем сверхнормативных смещений рельсов в плане, влияющих на износ ходовых колес и выбирать проект рихтовки пути.

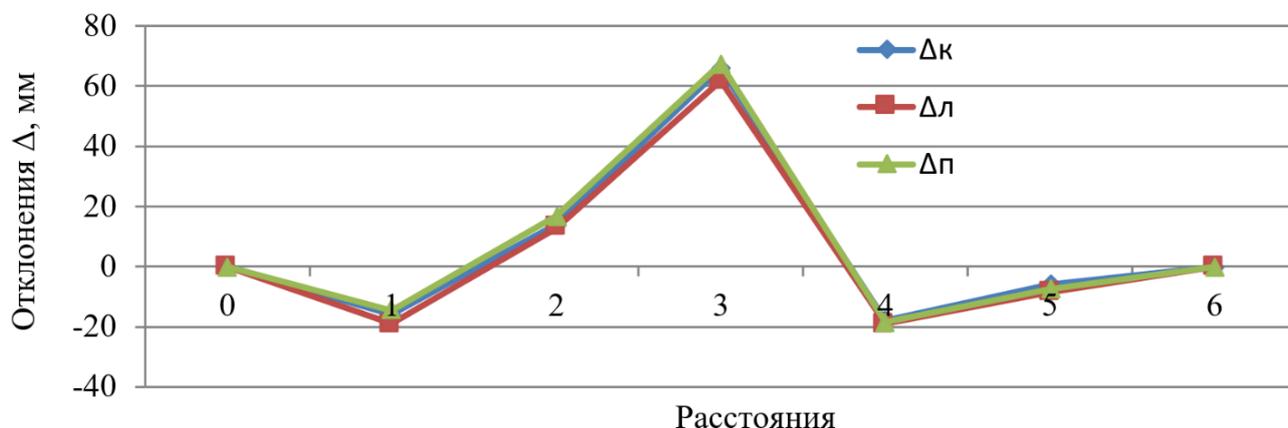


Рис.46. Графики непрямолинейности рельсов и траектории движения крана

Автоматизация данного метода может быть достигнута путём обеспечения непрерывного соприкосновения с рельсами горизонтальных базисов  $b_1$  и  $b_2$  при движении крана, а фотографирование производить в режиме непрерывной съёмки. В этом случае необходимые измерения можно производить в любом месте кранового пути. Кроме того, в качестве базиса  $b$  можно использовать измеренное расстояние между двумя хорошо видимыми на снимках деталями конструкции моста крана.

### 2.3. Выводы по 2 главе

Достоверность разработанной схемы калибровки цифровой фотокамеры по вертикальному базису с целью определения расстояний фотограмметрическим методом подтверждена сопоставлением с результатами, полученными другими методами.

Показано, как совместное использование горизонтального и вертикального базисов служит в качестве мониторинга планово-высотного положения подкрановых рельсов фотограмметрическим методом. Данный вывод основан на результатах моделирования и на контрольных измерениях.

Описана методика применения разработанного варианта метода обработки фотоизображений для нивелирования строительных конструкций. Сравнение точности результатов показало практическое совпадение с результатами, получаемыми обычным нивелированием.

Разработанные варианты фотограмметрического метода обладают достаточной точностью для решения широкого класса задач, а именно: 1. нахождение по заданному расстоянию до точки на протяжённом объекте её положение на снимке; 2. определение расстояние до любой точки объекта на снимке или определить расстояние между любыми его точками. При использовании метода исключен выход персонала на подкрановый путь для выполнения одной из наиболее трудоёмких операций.

Разработан алгоритм применения фотограмметрический метод определения ширины колеи. Сопоставление с другими методами показали его высокую производительность и необходимую точность получаемых результатов.

Разработан алгоритм применения фотограмметрического метода, позволяющий с одной точки стояния фотокамеры и за один проход мостового крана определить одновременно непрямолинейность подкрановых рельсов контролируемого участка пути, ширину колеи любого размера и траекторию движения крана. Полученные результаты показали его высокую эффективность и точность.

### **Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГППФ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОДНОСТОРОННИМИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

В главе 1 представлена классификация геометрических методов определения ГППФ высотных сооружений, разработанная на базе исследований, описанных в работе [86]. Каждый из этих методов проанализирован с позиций их достоинств и недостатков, отмечена их сильная зависимость от застроенности окружающих территорий, что затрудняет производство измерений их ГППФ в нескольких направлениях. Для устранения недостатков были разработаны односторонние методы ([152], [72]) и, в частности, фотограмметрические методы [150], допускающие использование доступного стандартного оборудования. Достоинством односторонних методов является возможность определения ГППФ сооружений в двух взаимно перпендикулярных направлениях проведением измерений с одной точки установки прибора.

Однако часто измерения геометрии сооружения (в частности крена) бывают ограничены только его средней и верхней частью в силу закрытости его нижней части посторонними объектами. В качестве таких объектов выступают как стационарные объекты типа различного рода зданий, сооружений, деревьев, так и временные объекты типа транспортных средств, временных сооружений т.д. В этом случае производятся измерения только видимых частей сооружения. Далее результаты экстраполируются на ее невидимую часть таким образом, чтобы можно было применить результаты на всю высоту сооружения. При этом зачастую происходит потеря точности результатов измерений. В данной главе описан односторонний вариант фотограмметрического метода определения ГППФ сооружения в два этапа, позволяющий компенсировать описанный недостаток, и представлены некоторые результаты практических измерений.

### 3.1. Определения крена сооружений башенного типа односторонним вариантом фотограмметрического метода

Как описано в разделе 2.1, для обеспечения возможности обработки фотоснимка на нем должна присутствовать вертикальная линия, называемая референтной линией. Кроме того, необходимо представление результатов измерений в метрической системе, для чего снимок должен быть подвергнут масштабированию. Обычно это требование достигается соответствующей калибровкой фотокамеры.

Ранее уже отмечалось, что наиболее простым вариантом референтной линии является шнуровой отвес, расположенный на фоне фотографируемого объекта. Референтная линия может располагаться произвольным образом относительно объекта (см.Рис.47).

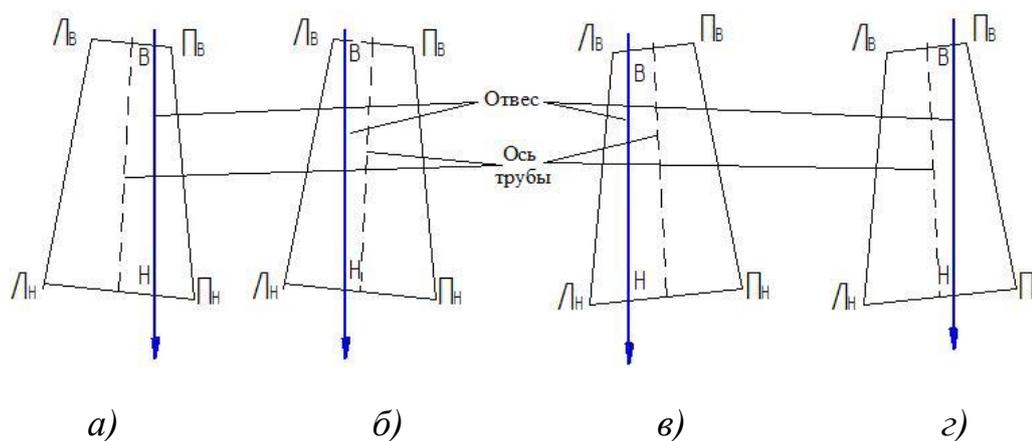


Рис.47. Возможные положения референтной линии

Далее на фотоизображении трубы в растровом редакторе (редактор может быть любой, имеющий инструменты растровых измерений, в нашем случае *Paint*) последовательно замеряются растровые координаты Л, О и П соответственно крайней левой точки, отвеса и крайней правой точек трубы на уровне её верхнего и нижнего сечений. Далее, вычисляются растровые расстояния  $L_B$ ,  $P_B$  и  $L_H$ ,  $P_H$  от крайних точек сооружения до отвеса по выражениям  $O-L$  и  $O-P$ . По этим величинам вычисляются отклонения отвеса до оси трубы вверху и внизу  $B = -(L_B + P_B)/2$  и  $H = -(L_H + P_H)/2$ . Величины  $L_B$ ,  $P_B$  и  $L_H$ ,  $P_H$ , фигурируют с учетом их знаков. Крен трубы  $K$  в

пикселах вычисляется как разность между  $B$  и  $H$  (с учётом их знака). По знаку результата можно судить о направлении крена вправо (Рис.47а, б) или влево (Рис.47в, г). Крен в метрических единицах вычисляется по формуле

$$K = B\delta_B - H\delta_H, \quad (25)$$

где  $\delta_B$  и  $\delta_H$  – цена одного пиксела соответственно для верхнего и нижнего сечения трубы, мм/пкс.

В работе [92] была произведена оценка влияния расположения отвеса относительно оси сооружения на точность определения его крена на основе примера для дымовой трубы высотой 30 м и радиусами: вверху 1,3 м, внизу 2,0 м (Рис.48).



Рис.48. Исходное расположение отвеса по оси трубы

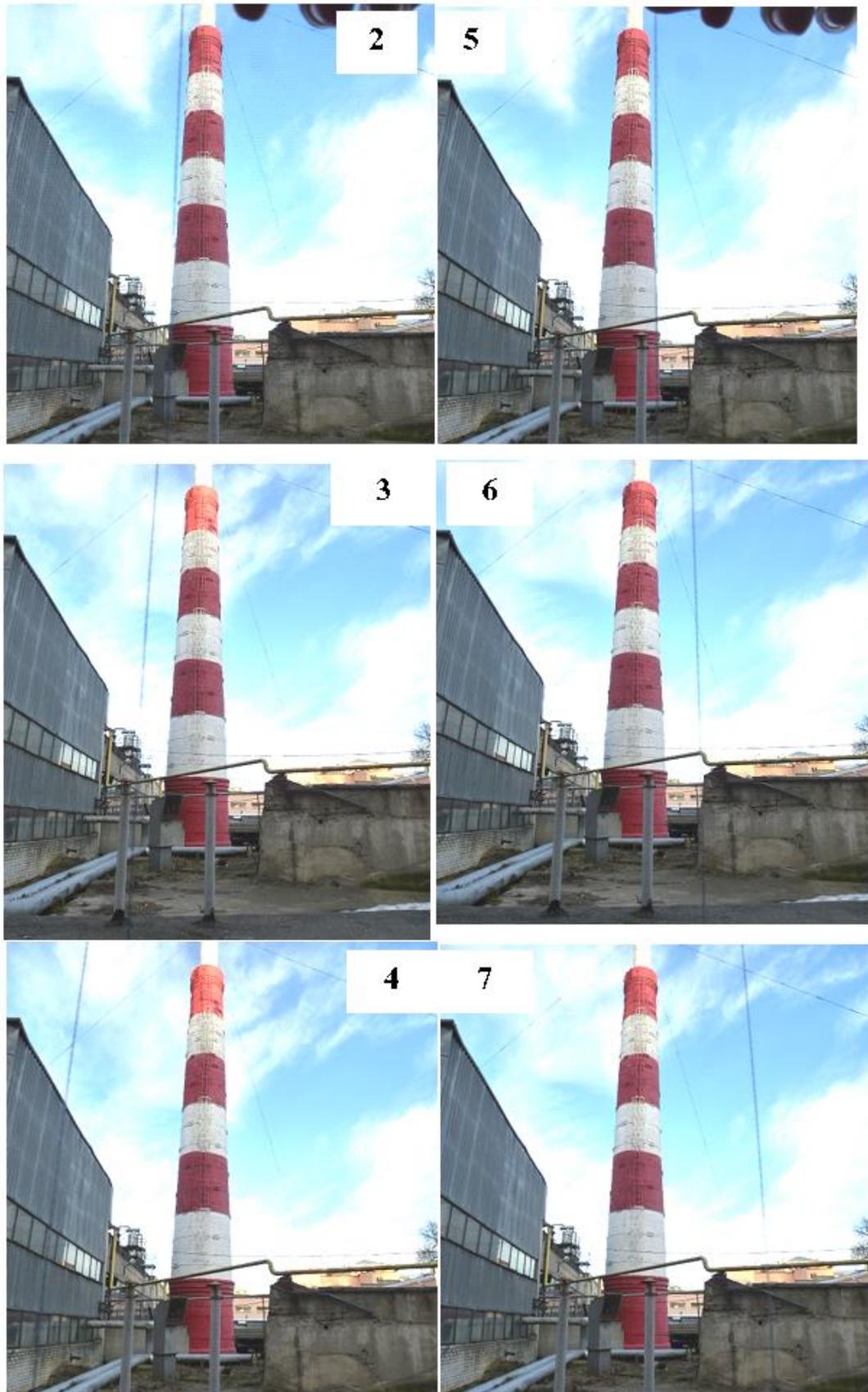


Рис.49. Различные варианты расположения отвеса относительно оси трубы

Фотофиксация трубы производилась неподвижно установленной фотокамерой цифровой камерой *Nikon S9100* при различных вариантах расположения нити шнурового отвеса относительно оси трубы (см. Рис.48, 49). Фотокамера специально центрировала изображение сооружения в плоскости снимка для снижения влияния подушечной или бочкообразной дисторсии (Рис.48).

Результаты замера растровых координат в пикселах представлены в Табл.16, графы 2...7.

Т а б л и ц а 16

### Результаты обработки снимков

Варианты	Верхние растровые координаты, пкс			Нижние растровые координаты, пкс			Верх $V$ , пкс		Низ $H$ , пкс		К, пкс
	Л	О	П	Л	О	П	Лв	Пв	Лн	Пн	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	205	222	240	183	219	250	17	-18	36	-31	3
2	205	194	240	183	183	250	-11	-46	0	-67	-5
3	205	171	240	183	150	250	-34	-69	-33	-100	-15
4	205	115	240	183	80	250	-90	-125	-103	-170	-29
5	205	250	240	183	251	250	45	10	68	1	7
6	205	280	240	183	288	250	75	40	105	38	14
7	205	307	240	183	328	250	102	67	145	78	27

Из таблицы видно, что все растровые величины, определенные по снимкам (графы 8...11) для варианта 1 практически антисимметричны, что показывает практически точное расположение отвеса в верхнем сечении относительно его центра (отклонение  $(205+240)/2 - 222 = 0,5$  пкс).

Определены расстояния от отвеса до оси трубы  $V$  и  $H$ , по которым вычислена растровая величина крена (графа 12). На Рис.50 представлена зависимость  $S_2...S_7$  расположения отвеса относительно оси трубы, построенная на основе данных в Табл. 46.

Полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии на точность определения её крена расположение отвеса относительно оси трубы, при этом влияние существенно возрастает при приближении отвеса к

объективу фотокамеры. При симметричном расположении отвеса относительно оси трубы ошибки крена практически антисимметричны.

В случае несовпадения отвеса с центром верхнего сечения трубы для вычисления крена используется выражение (25), а ошибка крена  $m_K$ , зависит от всех величин входящих в нее величин, а именно:  $B$ ,  $H$  и ошибок  $m_B$ ,  $m_H$  их определения, от размеров пиксела  $\delta_B$  и  $\delta_H$  и ошибок  $m_{\delta_B}$ ,  $m_{\delta_H}$  их определения

$$m_K^2 = \delta_B^2 m_B^2 + B^2 m_{\delta_B}^2 + \delta_H^2 m_H^2 + H^2 m_{\delta_H}^2. \quad (26)$$

В случае расположения отвеса по центру верхнего сечения трубы (Рис.48), то крен будет вычисляться по упрощенной формуле (25)

$$K = H\delta_H. \quad (27)$$

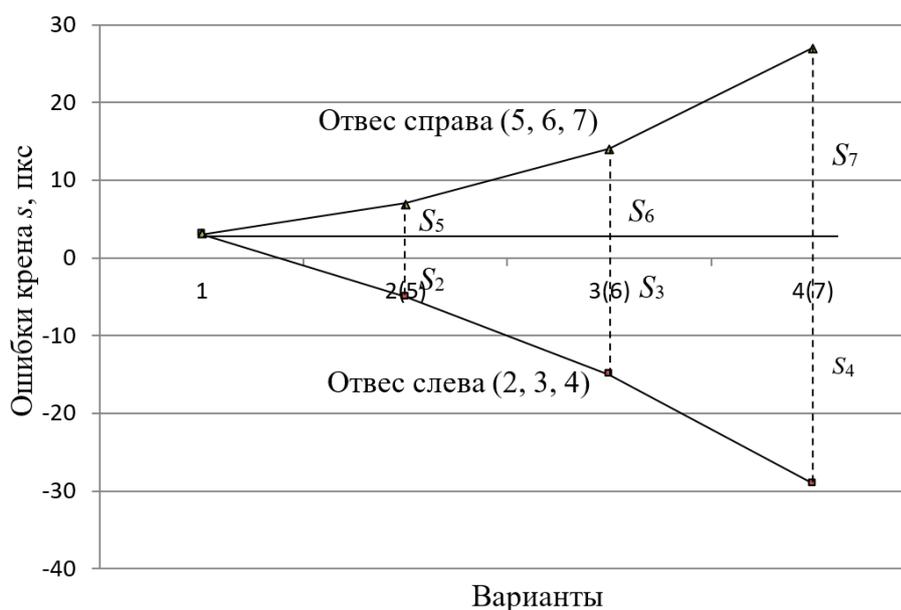


Рис.50. Зависимости ошибок определения крена от расположения отвеса относительно оси трубы

В этом случае ошибка крена будет зависеть только от величин  $H$  и цены пиксела  $\delta_H$  и ошибок их определения

$$m_K^2 = \delta_H^2 m_H^2 + H^2 m_{\delta_H}^2. \quad (28)$$

Растровые координаты Л, О и П позволяют оценить растровое смещение отвеса относительно центра верхнего сечения с использованием формулы

$$(Л - П)/2 - О = С, \quad (29)$$

Если С положительно, то это говорит о смещении отвеса влево от оси трубы, в противном случае – в право. С учётом С крен в метрических единицах будет равен

$$К = (Н - С)\delta_H. \quad (30)$$

Точность определения крена по фотографии при расположении отвеса по центру верхнего сечения трубы зависит в основном от цены пиксела  $\delta_H$ , зависящей от качества фотокамеры и расстояния до снимаемого объекта.

Характеристики фотокамеры *Nikon COOLPIX S9100* позволяют обеспечить цену пиксела  $\delta$  в пределах 1-10 мм/пкс на дистанции 3-30 м. Снижение влияния цены пиксела на точность определения крена можно обеспечить, например, так. Первоначально вся труба фотографируется вместе с отвесом (Рис.48) и с нивелирной рейкой, горизонтально приложенной внизу трубы. Изображение отвеса на отмечается на рейке. Затем фотокамера перемещается и направляется на метку. Нижнее сечение фотографируется с близкого расстояния (Рис.51).



Рис.51. Фотография трубы с расстояния 3 м

По первому снимку оценивается величина  $C$ , а по второму – определяется  $H$ . Влияние цены пиксела при этом минимизируется. Кроме того, второй снимок может быть использован для выполнения двухэтапный вариант фото метода определения крена, который описан ниже, поскольку нижняя часть сооружения является видимой (Рис.51). В данном случае, на фото трубы (Рис.51), длина рейки равна 3000 мм,  $L_n$  – 1241 пкс,  $P_n$  – 42(25) пкс, цена пиксела равна  $3000/(42(25) - 1241) = 0,992$  мм/пкс.



Рис.52. Фотография изображения трубы в плоском зеркале (а) и искривлённой трубы

Рис.52а иллюстрирует применение варианта определения крена путём фотографирования изображения трубы с отвесом, установленном в непосредственной близости от трубы. На Рис.52б проиллюстрировано, что из варианта метода фотографирования с отвесом можно надёжно и просто

зафиксировать искривление ствола трубы без каких-либо материальных затрат и решения организационных вопросов.

Перспективным также является фотографирования трубы с отвесом участками с постоянной точки установки фотокамеры.

Простота данного варианта фотограмметрического метода с отвесом наряду с одноразовыми измерениями дает возможность так же применять его и для мониторинга [95] вертикальности различных высоких зданий и сооружений. Реализовать такой мониторинг можно путем фиксации отвеса и одной и той же фотокамеры относительно постоянных базовых точек в каждом цикле измерений.

### **3.2. Мониторинг крена высотных сооружений фотограмметрическим методом с отвесом**

Мониторинг крена высотных сооружений может осуществляться путем периодических замеров с заданными временными интервалами. В данном случае мониторинг имеет дискретный характер и проводится путем периодических измерений с заданными интервалами геометрии объекта с постоянных точек установки фотокамеры и расположения отвеса. Результаты, полученные путем обработки фотоснимков разных этапов измерений, позволяют сделать заключение о стабильности, либо о нестабильности сооружения. Также возможен вариант непрерывного мониторинга в случае использования стационарно установленной видеокамеры и отвеса. В этом случае последующее применение фотограмметрического метода возможно путем выделения отдельных кадров из общего видеоряда.

Вариант фотограмметрического метода при мониторинге крена дымовой трубы применяется следующим образом (Рис.53а). Расстояние Ф-О при установке фотокамеры в точке Ф выбирается с учетом того, чтобы вся труба целиком помещалась на фотоизображении.

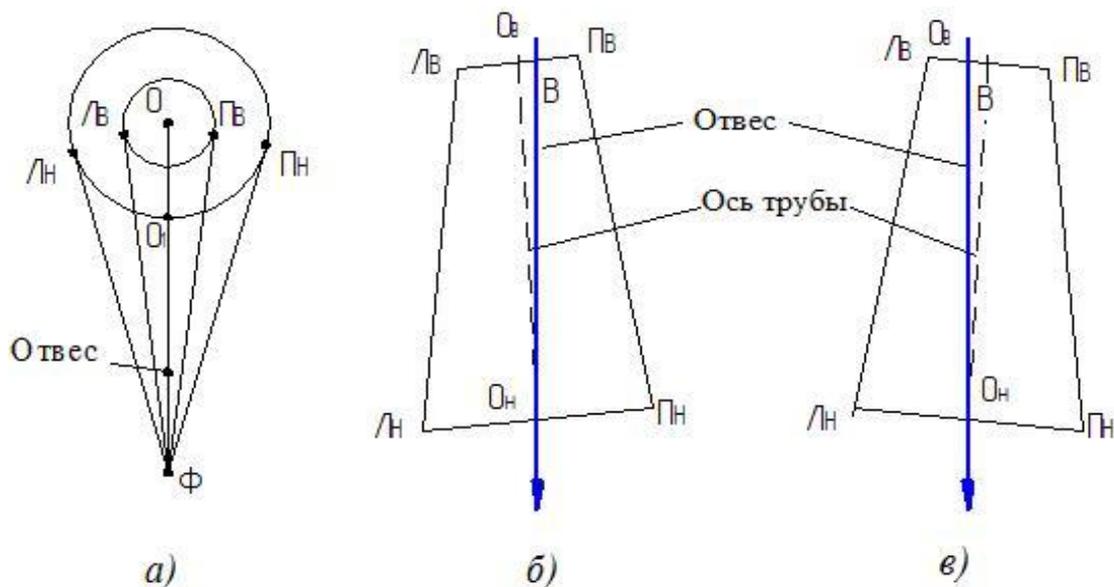


Рис.53. Схемы к производству мониторинга крена дымовой трубы

Оптическая ось фотокамеры ориентируется на заранее отмеченную точку  $O_1$  (см. Рис. 53a). На линии  $\Phi-O$  перед объективом фотокамеры располагается шнуровой отвес так, чтобы нить отвеса проецировалась на контур трубы по всей высоте. Отвес фотографируется на фоне исследуемого объекта. Дальнейшая обработка снимка описана выше и заключается в измерении растровых координат в пикселах точек Л, О и П (Рис.52).

Растровые расстояния  $L_B, P_B$  и  $L_H, P_H$  от референтной линии до верхних и нижних краёв трубы в пикселах представляют собой разности координат точек  $O-L$  и  $O-P$  (Рис.52б, в). Растровое расстояние от референтной линии до оси трубы вверху в пикселах вычисляется по формуле

$$B = -(L_B + P_B)/2, \quad (31)$$

где должны быть учтены знаки  $L_B$  и  $P_B$ . Величина  $B$  представляет собой крен трубы  $K$  в пикселах. Перевод крена в метрические единицы производится по формуле

$$K = B\delta_B, \quad (32)$$

где  $\delta_B$  – метрическая цена одного пиксела для верхнего сечения трубы, мм/пкс.

Отвес не всегда может точно совпадать с центром нижнего сечения трубы. В этом случае вычисляется величина этого смещения в растровых единицах  $\Delta$  с использованием величин  $L_H$ ,  $O_H$  и  $\Pi_H$  по формуле

$$(L_H + \Pi_H)/2 - O_H = \Delta, \quad (33)$$

По знаку  $\Delta$  можно судить о направлении смещения отвеса. В идеальном случае величина  $\Delta$  должно быть нулевой, но практически это соблюдается очень редко. В этом случае  $\Delta$  прибавляется к величине  $O_B$  в качестве поправки с учётом её знака.

С целью сведения к минимуму влияния дисторсии объектива на результаты измерений, необходимо отвес располагать как можно дальше от фотокамеры, но так, чтобы нить отвеса охватывала всю высоту сооружения. В случае, если это условие выполнить не представляется возможным необходимо на снимке средствами растрового редактора продлить линию отвеса на всю высоту трубы. Этот вариант метода получил название фотограмметрического метода с продолженным отвесом. Дальнейшие вычисления производятся обычным порядком по всей высоте трубы, как описано выше.

В формуле (32) присутствует величина  $\delta_B$  – метрическая цена одного пиксела для верхнего сечения трубы, мм/пкс. В Главе 1 отмечалось, что эту величину можно определить отношением известной метрической длины используемого базиса (мм) на количество пикселов, содержащихся в этом базисе (пкс) на снимке. Для определения метрической цены пиксела разработана специальная схема, изображенная на Рис.54. При этом расстояние от точек установки фотокамеры до оси трубы выбиралось по следующему закону  $\Phi-O = nR$  (здесь  $n$  – кратность превышения расстояния  $\Phi-O$  по отношению к радиусу трубы  $R$ ).

Геометрические свойства хорд ( $L-\Pi$ ) на снимке таковы, что их длина, как видно из Рис.54, всегда меньше диаметра (1-2) поперечного сечения

трубы. Поэтому метрическая цена пиксела для верха трубы должна вычисляться по следующей зависимости

$$\delta_B = (Л-П)_B / (Л_B + П_B), \quad (34)$$

где  $(Л-П)_B$ , и  $(Л_B + П_B)$  – длина хорды Л-П верхнего сечения трубы в метрической и в растровой системе единиц соответственно (Рис.54).

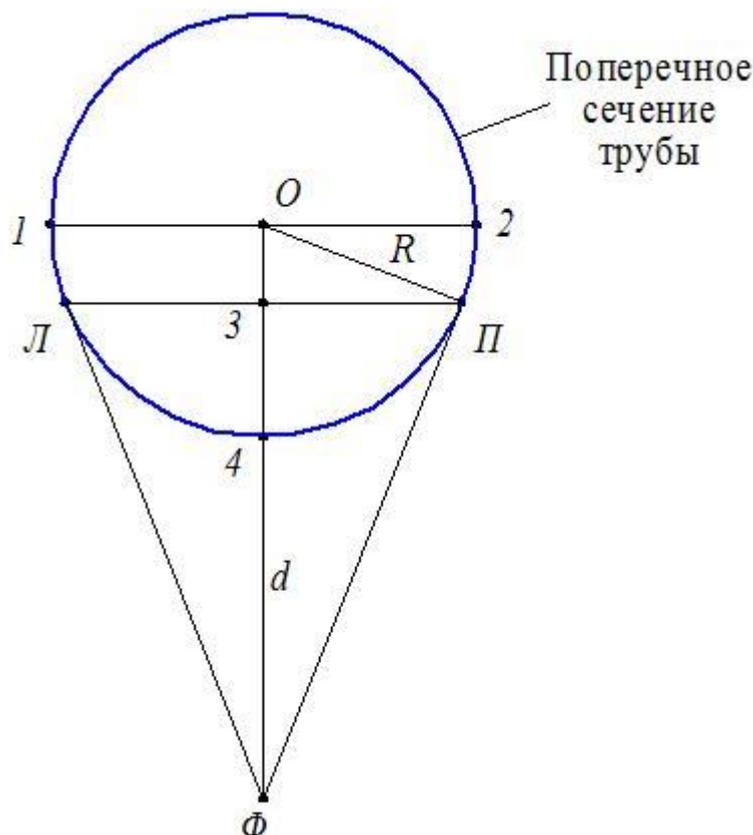


Рис.54. Схема определения цены пиксела

Хорда Л-П вычисляется из подобия треугольников Ф-О-П и О-3-П, именно:  $R/(Ф-О) = (3-П)/(Ф-П)$ . Подставляя сюда вместо Ф-О произведение  $nR$ , можно получить  $(Ф-П) = n(3-П)$ . Геометрия прямоугольного треугольника Ф-О-П позволяет получить соотношение  $R^2 = (Ф-О)^2 - (Ф-П)^2 = (nR)^2 - [n(4-5)]^2$ , которое после ряда преобразований примет вид

$$(Л - П) = 2R \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} = 2cR. \quad (35)$$

Формула (35) применима по всей высоте трубы. При этом величина  $c$  – это поправочный коэффициент к радиусу сечения трубы, вычисляемый по формуле

$$c = \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}, \quad (36)$$

На Рис.55 представлена зависимость этого коэффициента от величины  $n$ , при значениях 2, 3, ..., 19, 20.

Как следует из формулы (35) поправочного коэффициента  $c$  влияет на точность определения хорды Л-П, другими словами, согласно известному из теории ошибок выражению для ошибки функции общего вида имеем  $m_{Л-П}^2 = (2c)^2 m_R^2 + (2R)^2 m_c^2$ , откуда следует, что

$$m_{Л-П} = 2\sqrt{c^2 m_R^2 + R^2 m_c^2}. \quad (37)$$

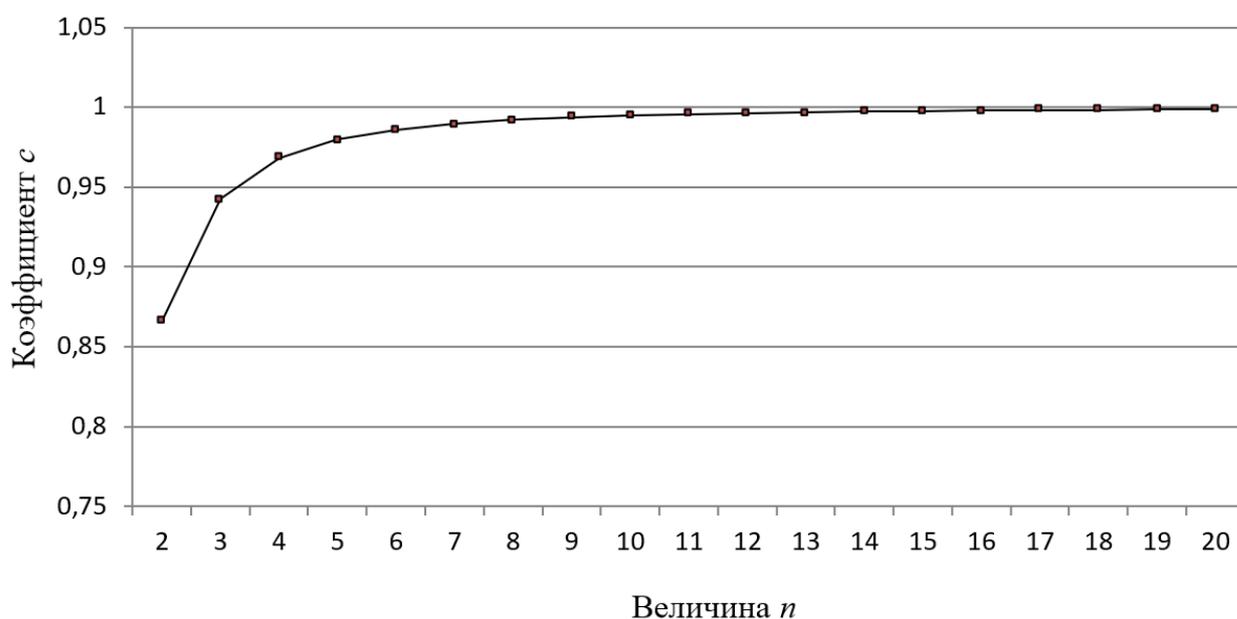


Рис.55. Зависимость коэффициента  $c$  от  $n$

Учитывая, что в формуле (37) следует принять  $m_c^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial n}\right)^2 m_n^2$ , среднеквадратичная ошибка поправочного коэффициента будет равна

$$m_c = \frac{1}{n^3 \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} m_n, \quad (38)$$

зависимость которой от принятых значений  $m_n$  0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 представлен на Рис.56.

Анализ этих зависимостей показывает, что при  $n \geq 7$  значения  $m_c$  практически равны нулю. Это дает возможность записать формулу (38) в более компактном виде

$$m_{Л-П} = 2cm_R. \quad (39)$$

В то же время увеличение расстояния фотографирования может снизить точность растровых координат Л и П по фотоизображению. А это, свою очередь, влияет на точность определения метрической цены одного пиксела  $\delta$ .

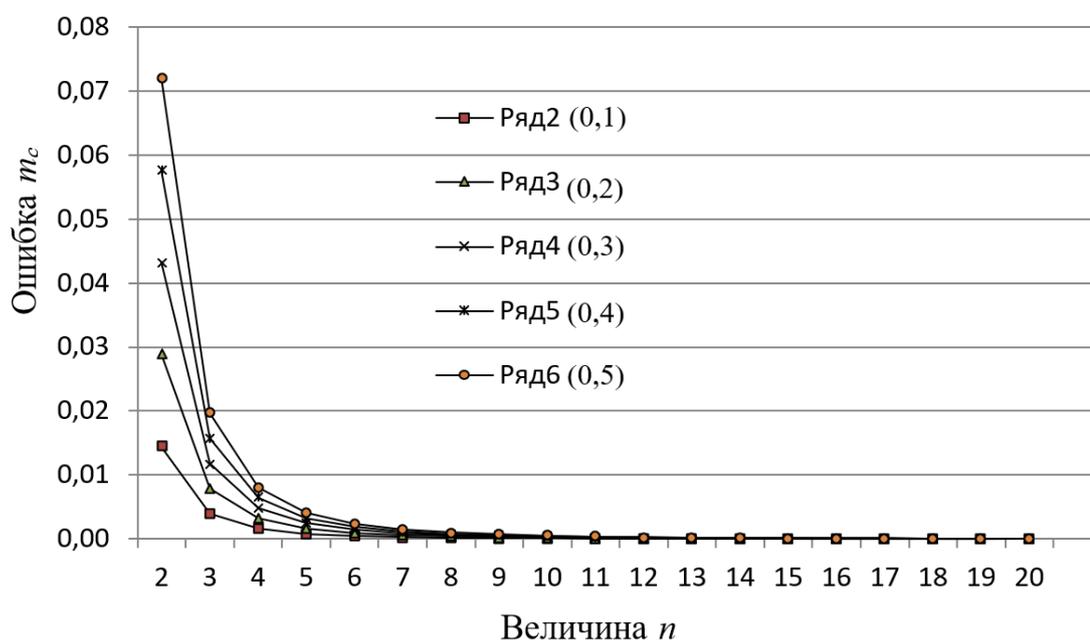
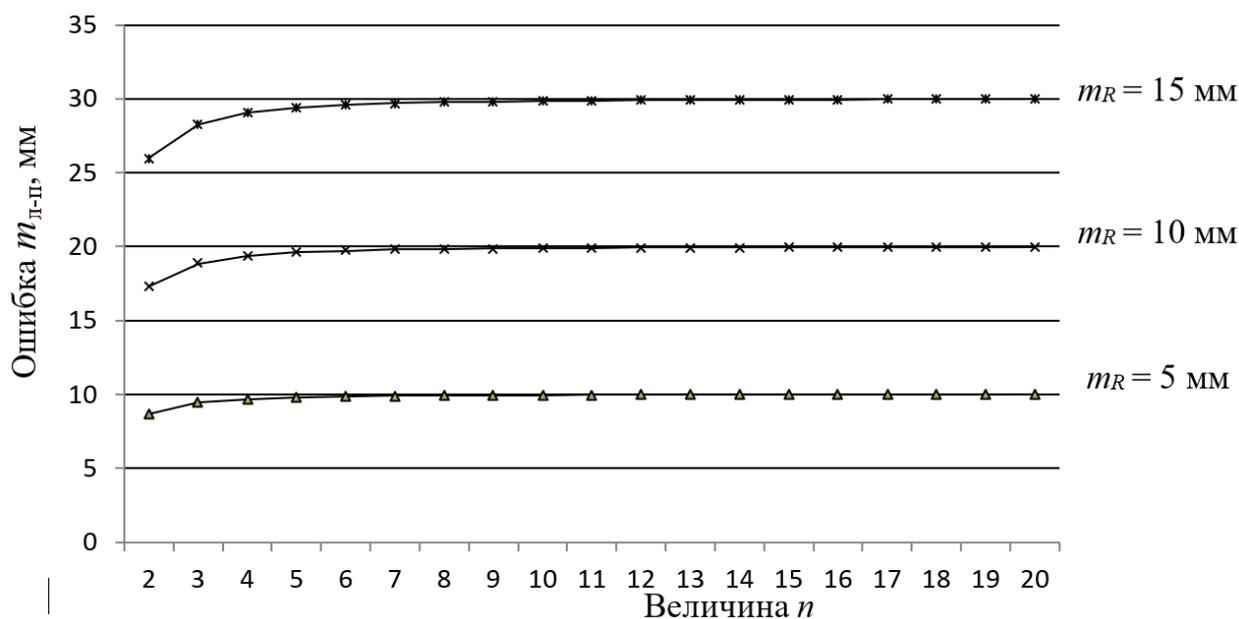


Рис.56. Зависимости ошибки  $m_c$  от величины  $n$

Анализ данных на Рис.57 позволяет отметить, что при  $n \geq 7$  практически может быть принято  $m_{Л-П} = 2m_R$ .

Рис.57. Зависимости ошибки  $m_{Л-П}$  от  $s$  и  $m_R$ 

Из формулы (34) СКО  $m_{\delta_B}$  определения метрической цены пиксела в верхней части сооружения следует, что  $\delta_B$  будет равна

$$\begin{aligned}
 m_{\delta_B} &= \frac{1}{(L_B + \Pi_B)} \sqrt{m_{(Л-П)_B}^2 + \frac{(Л - \Pi)_B^2}{(L_B + \Pi_B)^2} m_{(Л_B + \Pi_B)}^2} = \\
 &= \frac{1}{(L_B + \Pi_B)} \sqrt{4m_R^2 + \delta_B^2 m_{(Л_B + \Pi_B)}^2}, \quad (40)
 \end{aligned}$$

где  $m_R$ ,  $m_{(Л-П)_B}$  и  $m_{(Л_B + \Pi_B)}$  — соответственно среднеквадратичные ошибки определения радиуса и хорды (Л-П) в мм и в пикселах.

Анализ свойств фотокамер *Nikon D3100*, *Nikon COOLPIX S9100*, *Sony Exmor R*, *Canon PowerShot S2 IS* показал, что цена пиксела  $\delta$  зависит только от расстояния до объекта съёмки и может находиться в пределах от 1-2 до 8-15 мм/пкс в диапазоне 3-30 м. Следовательно, растровые координаты Л, О, П могут быть определены с точностью до 1 пиксела (ошибка  $m_{O_B}$ ). В этом случае  $m_{(Л_B + \Pi_B)}$  в зависимости от  $m_{O_B}$  будет равна

$$m_{(Л_B + \Pi_B)} = m_{O_B} \sqrt{2}, \quad (41)$$

С учетом формулы (41) соотношение (40) может быть записано в виде

$$m_{\delta_B} = \frac{1}{(L_B + \Pi_B)} \sqrt{4m_R^2 + 2\delta_B^2}. \quad (42)$$

Таким образом,  $\delta$  всех трёх фотокамер зависит только от расстояния до объекта съёмки и для рассмотренных фотокамер может находиться в пределах от 1-2 до 8-15 мм в пределах 3-30 м (см. Рис. 58).

В [78] приведены результаты калибровки цифровой фотокамеры *Nikon COOLPIX S9100*. Эти данные представлены в Табл.17 для базиса 3 м, что соответствует радиусу трубы 1,5 м в верхнем ее сечении.

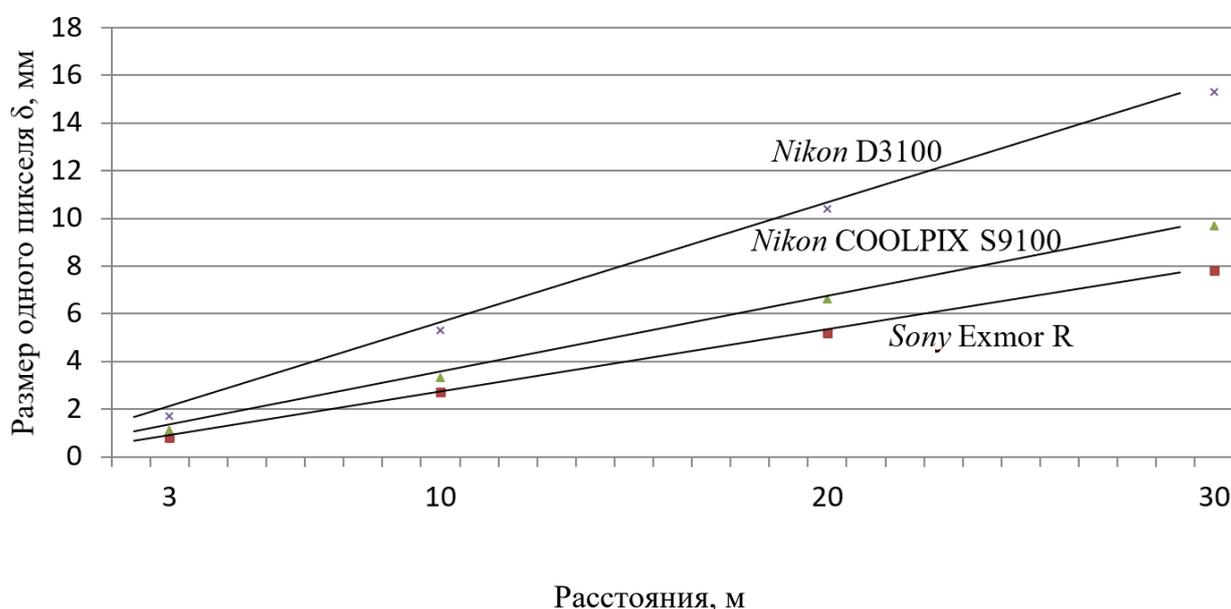


Рис.58. Зависимости метрической цены пикселя от расстояния съёмки

Т а б л и ц а 17

**Результаты калибровки фотокамеры *Nikon COOLPIX S9100* в пикселях**

$n$	5	10	15	20
$L_B + \Pi_B$ , пкс	1163	589	395	298
$\delta_B$ , мм/пкс	2,6	5,1	7,6	10,1

По данным Табл.17 с использованием выражения (42) вычислялись СКО  $m_{\delta_B}$  для  $n = 5, 10, 15, 20$  и  $m_R = 5, 10, 15$  мм, графики которых изображены на Рис.59. Видно, что даже при  $n = 20$  величина  $m_{\delta_B}$  составит всего 0,058, 0,082, 0,112 мм/пкс в зависимости от  $m_R$ .

Следует отметить, что схема реализации данного варианта мониторинга крена может быть самой различной. Возможен вариант, когда измеряются только величины  $L_B$ ,  $P_B$  и  $L_H$ ,  $P_H$ . В этом случае определяется относительная величина крена. Для этого по фотоснимку измеряется полная растровая высота трубы  $H$  и вычисляется крен как отношение  $B/H$ , который не должен превышать 0,005 для  $H < 100$  м и  $1/2H$  – для  $H > 100$  м (см. СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений»).

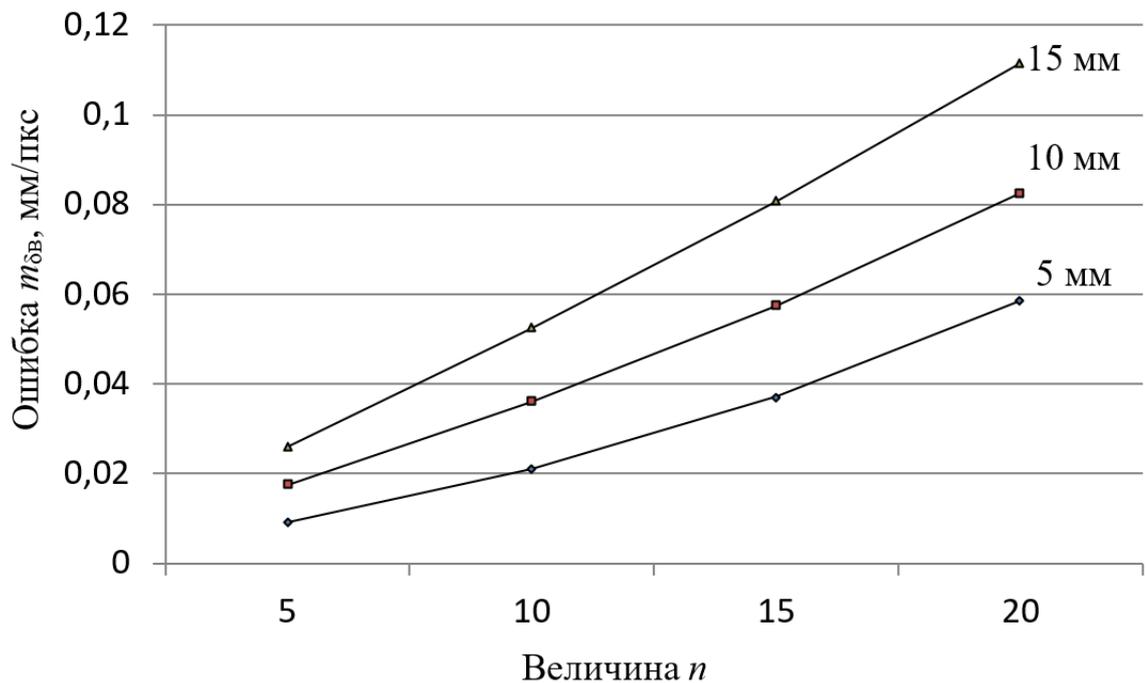


Рис.59. Графики зависимости ошибки  $m_{\delta B}$  от  $n$  и  $m_R$

Корректность использования соотношения  $B/H$  для определения относительного крена обоснована сравнением калибровки цифровой камеры *Nikon COOLPIX S9100* по обоим базисам, представленными в работах [78, 82]. Сравнение показало, что метрическая цена одного пиксела в диапазоне измеряемых расстояний 3...30 м одинакова для обоих базисов.

### 3.3. Точность фотограмметрического метода для измерения вертикальности высотных сооружений

С помощью предлагаемого варианта фотограмметрического метода определения ГППФ высотных объектов были проведены измерения крена дымовой трубы высотой 30 м и радиусами: вверху 1,3 м, внизу 2,0 м [88].

Труба была сфотографирована с расположенной на некотором расстоянии от объектива фотокамеры нитью шнурового отвеса и приложенной к трубе 3-метровой нивелирной рейкой (Рис. 60а). Измерения выполнялись цифровой камерой *Nikon S9100*. Размер матрицы составляет 1/2,3", эквивалентное фокусное расстояние объектива 25-450 мм. Наличие низко дисперсных линз в объективе способствует снижению остаточных хроматических aberrаций и дисторсии.



Рис.60. Исследуемая труба с референтной линией(а) реперные точки для координатных измерениях (б)

Изображение рейки на снимке было использовано для определения расстояния от фотокамеры до объекта, которое равно 18,546 м. Это позволило определить расстояние до центра трубы  $(18,564+2,000)$  м = 20,564 м, что соответствует кратности расстояния  $n$  по отношению к нижнему радиусу равной  $20,564:2 = 10,282$  и к верхнему радиусу соответственно

20,564:1,3 = 15,818. Коэффициент  $c$  (формула (36)) составил 0,995 и 0,998 для верхнего и для нижнего радиусов соответственно (графа 6 табл. 18) в зависимости от этих значений  $n$ .

Далее по Рис.60а замеры растровые расстояния  $L$  и  $\Pi$  в верхнем В, двух промежуточных 1, 2 и нижнем Н её сечениях (столбцы 2, 3 Табл.18), на основе которых найдены их полусуммы (столбец 4 Табл.18) и расстояния от отвеса до оси трубы (столбец 5 Табл.18).

Т а б л и ц а 18

### Результаты определения крена дымовой трубы

Сечение	Количество пикселей				$c$	Размеры радиуса, одного пиксела, крена		
	$L$	$\Pi$	$(L+\Pi)/2$	$(L+\Pi)/2-L$		$R$ , мм	$\delta$	$K$ , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Верхнее	176	132	154	-22	0,998	1304	8,5	17/12/18
Среднее 1	220	173	196,5	-23,5	0,997	1523	7,7	21/22/26
Среднее 2	274	218	246	-28	0,996	1761	7,1	3/2/3
Нижнее	326	2(25)	296	-30	0,995	2009	6,8	0/0/0

Метрическая цена одного пиксела, представленная в гр.8 табл.18, была вычислена по формуле (43) следующим образом. На основе результатов измерений геометрии трубы (Рис.60б) электронным тахеометром SET 530R/R3 в четырех сечениях вычислялись соответствующие радиусы трубы (гр.7 табл.18), с помощью которых определены по формуле (35) величины  $L$ - $\Pi$  (Рис.53) вверху и внизу в метрической системе и использованы для вычисления величины  $\delta_B$

$$\delta_B = (L-\Pi)_B / (\Pi_B \pm L_B), \quad \delta_H = (L-\Pi)_H / (\Pi_H \pm L_H), \quad (43)$$

где знаки «минус» и «плюс» соответствует положению отвеса Рис.61а, в, и Рис.61б.

Полученные значения крена, вычисленные по формуле (25), были сопоставлены со значениями, полученными координатным и линейно-угловым методами. В табл.18 в графе 9 приведены три значения крена, первое значения получено фотограмметрическим методом, второе и третье –

координатным и линейно-угловым методом соответственно. Как видно наблюдается удовлетворительная корреляция результатов, полученных всеми тремя методами.

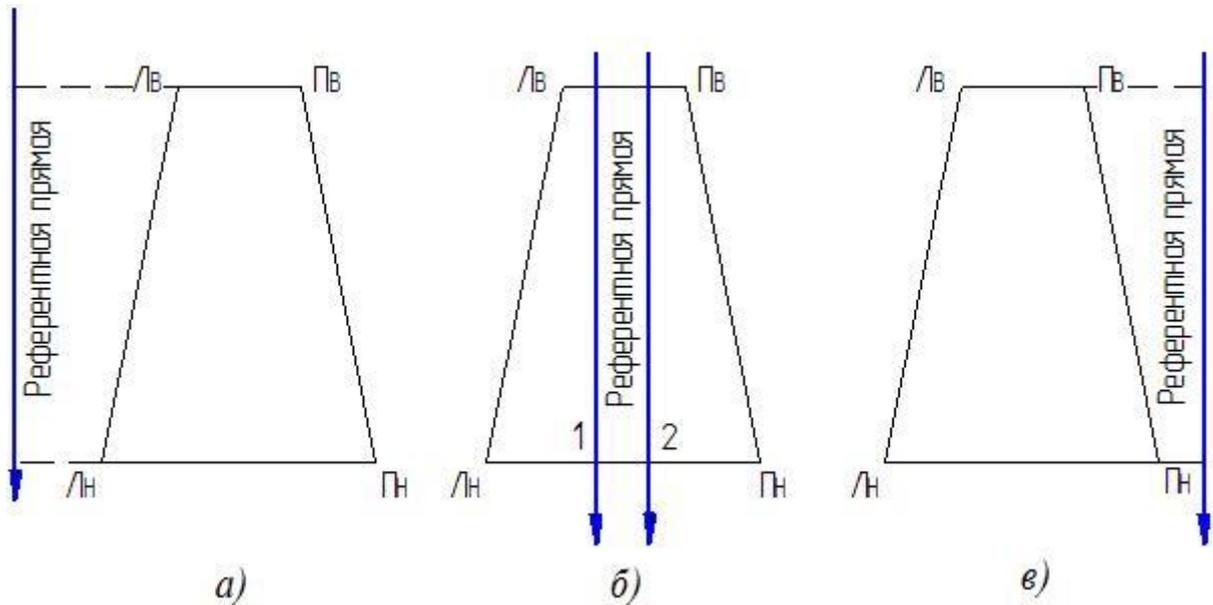


Рис.61. Варианты расположения референтной прямой относительно трубы

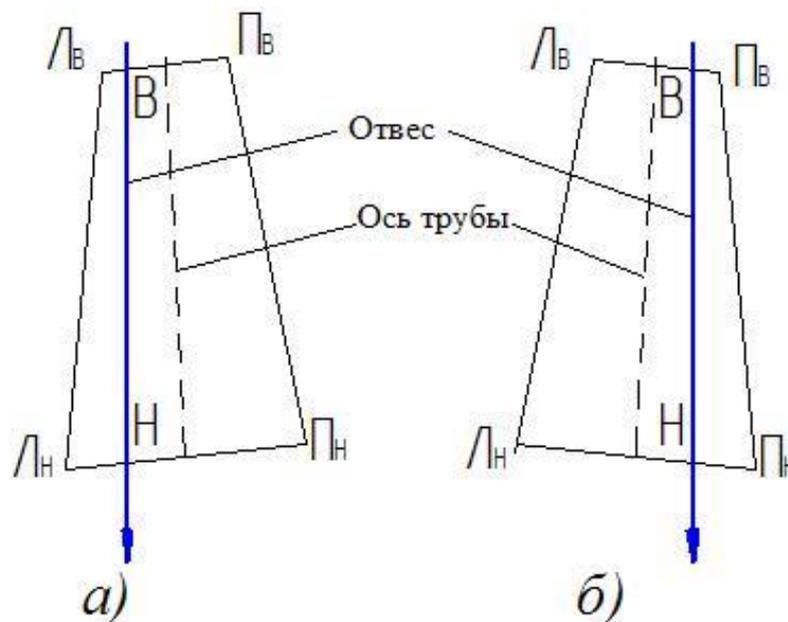


Рис.62. Схемы к определению крена трубы

СКО крена  $m_K$  определяются по соотношению (25). Согласно известному из теории ошибок выражению для ошибки функции общего вида имеем [99, 190]

$$m_K^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2 m_B^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta_B}\right)^2 m_{\delta_B}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial H}\right)^2 m_H^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta_H}\right)^2 m_{\delta_H}^2, \quad (44)$$

где выражения в скобках представляют собой частные производные, а  $m_B$ ,  $m_H$ ,  $m_{\delta_B}$  и  $m_{\delta_H}$  – СКО измерения расстояний от отвеса до оси трубы и определения цены пиксела соответственно вверху и внизу.

После взятия частных производных формула (44) примет вид

$$m_K^2 = \delta_B^2 m_B^2 + B^2 m_{\delta_B}^2 + \delta_H^2 m_H^2 + H^2 m_{\delta_H}^2. \quad (45)$$

Таким образом ошибка крена в метрической системе единиц будет зависеть от ошибок определения расстояний  $B$  и  $H$  и от величин ошибок  $m_{\delta_B}$ ,  $m_{\delta_H}$ .

Поскольку  $B = 0,5\Pi_B - 0,5Л_B$ ,  $H = 0,5\Pi_H - 0,5Л_H$  (см. Рис.61а) или  $B = 0,5Л_B - 0,5\Pi_B$ ,  $H = 0,5Л_H - 0,5\Pi_H$  (Рис. 62б), то по аналогии с предыдущим можно написать

$$m_B^2 = 0,25(m_{Л_B}^2 + m_{\Pi_B}^2), m_H^2 = 0,25(m_{Л_H}^2 + m_{\Pi_H}^2), \quad (46)$$

где в скобках представлены СКО определения  $Л_B$ ,  $\Pi_B$  и  $Л_H$ ,  $\Pi_H$ , пкс.

Примем  $m_{Л_B} = m_{\Pi_B} = m_1$  и  $m_{Л_H} = m_{\Pi_H} = m_2$ , тогда

$$m_B = m_1\sqrt{0,5}, m_H = m_2\sqrt{0,5}. \quad (47)$$

С другой стороны  $Л_B$ ,  $\Pi_B$  и  $Л_H$ ,  $\Pi_H$  можно представить как разность количества пикселов между отвесом  $O$  и левым краем трубы  $O_L$  или отвесом  $O_{\Pi}$ , правым краем трубы и отвесом  $O$ . Тогда ошибки  $m_1$  и  $m_2$  в зависимости от ошибок  $m_{O_B}$  и  $m_{O_H}$  будут равны

$$m_1 = m_{O_B}\sqrt{2}, m_2 = m_{O_H}\sqrt{2}. \quad (48)$$

Учитывая (48), соотношения (47) можно привести к виду

$$m_B = m_{O_B}, m_H = m_{O_H}, \quad (49)$$

затем преобразовать формулу (45)

$$m_K^2 = \delta_B^2 m_{O_B}^2 + B^2 m_{\delta_B}^2 + \delta_H^2 m_{O_H}^2 + H^2 m_{\delta_H}^2. \quad (50)$$

Формула (50) может быть упрощена, поскольку измерения координат  $O_L, O, O_{II}$  вполне может быть выполнена с точностью до 1 пиксела, что было доказано при использовании фотокамерами *Nikon D3100, Nikon COOLPIX S9100, Sony Exmor R, Canon PowerShot S2 IS*)

$$m_K^2 = \delta_B^2 + B^2 m_{\delta_B}^2 + \delta_H^2 + H^2 m_{\delta_H}^2. \quad (51)$$

Как видно из (50) СКО определения крена зависит только от СКО калибровки и расстояний от отвеса до оси трубы вверху и внизу. На Рис.54 представлена схема определения цены пиксела при расположении фотокамеры на некотором расстоянии от оси трубы  $\Phi - O = nR$  (где  $n$  – число укладываний радиуса  $R$  в расстоянии  $\Phi-O$ ). Следовательно, цены пиксела для верхнего и нижнего сечений трубы могут быть вычислены как

$$\delta_B = (ЛП)_B / (Л_B + П_B), \quad \delta_H = (ЛП)_H / (Л_H + П_H), \quad (52)$$

здесь  $(ЛП)_B, (ЛП)_H$  и  $(Л_B + П_B), (Л_H + П_H)$  – длина хорды (ЛП) верхнего или нижнего сечений трубы соответственно в метрической системе единиц и в пикселах (Рис.54). В общем виде СКО  $m_{\delta}$  будет равна

$$m_{\delta}^2 = \frac{m_{(ЛП)}^2}{(Л+П)^2} + \frac{(ЛП)^2 m_{(Л+П)}^2}{(Л+П)^4}, \quad (53)$$

где  $m_{(ЛП)}$  и  $m_{(Л+П)}$  – СКО определения хорды (ЛП) верхнего или нижнего сечений трубы соответственно в метрической и растровой системах.

Длину хорды (ЛП) в метрической системе единиц можно определить по формуле (35), где корень квадратный представляет собой поправочный коэффициент  $c$  к радиусу сечения вверху или внизу трубы. Для различных значений  $n$  эти коэффициенты см. Табл. 19.

### Поправочные коэффициенты $c$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
c	0,8(25)	0,943	0,968	0,980	0,986	0,990	0,992	0,994	0,995	0,996	0,996	0,997	0,997	0,998	0,998	0,998	0,998	0,999	0,999

Формула (35) показывает, что точность предлагаемого метода определения хорды (ЛП) в основном зависит от точности определения радиуса сооружения  $R$ , поскольку поправочный коэффициент  $c$  даже при  $n = 2$  составляет всего 0,8(25) и с увеличением  $n$  стремится к единице, достигая уже при  $n = 10$  значения 0,995. В то же время увеличение расстояния фотографирования может отрицательно сказаться на точности определения на снимке растровой длины хорды (ЛП), что повлияет на точность определения цены пиксела  $\delta$

На основании формулы (35) получим

$$m_{(ЛП)}^2 = 4(R^2 m_c^2 + c^2 m_R^2), \quad (54)$$

где  $m_c$  и  $m_R$  – СКО определения поправочного коэффициента  $c$  и радиуса трубы  $R$  вверху или внизу. С другой стороны  $m_{(ЛВ+ПВ)}^2 = m_{ЛВ}^2 + m_{ПВ}^2 = 2m_1^2$  и  $m_{(ЛН+ПН)}^2 = m_{ЛН}^2 + m_{ПН}^2 = 2m_2^2$ , поэтому в соответствии с условием (48) получим

$$m_{(ЛВ+ПВ)} = 2m_{0В} = 2\text{пкс}, \quad m_{(ЛН+ПН)} = 2m_{0Н} = 2\text{пкс}. \quad (55)$$

Представим соотношение (53) следующим образом

$$m_\delta^2 = \frac{1}{(Л+П)^2} \left[ m_{(ЛП)}^2 + \frac{(ЛП)^2}{(Л+П)^2} m_{(Л+П)}^2 \right] = \frac{1}{(Л+П)^2} \left[ m_{(ЛП)}^2 + \delta^2 m_{(Л+П)}^2 \right], \quad (56)$$

где  $\delta$  – цена пиксела вверху или внизу, мм/пкс.

Отсюда, учитывая (54) и (55) можно записать

$$m_\delta^2 = \frac{4}{(Л+П)^2} [R^2 m_c^2 + c^2 m_R^2 + \delta^2]. \quad (57)$$



Рис.63. Схема использования отвеса в качестве референтной прямой

Труба на Рис.63 была сфотографирована с расположенной на некотором расстоянии от объектива фотокамеры нитью шнурового отвеса и приложенной к трубе 3-метровой нивелирной рейкой. Измерения выполнялись цифровой камерой *Nikon S9100*.

Изображение рейки на снимке было использовано для определения расстояния  $\Phi-4$  (см. Рис. 63), которое оказалось равным 18,546 м. Это позволило определить отношение  $n_B = 15,8$  расстояния  $\Phi-O$  к верхнему радиусу и  $n_H = 10,3$  к нижнему радиусу. Этим значениям  $n$  соответствуют, согласно Табл. 19, поправочные коэффициенты  $s$  для верхнего радиуса 0,998 и для нижнего радиуса 0,995. Из этого следует, что при  $n > 10$  изменение его значения на  $15,8 - 10,3 = 5,5$  вызывает изменение поправочного коэффициента  $s$  всего на  $0,998 - 0,995 = 0,003$ . На основании данных табл. 19 в формуле (57) СКО  $m_c$  может быть принята равной 0,001.

Обработка снимка (Рис.63) показала, что  $(L_B+P_B) = 308$  пкс и  $(L_H+P_H) = 592$  пкс. По значениям радиусов  $R_B$  и  $R_H$  с использованием формулы (35)

вычислена длина хорды (ЛП), а по формулам (52) определена цена пиксела, равная  $\delta_B = 8,5$  мм и  $\delta_H = 6,8$  мм. Подстановка этих величин в (57) приводит к значению ошибки вверху  $m_\delta = 0,06; 0,09; 0,11$  мм и внизу  $m_\delta = 0,03; 0,04; 0,06$  мм при  $m_R = 5; 10; 15$  мм. Это говорит о том, что решающее влияние на  $m_\delta$  оказывает метрическая цена пиксела.

При обработке снимка (Рис.63) вычислены  $B = 22$  пкс и  $H = 30$  пкс, подставив которые и другие найденные ранее значения  $\delta_B = 8,5$  мм,  $\delta_H = 6,8$  мм,  $m_\delta = 0,06; 0,09; 0,11$  мм,  $m_\delta = 0,03; 0,04; 0,06$  мм в формулу (51), получим  $m_K = 11,0; 11,1; 11,3$  мм. Таким образом, СКО крена зависит в основном от цены пикселей вверху и внизу. Действительно, если принять:  $m_K^2 = \delta_B^2 + \delta_H^2$ , то  $m_K$  будет равна 10,9 мм, то есть практически такой, что и по строгой формуле (50).

Таким образом, если при использовании фотограмметрического метода для определения крена дымовой трубы её радиусы вверху и внизу известны с ошибкой 5 – 15 мм, поправочный коэффициент  $c$  найден с ошибкой 0,001, растровые координаты при обработке снимка определены с точностью 1 пкс, то СКО крена можно определить по простой формуле (см.[99])

$$m_K = \sqrt{\delta_B^2 + \delta_H^2}, \quad (58)$$

здесь  $\delta_B, \delta_H$  – метрическая цена пиксела вверху и внизу, мм.

Особый интерес представляет случай, когда референтная прямая располагается по центру верхнего сечения трубы (Рис. 64). Здесь расстояние от отвеса до оси трубы поверху  $B$  будет равно нулю и формула (25) примет вид

$$K = H\delta_H. \quad (59)$$

В этом случае в обработке снимка будет участвовать только нижнее сечение трубы, а СКО крена с учётом предыдущих выкладок будет равна

$$m_K = \delta_H. \quad (60)$$

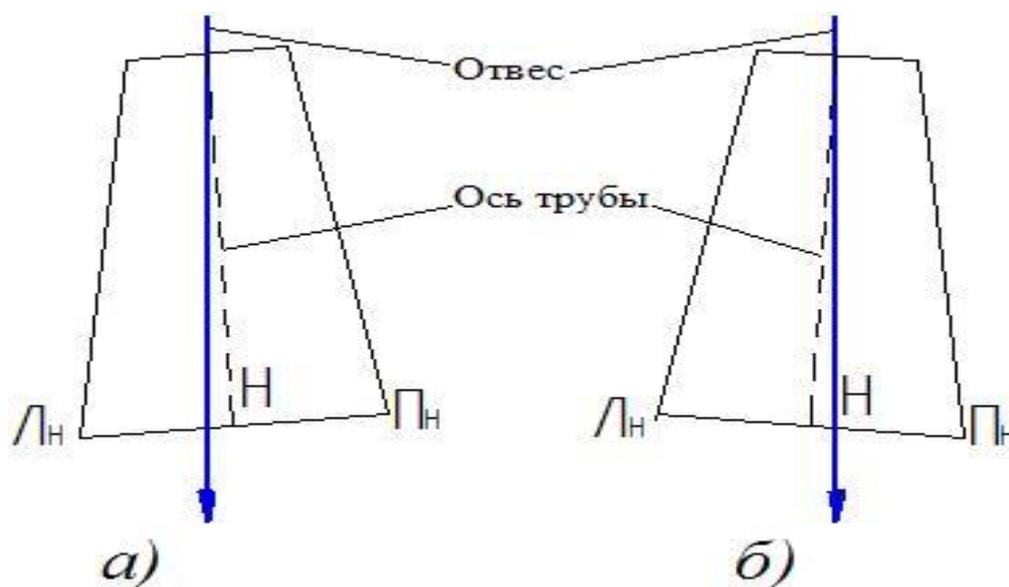


Рис.64. Расположения референтной прямой по центру верхнего сечения

Теперь величину  $n$  из формулы (35) представим в виде  $n = (\Phi - O)/R$ , и вычислим её СКО  $m_n$  посредством ошибок  $m_{\Phi-O}$  и  $m_R$

$$m_n^2 = \frac{1}{R^2} (m_{\Phi-O}^2 + n^2 m_R^2), \quad (61)$$

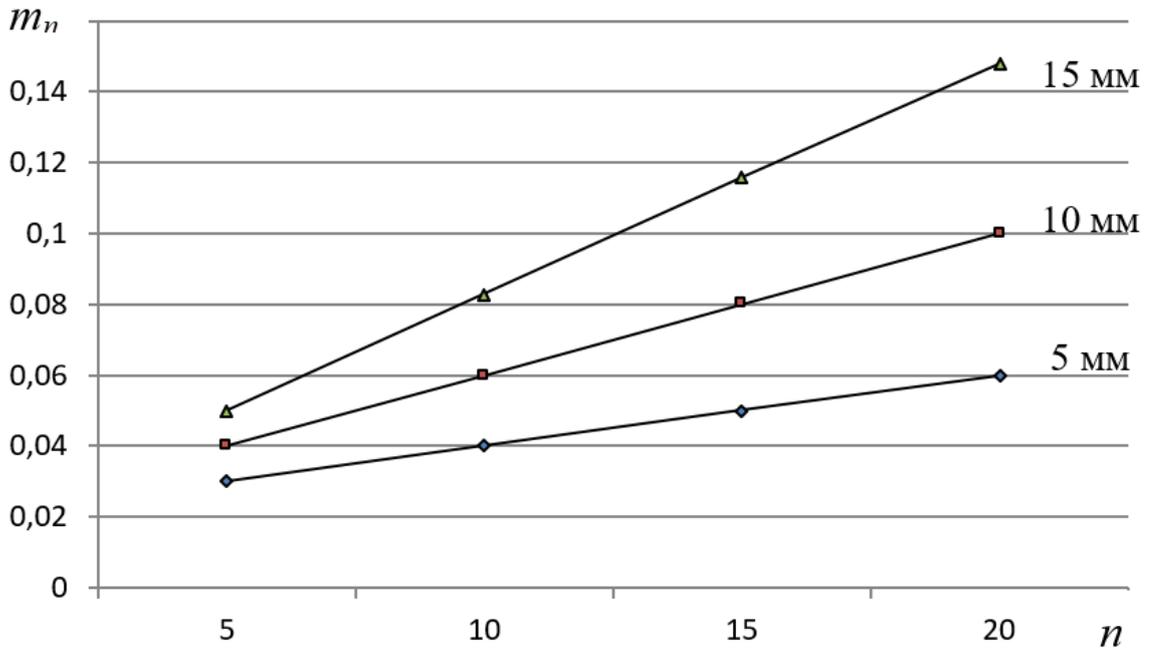
В Табл.20 на Рис.65 представлены результаты вычислений по соотношению (61).

Т а б л и ц а 20

### СКО $m_n$

$n$	$R$ , мм	$m_{\Phi-O}$ , мм	$m_R$ , мм	$m_n$
5	2000	50	5; 10; 15	0,03; 0,04; 0,05
10	2000	50	5; 10; 15	0,04; 0,06; 0,08
15	2000	50	5; 10; 15	0,05; 0,08; 0,12
20	2000	50	5; 10; 15	0,06; 0,10; 0,15

Табл. 19 и Табл. 20 демонстрируют слабую зависимость точности определения поправочного коэффициента  $c$  от величин ошибок  $m_{\Phi-O}$ ,  $m_R$  и  $m_n$ , тем более, что все они уменьшаются с увеличением радиуса сооружения.

Рис.65. Зависимость  $m_n$  от  $m_{\Phi-O}$  и  $m_R$ 

Измерения на снимке трубы (Рис.62) сделали возможным определение величины  $(Л+П) = 592$  пкс. Длина хорды (ЛП) вычислена по формуле (35) с учетом величины нижнего радиуса 2,0 м, затем вычислена цена пиксела в метрической системе по формуле (52),  $\delta_H = 6,8$  мм. Были вычислены по соотношению (57) значения СКО  $m_\delta$  при различных СКО определения радиуса  $m_R = 5; 10; 15$  мм и  $m_c = 0,001; 0,002; 0,003$ . Результаты приведены в (Табл.21).

Т а б л и ц а 21

СКО  $m_\delta$  цены одного пиксела

(Л+П), пкс	R, мм	c	$m_R$ , мм	$m_c$	$\delta_H$ , мм/пкс	$m_\delta$ , мм/пкс
592	2000	0,995	5;10;15	0,001;0,002;0,003	6,8	0,03;0,04;0,06

Из данных Табл.21 видно, что даже при  $m_R = 15$  мм и  $m_c = 0,003$  ошибка  $m_\delta$  не превысит 0,1 мм/пкс.

Измерения снимков, выполненных различными фотокамерами (*Nikon D3100*, *Nikon COOLPIX S9100*, *Sony Exmor R*, *Canon PowerShot S2 IS*) доказали допустимость точности 1 пкс при замере координат  $O_L, O, O_P$ . В силу этого формула (28) упрощается, при условии  $m_{O_H} = 1$  пкс

$$m_K^2 = \delta_H^2 + H^2 m_{\delta_H}^2, \quad (62)$$

где  $\delta_H$  цена пиксела в мм/пкс.

Формула (62) использована для определения  $m_K$  при значениях  $\delta_H = 5; 10; 15$  мм и  $H = 20; 40; 60$  мм/пкс (Табл.22).

Т а б л и ц а 22

### Среднеквадратичная ошибка определения крена $m_K$

$\delta_H$ , мм/пкс	$H$ , пкс	$m_{\delta}$ , мм/пкс	$m_K$ , мм
5	20; 40; 60	0,1	5,4; 6,4; 7,8
10	20; 40; 60	0,1	10,2; 10,8; 11,7
15	20; 40; 60	0,1	15,1; 15,5; 16,1

Табл. 22 показывает, что при постоянной  $m_{\delta}$  размеры  $H = 20; 40; 60$  пкс не оказывают заметного влияния на  $m_K$ , фактически равнолй метрической цене пиксела  $\delta_H$ , поэтому второе слагаемое в (62) может быть опущено.

В [80] приведены результаты определения крена дымовой трубы (Рис.63) координатным и линейно-угловым методами, значения которых оказались равными соответственно 12 и 18 мм. Те же измерения, выполненные фотограмметрическим методом, позволили получить результат 17 мм, что доказывает хорошую корреляции с другими методами.

### 3.4. Двухэтапный вариант метода определения крена высотных-сооружений

В разделе 3.1. отмечалось, что всем методам присуща их зависимость от застроенности территории, что затрудняет выбор точек, в которых допустима установка прибора для производства измерений в двух или более направлениях. Для компенсации этих недостатков можно использовать односторонние методы, позволяющие производить замеры только из одной точки установки прибора или, при закрытой нижней части сооружения, с двух расположенных в створе точек (так называемый двухэтапный метод). Сущность двухэтапного метода описана в работах [73, 149, 150, 156] (см. также схему на Рис.66).

Представляется перспективным применения подобного двухэтапного подхода для определения крена сооружений башенного типа с помощью фотограмметрического метода с применением неметрических фотокамер [85]. На Рис.66 поясняется последовательность применения данного варианта метода. Фотокамера устанавливается в точке Т, откуда фотографируется всё сооружение с отвесом, расположенным на некотором расстоянии перед объективом фотокамеры. Требованием к расположению отвеса при этом является его совпадение с центром верхнего сечения. При этом сооружение и отвес должны быть максимально отцентрированы по поверхности снимка с целью снижения влияния дисторсии.

Линия Т-О (Рис.66а) используется для отметки точка  $O_1$  на нижнем сечении сооружения. Далее фотографируется нижняя часть сооружения фотокамерой из точки  $T_1$ , расположенной на линии Т- $O_1$  вместе с точкой  $O_1$ .

Предлагаемый вариант фотограмметрического метода был использован (см. [91]) при определении крена дымовой трубы высотой 30 м и радиусами вверху 1,3 м и внизу 2,0 м, левая нижняя часть которой была заслонена транспортным средством (Рис.67).

В начале было осуществлено фотографирование с точки Т всей трубы по высоте вместе с горизонтальной рейкой, расположенной внизу (Рис.67а) с расстояния 11,1 м при расположении отвеса 3 м от объектива. В роли точки  $O_1$  выступала белая метка на трубе, отмеченная отвесом по рейке при отсчёте 1500 мм. После этого фотокамера была перемещена в точку  $T_1$ , расстояние до которой от трубы равно 3,6 м на линии Т- $O_1$  (Рис.66а), и было произведено фотографирование нижней часть трубы (Рис.67б), которая с точки  $T_1$  стала видимой.

Обработка обоих снимков, производилась в растровом редакторе *Paint*. Замерялись растровые координаты крайней левой точки трубы, отвеса и правой крайней ее точки уровне верхнего 1-2-3 и нижнего 4-5-6-7-8 сечений, соответственно у точек Л, О и П. Результаты измерений приведены в Табл.23 (графы 1...6).

Вычислялись растровые расстояния  $L_B$ ,  $P_B$  и  $L_H$ ,  $P_H$  (столбцы 7, 8) в виде разностей координат соответствующих точек  $O - Л$  и  $O - П$ . Также вычислялись растровые расстояния  $B = -(L_B + P_B)/2 = -(120 - 155)/2 = 17,5$  пкс и  $H = -(L_H + P_H)/2 = -(904 - 901)/2 = -1,5$  пкс (столбцы 9, 10) с учетом знаков величин  $L_B$ ,  $P_B$  и  $L_H$ ,  $P_H$ .

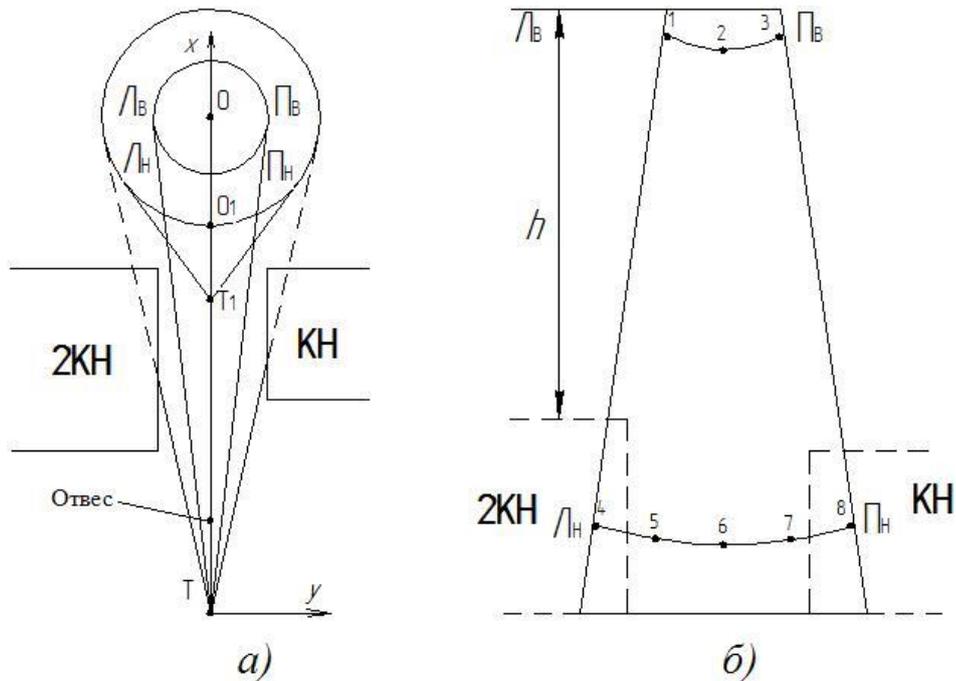


Рис.66. Схемы выполнения двухэтапного фото метода



Рис.67. Фотографии трубы с точки  $T$  (а) и с точки  $T_1$  (б)

**Растровые величины результатов замеров, пкс**

Замеры вверху			Замеры внизу			Верх	Низ	$B$	$H$	$K_y$
Л	О	П	Л	О	П	Лв Пв	Лн Пн			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1330	1450	1605	545	1449	2350	120 -155	904 -901	17,5	-1,5	19

Крен сооружения в пикселах по оси  $y$  (Рис.67,  $a$ ) равен  $K_y = B - H = 17,5 + 1,5 = 19$  пкс (графа 11). Для перевода его в метрическую систему необходимо перемножить  $K_y$  и метрическую цену пиксела, которая, в свою очередь, определяется путем деления известной метрической длины рейки на ее растровую длину. Растровая длина рейки, измеренная на Рис.67а, равна 1119 пкс, поэтому при 1,5-метровой рейке  $\delta = 1500/1119 = 1,340$  мм/пкс. Отсюда метрический крен трубы  $K_y = 19 \times 1,340 = 25$  мм.

Результаты этих измерений были сопоставлены с результатами измерений, полученными координатным (по схеме Рис.66б) и линейно-угловым (Рис.66а) методами этой же трубы с одной точки Т. Значения частных кренов по осям координат приведены в работе [80]. Частный крен  $K_y$ , равный 24 мм и 15 мм, отличается от результатов двухэтапного фотограмметрического метода (25 мм) на 1мм и на 10мм. В работе [79] на основе исследований показано, что такое расхождение находится в пределах допустимого, тем более что Руководство [105], определяет допустимые погрешности измерения крена сооружений высотой до 100 м не выше 30 мм.

При точном расположении референтной прямой строго в центре верхнего сечения сооружения (Рис.67а) в обработке снимка будет участвовать только нижнее сечение трубы, а частный крен  $K_y = H\delta$ . При этом крен  $K_y$  с использованием снимка (Рис.67б) вычисляется только на базе величин  $L_H$  и  $P_H$ . Определение цены  $\delta$  пиксела при этом можно выполнить поделив линейный размер нижнего сечения на его растровый размер.

Очевидно, что точность определения крена сооружения АВ (Рис.68) зависит от погрешности установки фотокамеры в точке  $T_1$  (нестворность фотокамеры). Рассмотрим это влияние.

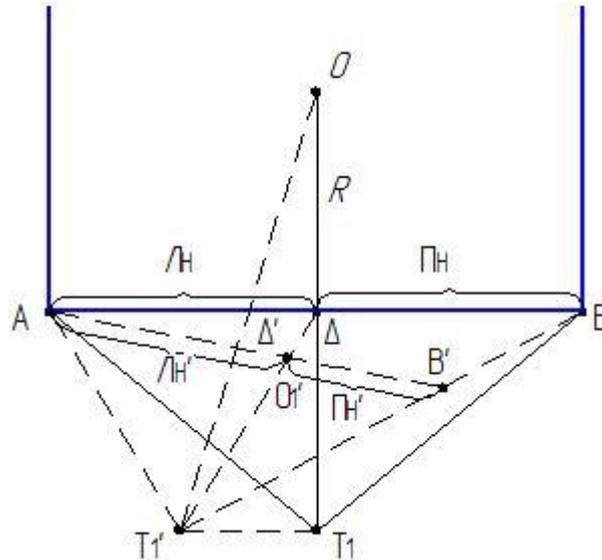


Рис.68. Схема к определению влияния нестворности фотокамеры

Смещение точки установки фотокамеры  $T_1$  с линии  $T_1-O$  на величину  $T_1T'_1 = l$  приводит к замене корректных значений  $L_H$  и  $\Pi_H$  на новые значения  $L_{H'}$  и  $\Pi_{H'}$ , что, в свою очередь, внесет невязку  $\Delta'$  в вычисленную вместо значения крена  $H = -(L_H + \Pi_H)/2$  искаженное значение  $H = -(L_{H'} + \Pi_{H'})/2$ .

Поскольку угол весьма мал  $T'_1OT_1$ , можно считать, что  $\Delta' \approx \Delta$  (см. Рис.68), тогда используя принцип подобия треугольников можно записать

$$\Delta = \frac{lR}{OT_1} = lk, \quad (63)$$

здесь  $k = R/OT_1$  – сомножитель, зависящий только от расстояния от фотокамеры до сооружения, однако существенно влияющий на величину  $\Delta$ . Его уменьшений с увеличением расстояния снижает влияние величины  $l$  на  $\Delta$ . В Табл.24 приведены значения погрешности  $\Delta$ , вычисленные при  $l = 5; 10; 15; 20$  мм и  $k = 1/2; 1/3; 1/4; 1/5$ .

### Погрешности $\Delta$ в зависимости от $l$ и $k$

$l$ , мм	Погрешность $\Delta$ , мм			
	$k = 1/2$	$k = 1/3$	$k = 1/4$	$k = 1/5$
1	2	3	4	5
5	2,5	1,7	1,2	1
10	5	3,3	2,5	2
15	7,5	5	3,8	3
20	10	6,7	5	4

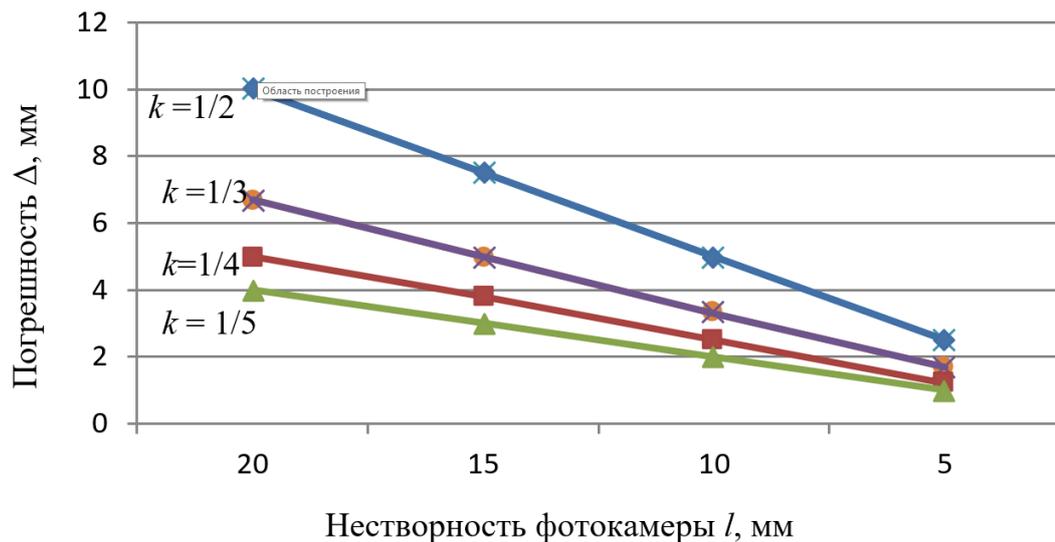


Рис.69. Зависимости погрешности  $\Delta$  от  $l$  и  $k$

Данным из Табл.14 представлены также в графическом виде на Рис.69, откуда видно, что погрешности  $\Delta$  от величины нестворности  $l$  в диапазоне 5 – 20 мм и коэффициента  $k$ , с увеличением расстояния  $T_1O_1$  от  $1R$  до  $4R$  уменьшаются с 2,5 – 10 мм до 1 – 4 мм.

Из Рис.69 видно, что при точности 5 мм центрирования фотокамеры в точке  $T_1$  погрешность определения крена не превышает 1-2 мм.

Таким образом, можно считать доказанной эффективность и достоверность двухэтапного варианта фотограмметрического метода определения крена сооружений башенного типа. Следует отметить, что изложенный двухэтапный вариант измерений применим практически к любому методу измерений ГППФ высотных сооружений, в том числе и в сочетании разных методов между собой.

### 3.5. Вариант фотограмметрического метода с продолженным отвесом

Обязательным условием использования шнурового отвеса, расположенного на фоне сооружения, в качестве вертикальной референтной линии является изображение последнего в полную высоту (Рис.67а). Для максимального исключения влияния дисторсии объектива на результаты измерения, необходимо стремиться к тому, чтобы референтная линия располагалась как можно ближе к оси сооружения, а отвес был бы расположен как можно дальше от фотокамеры. Эти условия являются противоречивыми, поэтому референтная линия зачастую может охватывать не все изображение сооружения, а только его часть (Рис.70а). Наиболее простое решение данной проблемы может быть найдено путем продолжения референтной линии в растровом редакторе как это сделано на Рис.70б в виде пунктирной линии. Опыт показывает, что такую экстраполяцию референтной линии можно выполнять с достаточно высокой степенью точности. Данная процедура позволяет в полной мере использовать описанные выше подходы к использованию фотограмметрических методов. Этот вариант метода получил название вариант с продолженным отвесом.

В качестве эксперимента данный вариант, названный методом с продолженным отвесом, был использован в измерениях параметров дымовой трубы (Рис.70а) с использованием фотокамеры *Panasonic DMC-TZ25*. Экстраполяция отвеса на всю высоту трубы (Рис.70б) была выполнена в редакторе *Paint*. В Табл.25 представлены растровые величины общего и шести частных кренов, полученные в результате измерений.

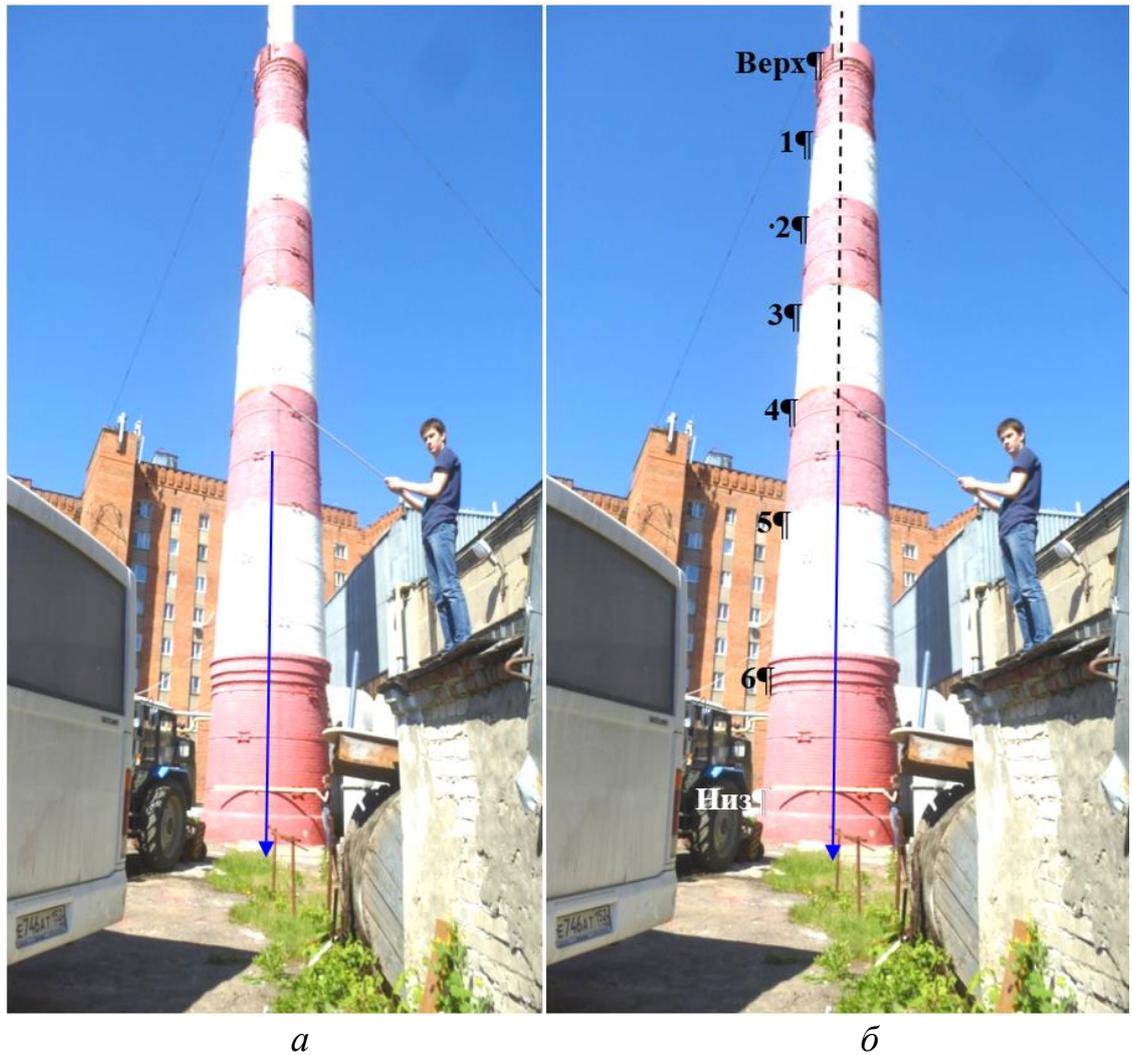


Рис.70. Фотография трубы с отвесом (а) и полной референтной прямой (б)

Т а б л и ц а 25

**Результаты определения крена по продолженному отвесу**

Сечения	Л	О	П	Лв,с,н	Пв,с,н	Вв,с,Н	К=В-Н
1	2	3	4	5	6	7	8
Верх	857	915	997	58	-82	12	14
1	847	911	997	64	-86	11	13
2	828	907	1004	79	-97	9	11
3	809	902	1010	93	-108	7,5	9,5
4	794	899	1015	105	-116	5,5	7,5
5	764	890	1025	126	-135	4,5	6,5
6	733	882	1034	149	-152	1,5	3,5
Низ	701	875	1045	174	-170	-2	0

Кроме того, были осуществлены эксперименты с программой Plumb-bob. Как отмечено в разделе 1.5. (рис. 7), данная программа обеспечивает

постоянное наличие на фотоснимках вертикальной линии, которая может выступать в качестве референтной линии.

На Рис.70а представлено фотоизображение, полученное на планшете, с наличием вертикальной линии, сгенерированной программой Plumb-bob. Согласно схеме применения фотограмметрического метода с продолженным отвесом, эта линия продолжена на всю высоту трубы в растровом редакторе Paint. Однако, поскольку на снимке Рис.71а труба изображена не по всей ее высоте, проделать это возможно двумя способами. При первом способе измеряются растровые расстояния от вертикальной линии до краев трубы (хотя бы в двух точках по высоте) и переносятся на снимок всей трубы по высоте (Рис.71б), учитывая разные масштабы обоих снимков. Далее эта линия продляется на всю высоту сооружения.

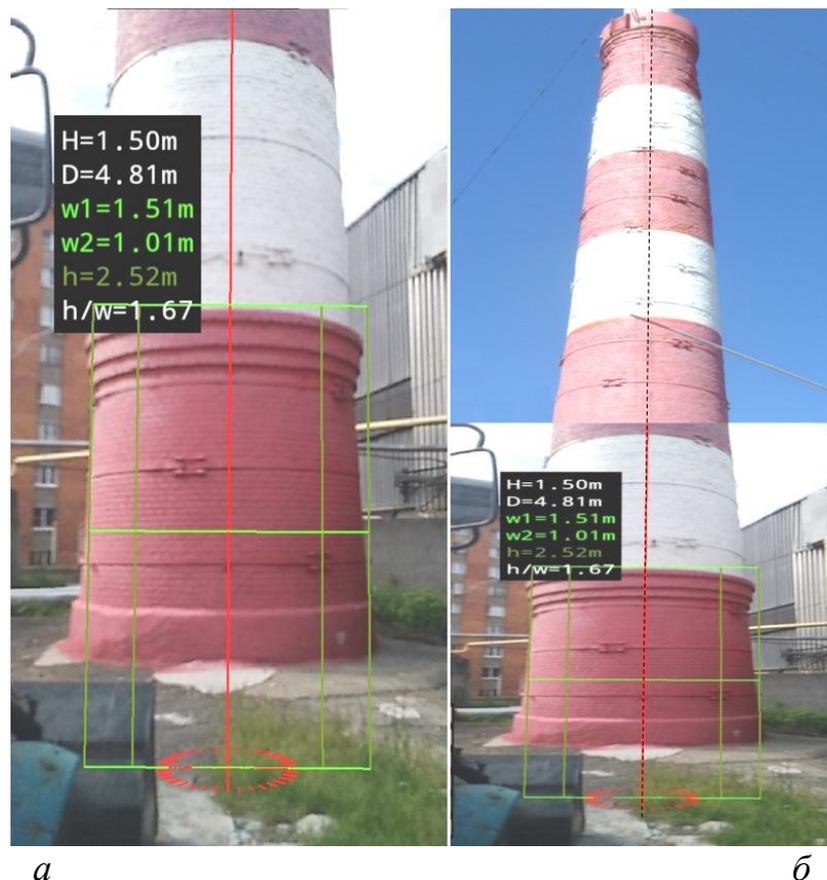


Рис.71. Фотография трубы в программе Plumb-bob (а) и полной референтной прямой (б)

Во втором способе производится наложение снимка части трубы Рис.71а на снимок всей трубы Рис.71б, подгоняя масштабы и контуры сооружения на изображениях друг к другу максимально близко. В Табл.26 приведены величины общего растровых и шести растровых частных кренов.

Т а б л и ц а 26

### Результаты замеров крена с применением программы Plumb-bob

Сечения	Л	О	П	Лв,с,н	Пв,с,н	Вв,с,Н	К=В-Н
1	2	3	4	5	6	7	8
Верх	361	427	515	(25)	-88	11	10
1	356	426	518	70	-92	11	10
2	338	425	529	87	-104	8,5	7,5
3	321	424	540	103	-116	6,5	5,5
4	304	422	551	118	-129	5,5	4,5
5	281	422	571	141	-149	4	3
6	238	421	607	183	-186	1,5	0,5
Низ	228	420	614	192	-194	1	0

По данным Табл.25 и 26 построены графики, представленные на Рис.72. Обе кривые на Рис.72 конгруэнтны с расхождением ~3 пиксела. Одним из объяснений их несовпадения может быть неточность совмещения снимков на Рис.71а и Рис.71б.

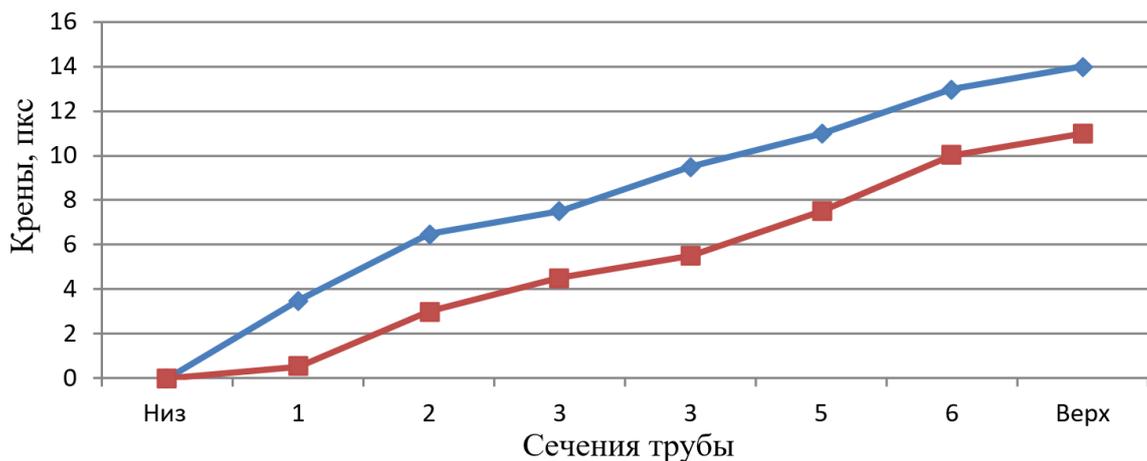


Рис.72. Частные и общий крен трубы

Было исследовано влияние соотношения длины отвеса, изображённого на снимке, с высотой сооружения на результаты измерений. С этой целью были выполнены эксперименты фотокамерой *Panasonic DMC-TZ25*. Дымовая труба фотографировалась из одной точки с размещением отвеса последовательно на расстояниях 1, 2, 3, ..., 19, 20 м. Некоторые снимки представлена на Рис.73. На первой фотографии (Рис.73а) нить отвеса соответствовала всей высоте трубы. На всех других фотографиях изображения отвеса продлялись на всю высоту трубы (пунктирные линии на Рис.73б, в, г, д, е).

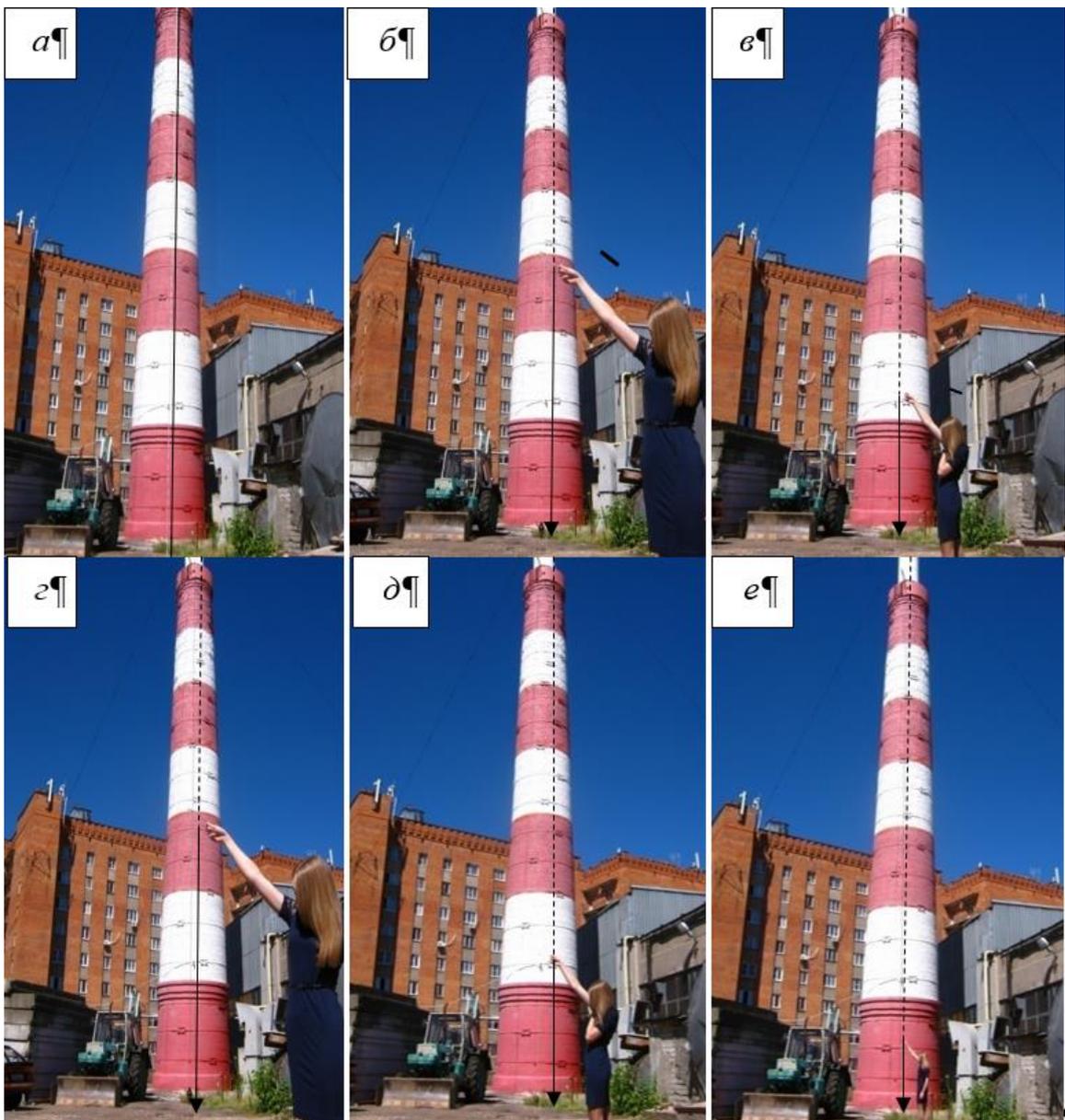


Рис.73. Фотографии к методу продолженного отвеса

После обработки фотографий с помощью редактора *Paint* полученные значения крена сравнивались со значениями, найденным по первой фотографии (Рис.73а), который был равен 15 пкс. Как следует из Рис.74, при соотношении длины отвеса и высоты трубы до 25% отклонения кренов от 15 пкс не превышают 2 пкс. При уменьшении этого соотношения величина отклонений растет и может достигать 15-20 пкс.

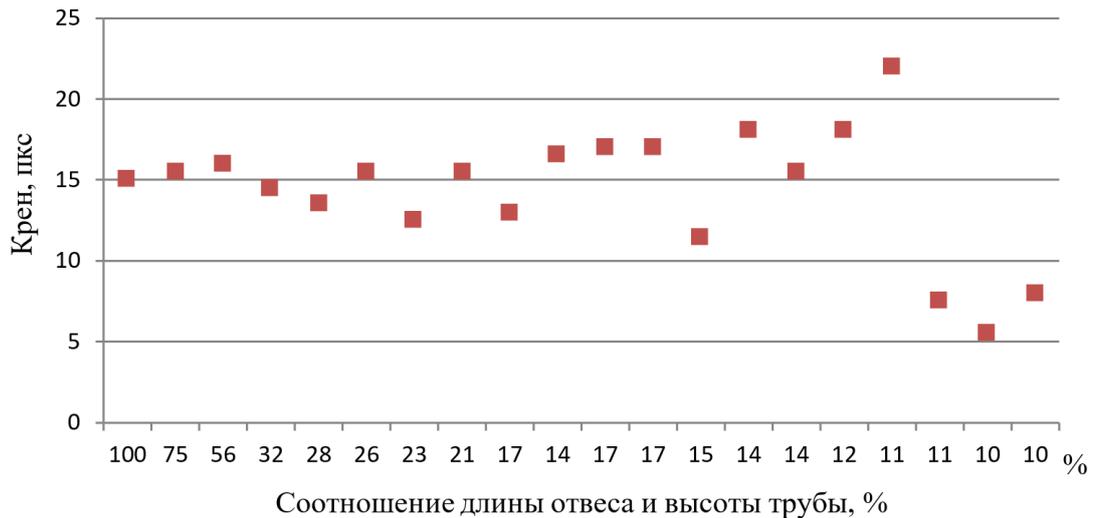


Рис.74. Зависимость точности определения крена от соотношения длины отвеса и высоты трубы

Вариант метода продолженного отвеса по результатам исследований можно признать эффективным.

### 3.6. Применение фотограмметрического метода для одновременного определения крена куста дымовых труб

Были также проведены экспериментальные исследования применения фотограмметрического метода для определения крена куста металлических труб постоянного диаметра, расположенных в ряд (Рис.75), и в виде четырёхугольника (Рис.76) и др. При обработке фотографий на Рис.75 измерялись растровые координаты левого, правого края каждой трубы и референтной линии ( $L_i$ ,  $P_i$ ,  $O_i$ ) вверху в точке 1, в средней части на уровнях 2, 3, 4, 5 и внизу в точке 6

Вычислялись растровые расстояния от отвеса до оси каждой трубы  $S_i = [O_i - (L_i + \Pi_i)/2]$ .

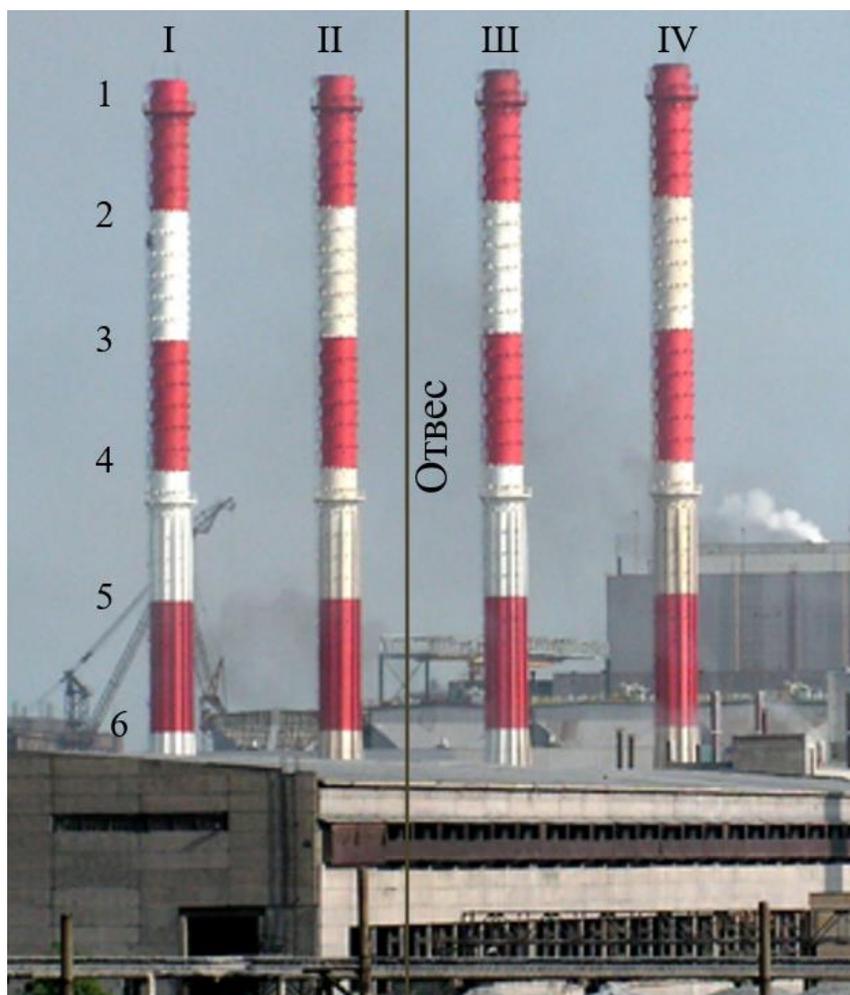


Рис.75. Фотография отвеса на фоне куста дымовых труб

Общий и промежуточные растровые крены трубы  $K_i$  равны  $K_{1,2,3,4,5} = S_{1,2,3,4,5} - S_6$  (с учётом их знака). Соответствующие крены в линейные единицы равны  $K_{мм} = K_{пкс} \delta$ , где  $\delta$  – цена пиксела мм/пкс. Величина  $\delta$  вычисляется путем деления диаметра трубы, который считается известным, на величину  $(\Pi_i - L_i)$ .

Полученные результаты сведены в Табл.27.

### Результаты определения крена куста труб

Сече- ния	Труба I			Труба II			Труба III			Труба IV		
	Л	П	К	Л	П	К	Л	П	К	Л	П	К
1	53	(25)	1	112	124	1,5	169	181	2	228	241	1,5
2	53	(25)	1	112	124	1,5	168	181	2,5	228	241	1,5
3	53	(25)	1	113	125	0,5	168	182	2	228	242	1
4	53	67	0,5	113	125	0,5	169	182	1,5	228	242	1
5	53	68	0	112	125	1	169	184	0,5	228	243	0,5
6	53	68	0	113	126	0	170	184	0	229	243	0

Из Табл.27 видно, что значения общего крена труб равны 1-2 пкс, что соответствует точности определения растровых координат  $L_i$ ,  $P_i$ ,  $O_i$ . Для определения крена труб ещё и по перпендикулярному направлению следует выполнить фотографирование их ряда так, чтобы все трубы были видны на фотографии.



Рис.76. Фотография четырёхугольного куста дымовых труб

Следует отметить, что постоянство диаметра трубы на всей её высоте значительно упрощает измерения.

### 3.7. Выводы по 3 главе

Разработан вариант фотограмметрического метода определения крена сооружений башенного типа с использованием шнурового отвеса в качестве вертикальной референтной прямой, чем обеспечивается простота исполнения и обработки фотоснимков. На примере дымовой трубы рассмотрены все возможные варианты расположения отвеса относительно её оси и показана методика вычисления крена сооружения по результатам обработки снимка. В результате экспериментальных исследований установлено, что местоположение отвеса оказывает решающее влияние на точность определения крена. Наиболее рациональным признано расположение отвеса по центру верхнего сечения трубы и показана методика учёта поправки за счёт неточности этого расположения.

Разработан вариант фотограмметрического метода для дискретного и непрерывного мониторинга крена сооружений башенного типа. В результате экспериментальных исследований установлены условия съёмки, позволяющие исключать влияния дисторсии фотообъектива на получаемые результаты.

Разработан математический аппарат оценки точности фотограмметрического метода для определения крена высотных сооружений. Выполненные исследования четырёх различных фотокамер показали, что результаты определения крена коррелируют с результатами, полученными другими методами.

Путем проведения экспериментальных исследований доказана надежность и достоверность двухэтапного варианта фотограмметрического метода определения крена сооружений башенного типа.

Установлена степень влияния соотношения длины отвеса и высоты башенного сооружения на точность определения его крена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа современных методов измерения ГППФ башенных сооружений разработана их классификация, которая предусматривает перспективные пути их развития путём совершенствования известных и разработки новых методов. Показано как совместное использование горизонтального и вертикального базисов может использоваться при контроле плано-высотного положения подкрановых рельсов путем обработки фотоизображений.

2. Разработан вариант бесконтактного фотограмметрического метода определения расстояний по фотоснимку, позволяющий по заданному расстоянию до точки на протяжённом объекте найти её положение на снимке, или измерять расстояние до любой точки такого объекта на снимке, или между любыми его точками.

3. Разработана классификация методов определения ширины рельсовой колеи мостовых кранов. Разработан вариант фотограмметрического метода, позволяющий с одной точки установки фотокамеры и за один проход мостового крана измерять одновременно непрямолинейность подкрановых рельсов контролируемого участка пути, ширину колеи любого размера и траекторию движения крана.

4. Разработан вариант фотограмметрического метода с изображением шнурового отвеса в качестве вертикальной референтной прямой для определения крена сооружений башенного типа и его двухэтапный вариант. Рассмотрены все возможные варианты расположения отвеса относительно оси сооружения. Выполнены экспериментальные исследования с целью определения степени влияния местоположения отвеса относительно оси сооружения на точность определения его крена. Разработаны варианты как для дискретного, так и для непрерывного мониторинга крена сооружений башенного типа на основе метода обработки фотоснимков.

5. Разработан математический аппарат для вычисления и оценки точности крена и метрической цены пиксела.

6. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают применимость и достоверность разработанных методов обработки фотоизображений для определения крена башенных и других крупногабаритных и труднодоступных для непосредственных измерений объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров, Б.Ф. О способах получения составляющих вектора крена при техническом обследовании антенно-мачтовых сооружений [Текст] / Б.Ф. Азаров, П.П. Мурзинцев // Геодезия и картография. – 2016, – № 9. – С. 13 – 17.
2. Анучин, Н.И. Определение изменений крена высотных сооружений с помощью приборов вертикального проектирования [Текст] / Н.И. Анучин, В.П. Поляков, В.Ф. Шмидт // Воронежский лесотехнический ин-т. – Воронеж, 1988. – 9 с. (Рукопись деп. в ОНИПР ЦНИИГАиК 03.06.88, №321-гд88).
3. Анучин, Н.И. Опыт определения отклонений оси гранбашен от вертикали [Текст] / Н.И. Анучин, Л.П. Федорина, Л.И. Васильева // Воронежский лесотехнический ин-т. – Воронеж, 1988. – 4 с. (Рукопись деп. в ОНИПР ЦНИИГАиК 03.06.88, №325-гд88)
4. Атакишиев, А.А. О планировании геодезических наблюдений за колебаниями башенных сооружений [Текст] / А.А. Атакишиев // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. – 1987. – № 46. – С. 3–6.
5. Баландин, В.Н. Вероятность нахождения определяемой точки в круге погрешностей [Текст] / В.Н. Баландин // Геодезия и картография. – 1983. – № 5. – С. 14-15.
6. Барсуков, К.Г. Исследование возможностей неметрических цифровых фотоаппаратов при решении инженерно-строительных задач [Текст] / К. Г. Барсуков // Науч. вестн. Воронежск. гос. архит.-строит. ун-та. – 2007. – № 3. – С. 82 – 85.
7. Бауск, Е.А. Оценка крена дымовых труб по результатам безреперного нивелирования [Текст] / Е.А. Бауск, В.К. Капустин // Геод. работы при монтаже и эксплуат. технол. оборуд. Материалы Всес. науч.-техн. конф. Новосибирск, 1978. – М. – 1980. – С. 135 – 136.
8. Бикташев, М.Д. Башенные сооружения. Геодезический анализ осадки, крена и общей устойчивости положения [Текст] / М.Д. Бикташев // Учебное пособие для студентов. – М. – Изд-во АСВ. – 2006. – 376 с.
9. Болтовский, В.Г. Определение кренов радиотелевизионных башен и мачт / В.Г. Болтовский // Томск. политехн. ин-т. – Томск, 1980. – 6 с. (Рукопись деп. в ВИНТИ 24.03.81, №49-81 Деп).
10. Бондаренко, А.В. Анализ результатов определения крена дымовой трубы [Текст] / А.В. Бондаренко // Геодезия и фотограмметрия. – Ростов н/Д, 1983. – С. 84 – 87.
11. Бондаренко, А.М. Определение крена высотного сооружения методом координат [Текст] / А.М. Бондаренко, Р.В. Мищенко // Геодезия и картография. – 2012. – № 5. – С. 3–8.
12. Большаков, В.Д. Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам [Текст] / В.Д. Большаков, Г.П. Левчук, В.Е. Новак и др. – М.: Недра, –1980. – 781 с.

13. Буш, В.В. Геодезические работы при строительстве сооружений башенного типа [Текст] / В.В. Буш, В.В. Калугин, А.И. Саар– М.: Недра. – 1985. – 216 с.
14. Буюкян, С.П. Видеоизмерение в инженерной геодезии [Текст] / С.П. Буюкян // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – № 6. – С. 27 – 34.
15. Буюкян, С.П. Видеоизмерительная система контроля координат рабочей точки антенны [Текст] / С.П. Буюкян // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2003. – №1. – С. 9 – 13.
16. Бызгу, Д.Г. Влияние нестворности установки теодолита на точность вертикального проектирования [Текст] / Д.Г. Бызгу // Геодезия и картография. – 1985. – №4. – С. 26–27.
17. Вагин, В.А. Определение крена по результатам геометрического нивелирования [Текст] / В.А. Вагин, Р. Мшреф // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1993. – № 3. – С. 22– 30.
18. Визиров, Ю.В. Наклонное проектирование при определении крена высокого сооружения [Текст] / Ю.В. Визиров // Геодезия и картография. – 2006. – № 3. – С. 15 – 19.
19. Ганьшин, В.Н. Анализ способов определения крена промышленных дымовых труб [Текст] / В.Н. Ганьшин, И.А. Шувалов // Геодезические методы определения крена промышленных дымовых труб. – Л., 1981. – С. 9 – 20. (Рукопись деп. в ЦНИИГАиК 1 окт. 1981 г., №№ 65-81 Деп).
20. Ганьшин, В.Н. Оценка точности определения местоположения пункта одним числом [Текст] / В.Н. Ганьшин, В.М. Лазарев // Геодезия и картография. – 1985. – № 8. – С. 43-45.
21. Герцвольф, В.Н. Методика определения оптимальной периодичности проверки вертикальности башен РРЛ [Текст] / В.Н. Герцвольф // Исследования по прикладной геодезии и фотограмметрии. – М., 1986. – С. 65 – 69.
22. Головкин, Г.С. Опыт геодезического контроля радиотелевизионных башен и мачт в Кузбассе [Текст] / Г.С. Головкин, А.Д. Трубочанинов, А.П. Дроздова // Кузбасский политехнический ин-т. – Кемерово, 1988. – 9 с. (Рукопись деп. в ОНИПР ЦНИИГАиК 09.03.88, №301-гд 88).
23. Губенко, Е.Н. Влияние некоторых факторов на результаты геодезических наблюдений за кренами промышленных труб [Текст] / Е.Н. Губенко, А.С. Ким, М.А. Красавцев // Геодезия и картография. – 1978. – № 6. – С. 34 – 39.
24. Губенко, Е.Н. Обобщение геодезических методов определения крена дымовых труб промышленных предприятий / Е.Н. Губенко, А.С. Ким, М.А. Красавцев // Геодезия и картография. – 1978. – № 10. – С. 39 – 49.
25. Джарроуш, Д. Бытовая цифровая камера как инструмент для точных геодезических измерений [Текст] / Д. Джарроуш // Геопрофи. – 2014. – № 4. – С. 46 – 49.

26. Зайцев, А.К. Геодезические методы исследования деформаций сооружений [Текст] / А.К. Зайцев, С.В. Марфенко, Д.Ш. Михелев – М.: Недра. – 1991. – 272 с.
27. Зеленский, А.М. Об определении крена высоких сооружений башенного типа [Текст] / А.М. Зеленский // Геодезия и картография. – 1974. – № 12. – С. 30 – 33.
28. Кала, В.В. Определение крена труб видоизмененным способом горизонтальных углов [Текст] / В.В. Кала // Геодезия и картография. – 1983. – №6. – С. 41 – 42.
29. Каменная, Л.И. Определение деформаций башенных сооружений [Текст] // Проблемы экологии в геодезии и картографии / Л.И. Каменная – М., 1992. – С. 61– 64.
30. Кацарский, И.С. О цифровой фотограмметрии и перспективах её применения [Текст] / И.С. Кацарский // Геопрофи. – 2006. – № 6. – С. 4 – 8.
31. Квасневский, В.А. Определение кренов сооружений по трем осадочным маркам [Текст] / В.А. Квасневский // Геодезическое обеспечение строительства. – М., 1987. – С. 111– 113.
32. Кетков, Ю.Л. MatLab 7. Программирование, численные методы [Текст] / Ю.Л. Кетков, А.Ю. Кетков, М.М. Шульц // «БХВ – Петербург». Санкт – Петербург, 2005, – 752 с.
33. Кислый, И.М. Определение центра инженерного сооружения цилиндрической или конусообразной формы [Текст] / И.М. Кислый, В.С. Сова // Геодезия и картография. – 1969. – № 12. – С. 29 – 31.
34. Концевой, С.В. Организация наблюдений за колебаниями Тульской телевизионной мачты [Текст] / С.В. Концевой, Ю.В. Попов, В.Ф. Маршалко // Геодезические методы определения крена промышленных дымовых труб. – Тула, 1981. – С. (25) – 70. (Рукопись деп. в ЦНИИГАиК 1 окт. 1981 г., №№ 65-81 Деп.
35. Куштин, В.И. Использование теоремы перспективы при определении прямолинейности деталей сооружений [Текст] / В.И. Куштин // Геодезия и фотограмметрия: Сб. науч. трудов. – Ростов н/Д: РГАС, – 1996. – С. 85–89.
36. Ламбин, Н.Е. Метод фоторегистрации при определении крена высотных сооружений [Текст] / Н.Е. Ламбин, П.И. Соловей // Геодезическое обеспечение строительства. – М., 1987. – С. 121– 124.
37. Ларченко, В.Г. Упрощенный способ геодезических наблюдений для оперативного контроля измерений крена дымовых труб [Текст] / В.Г. Ларченко, О.И. Толсторебров // Проблемы экологии в геодезии и картографии. – М., 1992. – С. 55– 57.
38. Лобов, М.И. Влияние солнечной радиации на крен высотных сооружений башенного типа [Текст] / М.И. Лобов // Геодезические методы определения крена промышленных дымовых труб. – Макеевск, 1981. – С. 2 – 8. (Рукопись деп. в ЦНИИГАиК 1 окт. 1981 г., № 65-81 Деп).

39. Лобов, М.И. Разработка оптимального способа определения деформационных характеристик башенных сооружений [Текст] / М.И. Лобов // Геодезическо-маркшейдерские работы в стр.-ве. – М. – 1989. – С. 69-78.

40. Лобов, М.И. Комплексный подход к изучению деформаций сооружений башенного типа под влиянием внешних факторов [Текст] / М.И. Лобов // Проблемы экологии в геодезии и картографии. – М., 1992. – С. 57–61.

41. Луцешина, Г.В. Исследование точности определения кренов сооружений способом горизонтальных и вертикальных углов [Текст] / Г.В. Луцешина, И.П. Наборщикова, И.А. Столбов // Пермский политехнический ин-т. – Пермь, 1990. – 17 с. (Рукопись деп. в ВИНТИ 04.04.90, №1816 – В90).

42. Мангушев, А.А. О точности определения крена телебашни [Текст] / А.А. Мангушев, С.Т. Заикин // Геодезия и картография. – 1981. – №11. – С. 37 – 38.

43. Марфенко, С.В. Геодезические работы по наблюдению за деформациями сооружений: Учебное пособие [Текст] / С.В. Марфенко // М.: Изд-во Московского государственного ун-та геодезии и картографии. 2004. – 35 с.

44. Марфенко, С.В. Геодезические работы при изысканиях и строительстве промышленных сооружений: Учебное пособие [Текст] / С.В. Марфенко // М.: Изд-во Московского государственного ун-та геодезии и картографии. 2004. – 48 с.

45. Мархвида, В.Г. Определение осадок, горизонтальных смещений и кренов сооружений методом квазиснимков [Текст] / В.Г. Мархвида // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1984. – № 1. – С. 84– 89.

46. Мошинский, И.Е. Совершенствование методики определения деформаций сооружений с использованием объективной призменной насадки [Текст] / И.Е. Мошинский, Л.И. Каменная // Инженерная геодезия. – 1991. – №34. – 72 – 75.

47. Найденов, Д.А. Общность способов определения кренов башенных сооружений геодезическими методами [Текст] / Найденов Д.А. // Геодезическое обеспечение строительства. – 1987. – С. 114 – 120.

48. Найденов, Д.А. Предрасчет точности геодезических измерений при определении кренов башенных сооружений [Текст] / Найденов Д.А. // Разработка новых методов и средств геометрического обеспечения промышленного и гражданского строительства. Московский инженерно-строит. ин-т.– М., 1989. – С.16 – 30.

49. Нгуен Куанг Так. Учёт влияния внешних факторов при определении координат ствола башни гиперболической формы [Текст] / Нгуен Куанг Так // Московский государственный университет геодезии и картографии. – М., 1996. – 7 с. (Рукопись деп. в ОНИПР ЦНИИГАиК 20.03.96, №599-гд96).

50. Нестеренок, В.Ф. О точности упрощенных способов определения крена башенных сооружений [Текст] / В.Ф. Нестеренок // Геодезия и картография. – 1977. – № 8. – С. 31-34.

51. Нестеренок, М.С. О точности определения крена сооружений башенного типа (высотой до 150 м) [Текст] / М.С. Нестеренок, В.Н. Вексин // Геодезические методы определения крена промышленных дымовых труб. – Минск, 1981. – С. 21 – 23. (Рукопись деп. в ЦНИИГАиК 1 окт. 1981 г., №№ 65-81 Деп).

52. Нестеренок, М.С. Особый случай определения оси симметрии дымовых труб [Текст] / М.С. Нестеренок, В.Н. Вексин, В.Ф. Нестеренок // Геодезические методы определения крена промышленных дымовых труб. – Минск, 1981. – С. 46 – 57. (Рукопись деп. в ЦНИИГАиК 1 окт. 1981 г., №№ 65-81 Деп).

53. Нестеренок, С.Ф. О некоторых подходах к оценке результатов измерения наклона башенных сооружений [Текст] / С.Ф. Нестеренок // Геодезия и картография. – 1991. – № 6. – С. 17-20.

54. Нестеренок, В.Ф. О расчете температурных прогибов башен круглого сечения [Текст] / В.Ф. Нестеренок // Геодезия и картография. – 1993. – № 10. – С. 16 – 20.

55. Никифоров, Б.И. Количественная оценка качества геодезических работ [Текст] / Б.И. Никифоров // Геодезия и картография. – 1985. – № 6. – С. 22-24.

56. Николаев, А.Ф. Экономическая эффективность определения крена дымовых труб многократной прямой засечкой [Текст] / А.Ф. Николаев // Геодезия и фотограмметрия. – Ростов н/Д, 1980. – С. 129-132.

57. Никонов, А.В. Современные способы определения кренов промышленных дымовых труб [Текст] / А.В. Никонов, В.Г. Никонов // Геодезия и картография. – 2015. – № 4. – С. 13-21.

58. Нишанбаев, Н. Опыт определения деформации минарета [Текст] / Н. Нишанбаев // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. – № 2. – С. 46– 49.

59. Осоловский, В.П. О качестве работ по экспертизе промышленной безопасности и восстановлению работоспособного состояния дымовых и вентиляционных труб. Промышленная безопасность дымовых и вентиляционных промышленных труб [Текст] / В.П. Осоловский // Сб. науч. тр. по материалам консультац.-метод. семинара, 19 июня 2008. – Уфа. БАЭ. 2008. – 126 с.

60. Павлов, Ф.Ф. Кривые средних ошибок [Текст] / Ф.Ф. Павлов // Науч. тр. МГИ. – 1950, вып. 8. – С. 373-391.

61. Падве, В.А. Вариант решения прямой угловой засечки [Текст] / В.А. Падве // Исследования по совершенствованию инженерно-геодезических работ: Межвуз. сб. – Новосибирск, 1985. – С. 78 – 80.

62. Падве, В.А. Вариация на тему прямой засечки [Текст] / В.А. Падве // Геодезия и картография. – 1999. – № 9. – С. 47 – 48.

63. Пимшин, Ю.И. О принципах формирования и средствах реализации референтных прямых [Текст] / Ю.И. Пимшин, Х.К. Ямбаев // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1994. № 6. - С. 3 – 10.

64. Потюхляев, В.Г. Исследование влияния траектории движения мостовых кранов на точность геодезического контроля подкрановых путей [Текст] / В.Г. Потюхляев, Л.Г. Солопов // Маркшейдерское дело и геод.: Сб. науч. трудов. – Л., изд. ЛГИ., – 1987. – С. 79–81.

65. Правила безопасности при эксплуатации дымовых и вентиляционных промышленных труб (утверждено постановлением Госгортехнадзора РФ от 3.12.2001 г. № 56). – 15 с.

66. Радов, С.Г. Комбинированный способ определения крена инженерных сооружений башенного типа [Текст] / С.Г. Радов, В.П. Стукальский, В.Г. Ларченко // Геодезия и картография. – 1977. – № 12.– С. 35–38.

67. Раинкин, В.Я. Определение деформаций сооружений башенного типа посредством измерения горизонтальных и вертикальных углов с одного опорного пункта [Текст] / В.Я. Раинкин // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1972. – вып. 3. – С. 46 – 49.

68. Раинкин, В.Я. Вынос центра башни на монтажный горизонт [Текст] / В.Я. Раинкин // Геодезия и картография. – 1982. – № 10.– С. 32–33.

69. Раинкин, В.Я. О выборе методики проектирования центра башни на монтажный горизонт в случае воздействия внешних факторов [Текст] / В.Я. Раинкин // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1984. – вып. 1. – С. 27 – 30.

70. Раинкин, В.Я. Определение изгиба башенных сооружений под воздействием солнечной радиации [Текст] / В.Я. Раинкин // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. – Львов, 1988. – № 48. – С. 74-77.

71. Раскаткин, Ю.Н. Определение радиуса сооружений круглой формы фотографическим способом [Текст] / Ю.Н. Раскаткин, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // «Промышленная безопасность-2012». Сб. статей. Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, – 2012. – С. 46–49.

72. Раскаткин, Ю.Н. Односторонний линейно-угловой способ определения крена высоких сооружений с помощью электронного тахеометра [Текст] / Ю.Н. Раскаткин, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // «Промышленная безопасность-2013». Сб. статей. Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, – 2013. – С. 58–(25).

73. Раскаткин, Ю.Н. Теоретические основы одностороннего линейно-углового способа определения крена сооружений башенного типа круглой формы и результаты его моделирования [Текст] / Ю.Н. Раскаткин, Г.А. Шеховцов // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2014. – № 2. – С. 134–140.

74. Раскаткин, Ю.Н. Контроль пространственного положения путей мостового крана с помощью электронного тахеометра и его клавиши SDh

[Текст] / Ю.Н. Раскаткин Сб. трудов аспирантов и магистрантов. / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н.Новгород, 2013. – С. 217–221.

75. Раскаткин, Ю.Н. О косвенных способах определения радиуса сооружений круглой формы и некоторые результаты их моделирования [Текст] / Ю.Н. Раскаткин, Г.А. Шеховцов, // Материалы междунар. науч.-практ. конф. Научное и образовательное пространство: перспективы развития. Чебоксары, 29 нояб. – 2015 г. ЦНС «Интерактив плюс». 2015. – С. 193-204.

76. Раскаткин, Ю.Н. Теоретические основы фотографического способа определения радиуса сооружений круглой формы [Текст] / Ю.Н. Раскаткин, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // Приволжский научный журнал. Н.Новгород: ННГАСУ, –2015. – № 3, – С. 198-205.

77. Раскаткин, Ю.Н. О методике и результатах калибровки фотокамер с целью измерения расстояний / Ю.Н. Раскаткин, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // Геодезия и картография. – 2016. – №2. – С. 46-53.

78. Раскаткина, О.В. Калибровка цифровой камеры по вертикальному базису с целью измерения расстояний [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов // Материалы VII междунар. науч.-практ. конф. Приоритетные направления развития науки и образования. Чебоксары, 04 дек. – 2015 г. ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – №4 (5). – С. 216-222.

79. Раскаткина, О.В. Результаты моделирования координатного способа определения центра и радиуса сечений сооружений круглой формы [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, // Материалы VII междунар. науч.-практ. конф: Научные исследования: от теории к практике. Чебоксары, 13 март. – 2016 г. – №1 (5). – С. 179-187.

80. Раскаткина, О.В. Экспериментальные исследования координатного способа определения крена промышленных дымовых труб [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, Д.П. Ивенин, // Приволжский научный журнал. Н.Новгород: ННГАСУ, – 2016. – №1. – С. 58-64.

81. Раскаткина, О.В. Современные методы определения параметров пространственного положения и формы строительных конструкций [Текст] / О.В. Раскаткина, Ю.Н. Раскаткин // Материалы междунар. науч.-практ. конф: Наука и образование: векторы развития. Чебоксары, – 2016 г. – С. 272-296.

82. Раскаткина, О.В. Теоретические основы применения цифровых фотокамер для контроля пространственного положения строительных конструкций [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, Д.П. Ивенин // Приволжский научный журнал. Н.Новгород: ННГАСУ, –2016. –№ 2. – С. 41-49.

83. Раскаткина, О.В. О фотографическом способе нивелирования строительных конструкций [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, А. М. Анущенко // Приволжский научный журнал. Н.Новгород: ННГАСУ, –2016. –№ 3. – С. 24-32.

84. Раскаткина, О.В. Варианты оптимизации прямой угловой засечки при определении крена сооружений башенного типа [Текст] / О.В.

Раскаткина // Сб. статей по материалам LXI междунар. науч.-практ. конф: Технические науки: от теории к практике. Новосибирск, август 2016 г. – № 8 (56). – С. 117-133.

85. Раскаткина, О.В. Двухэтапный фотографический способ определения крена сооружений башенного типа [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, Д.П. Ивенин // Приволжский научный журнал. Н.Новгород: ННГАСУ, –2016. –№ 4. – С. 14-20.

86. Раскаткина, О.В. Методические и классификационные аспекты контроля пространственного положения сооружений башенного типа [Текст] / О.В. Раскаткина // Третья междунар. науч.-практ. конф «Фундаментальные и прикладные исследования: новое слово в науке», г. Москва, 16 мая 2016 г. сб. науч. докл. – С. 58-77.

87. Раскаткина, О.В. Об определении положения и радиуса сечений сооружений круглой формы координатным способом [Текст] / О.В. Раскаткина //Сб. трудов аспирантов, магистрантов и соискателей. Том 2. / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н.Новгород, – 2016. – С. 207-213.

88. Раскаткина, О.В. Об оптимизации фотографического способа контроля вертикальности промышленных дымовых труб / О.В. Раскаткина // Третья междунар. науч.-практ. конф «Фундаментальные и прикладные исследования: новое слово в науке», г. Москва, 16 мая 2016 г. [Текст]: сб. науч. докл. – С. 78-91.

89. Раскаткина, О.В. Варианты использования лазерно-зеркального устройства при экспертизе промышленной безопасности производственных объектов [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // Интеграционные процессы в науке в современных условиях. Материалы международной научно-практической конференции. – Прага 24.03.16. Vydavatel «Osviceni», Нефтекамск. РИО НИЦ «Мир науки», 2016. –Т. 2. – С. 40-52.

90. Раскаткина, О.В. О классификации способов определения ширины колеи мостовых кранов [Текст] / О.В. Раскаткина, Ю.Н. Раскаткин // Тезисы докл. Науч.-пром. Форум «Великие реки –2016». – Н. Новгород: ННГАСУ, – 2016. – с. 105.

91. Раскаткина, О.В. Экспериментальные исследования двухэтапного способа определения крена сооружений башенного типа [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Д.П. Ивенин // Приволжский научный журнал. Н.Новгород: ННГАСУ, –2017. –№ 1. – С. 34-40.

92. Раскаткина, О.В. Влияние местоположения отвеса на точность определения крена дымовой трубы фотографическим способом [Текст] / О.В. Раскаткина // Геодезия и картография. – 2017. – №.1. – С. 55-59.

93. Раскаткина, О.В. Линейный способ определения радиуса сооружений круглой формы [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // Геодезия и картография. – 2016. – № 11 – С. 11-15 .

94. Раскаткина, О.В. Экспериментальные исследования способов контроля пространственного положения строительных конструкций [Текст] /

О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, Д.П. Ивенин // Геодезия и картография. – 2017. – №. 4. – С. 7-12 .

95. Раскаткина, О.В. Теоретические основы фотографического способа мониторинга крена высоких сооружений башенного типа [Текст] / О.В. Раскаткина // Приволжский научный журнал. Н.Новгород: ННГАСУ, – 2017. – № 2. – С.53-62.

96. Раскаткина, О.В. Применение азимутальной засечки при определении крена башенных сооружений круглой формы [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // Геодезия и картография. – 2017. – № 9. – С. 8-13 .

97. Раскаткина, О. В. Контроль пространственного положения и формы строительных конструкций с помощью неметрических цифровых камер: монография [Текст] / О. В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов // Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т.– Н. Новгород : ННГАСУ, 2017. – 118 с.

98. Раскаткина, О.В. О семантометрических свойствах периметра и замыкающей квадратического полигона при оценке точности геодезических засечек [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов // Геодезия и картография. – 2018. – № 7. – С. 17 – 22.

99. Раскаткина, О.В. Оценка точности фотографического способа контроля вертикальности промышленных дымовых труб / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов // Приволжский научный журнал. Н. Новгород: ННГАСУ, – 2019. –№ 1. – С. 38 – 44.

100. Раскаткина, О.В. Об одновременном определении ширины колеи, непрямолинейности подкрановых рельсов и траектории движения мостового крана фотографическим способом [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов // Приволжский научный журнал. Н. Новгород: ННГАСУ, – 2019. – №2. – С. – 201.

101. Раскаткина, О.В. Теоретические основы бесконтактного фотографического способа измерения расстояний при определении деформаций инженерных сооружений [Текст] / О. В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов // Приволжский научный журнал. Н. Новгород: ННГАСУ, – 2019. – №2. – С. – .

102. Раскаткина, О.В. Использование фотоизображений с целью определения геометрических параметров крупногабаритных объектов [Текст] / О.В. Раскаткина, Е.В. Попов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2019. – № 3. Т. 19. – С. 45-54.

103. Раскаткина, О.В. Сокращенный метод калибровки фотокамеры с целью измерения расстояний [Текст] / О.В. Раскаткина, Е.В. Попов, Г.А. Шеховцов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2019. – № 4. Т. 19. – С. 72-79.

104. Раскаткина, О.В. Бесконтактный метод определения непрямолинейности подкрановых рельсов мостовых кранов путем обработки фотоизображений [Текст] / О.В. Раскаткина, Г.А. Шеховцов, Н.Д. Жилина // Программные системы и вычислительные методы. – 2019. – № 4 (17). – С.

105–114. DOI: 10.7256/2454-0714.2019.4.31110 URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=31110](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=31110)

105. Руководство по определению кренов инженерных сооружений башенного типа геодезическими методами / Центр. н.-и. проект.-эксперим. ин-т организации, механизации и техн. помощи стр-ву Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, – 1981. – 56 с.

106. Русков, А.М. Способы определения радиусов сооружения башенного типа [Текст] / А.М. Русков, И.Ф. Болгов // Геодезические методы контроля в стр-ве. Куйбышев, – 1970. – С. 82–86.

107. Русков, А.М. Приборы для измерения угла отклонения от вертикали [Текст] / А.М. Русков // Промышленное и гражданское стр-во. – 1994. – №2. – С. 19-20.

108. ПБ 03-246-98. Правила проведения экспертизы промышленной безопасности. Госгортехнадзор России. НТЦ «Промышленная безопасность». –М., 1999. –16 с.

109. РД 11-126-96. Методические рекомендации по организации и осуществлению контроля за обеспечением безопасной эксплуатации зданий и сооружений на подконтрольных металлургических и коксохимических производствах. Безопасность труда в промышленности. –М., –1997, – № 5. С. 45–49.

110. РД-22-01-97. Требования к проведению оценки безопасности эксплуатации производственных зданий и сооружений поднадзорных промышленных производств и объектов (обследование строительных конструкций специализированными организациями). ЦНИИПРОЕКТ-СТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ им. Мельникова. –М., –1997. – 23 с.

111. Рыжевская, Я.А. Некоторые результаты моделирования фотографического способа определения ширины колеи мостового крана [Текст] / Я.А. Рыжевская, Ю.Д. Щелокова // Сб. трудов аспирантов, магистрантов и соискателей. / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н.Новгород, – 2015. – С. 208 - 213.

112. Сафронов, В.В. Выбор оптимального способа определения крена сооружений башенного типа [Текст] / В.В. Сафронов // Геодезические методы контроля качества строительства. – Куйбышев, 1987. – С. 94-98.

113. Свистунов, М.К. К вопросу определения крена высоких сооружений башенного типа на застроенной территории [Текст] / М.К. Свистунов, Н.В. Ростовцев // Геодезия и фотограмметрия в горном деле. – Свердловск, 1979. – № 6. – С. 78-83.

114. Свод правил СП 13-101-99 Правила надзора, обследования, проведения технического обслуживания и ремонта промышленных дымовых и вентиляционных труб. М: Госстрой России. 1999. – 22 с.

115. Сердюков, В.М. Фотограмметрия в инженерно-строительном деле [Текст] / В.М. Сердюков //– М., Недра. – 1970. – 136 с.

116. Середович, В. А. Определение крена и деформаций дымовых труб средствами наземного лазерного сканирования [Текст] / В.А. Середович, А.В.

Иванов, А.В. Середович, А.В. Усиков // ГЕО-Сибирь-2010 : Сборник материалов 6 Международного научного конгресса, Новосибирск, 19-29 апр., 2010. Т. 1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. Ч. 3. - Новосибирск, 2010. - С. 75-78.

117. Сказкин, И.И. Влияние ошибок базиса на определение величины крена сооружений башенного типа прямой угловой засечкой [Текст] / И.И. Сказкин, В.Я. Шипулин // Известия ВУЗов. Строительство. – 1996. – №4. – С. 117-118.

118. Скейвалас, И.М. Взаимосвязь допусков и точности измерений [Текст] / И.М. Скейвалас // Геодезия и картография. – 1990. – №8. – С. 8 – 10.

119. Соловей, П.И. Анализ допустимости рабочей формулы при определении крена с двух взаимно перпендикулярных направлений [Текст] / П.И. Соловей // Геодезические методы контроля качества стр-ва. – Куйбышев, 1987. – С. 113-118.

120. Соустин, В.Н. О методах определения радиуса и координат центра сооружений, имеющих в плане форму круга [Текст] / В.Н. Соустин // Геодезия и картография. – 1970. – № 12. – С. 40 – 43.

121. Староверов, В.С. Обоснование мест наблюдений отклонений от вертикали сооружений башенного типа [Текст] / В.С. Староверов, А.И. Егоров, С.И. Гордышев // Проблемы внедрения новой техники и технологий в топографо-геодезическое производство. Всесоюзное астрономо-геодезическое общество при АН СССР. – М., 1990. – С. 52-55.

122. Староверов, В.С. Обоснование выбора мест и расчет точности наблюдений за деформациями инженерных сооружений (на примере сооружений башенного типа) / В.С. Староверов, А.И. Егоров // Инженерная геодезия. – 1991. – № 34. – С. 87-91.

123. Стебнев, В.И. О наблюдениях за кренами дымовых труб Казанской ТЭЦ-1 [Текст] / В.И. Стебнев // Геодезические методы определения крена промышленных дымовых труб. – Казань, 1981. – С. 30-34. (Рукопись деп. в ЦНИИГАиК 1 окт. 1981 г., №№ 65-81 Деп).

124. Стебнев, В.И. Использование УМК 10/1318 для определения кренов и прогибов высотных сооружений башенного типа [Текст] / В.И. Стебнев // Труды Казанской гор. астроном. обсерв. – 1989. – № 52. – С. 133-139.

125. Столбов, И.А. Об определении кренов сооружений [Текст] / Столбов И.А. // Геодезия и картография. – 1988. – № 3. – С. 35 – 36.

126. Стукальский, В.П. Определение крена инженерных сооружений башенного типа с одного опорного пункта [Текст] / В.П. Стукальский, С.Г. Радов, В.Г. Ларченко // Геодезические методы определения крена промышленных дымовых труб. – Коммунарск, 1981. – С. 35 – 45. (Рукопись деп. в ЦНИИГАиК 1 окт. 1981 г., №№ 65-81 Деп).

127. Таск, Э.А. Об определении кренов сооружений геодезическими методами [Текст] / Э.А. Таск // Геодезия и картография. – 1969. – №1. – С. 33 – 36.

128. Уставич, Г.А. О применении телевидения для наблюдений за деформациями сооружений [Текст] / Г.А. Уставич // Геодезия и картография. – 1984. – № 7. – С. 18 – 23.

129. Уставич, Г.А. Определение крена сооружений башенного типа GPS-приемниками и тахеометрами [Текст] / Г.А. Уставич // Геодезия и картография. – 2003. – № 9. – С. 15 – 18.

130. Уставич, Г.А. О применении неметрических цифровых камер для инженерно-геодезических измерений [Текст] / Г.А. Уставич, Я.Г. Пошивайло // Геодезия и картография. – 2005. – № 8. – С. 19–24.

131. Харитонов, Б.П. О точности определения кренов сооружений башенного типа способом горизонтальных направлений [Текст] / Б.П. Харитонов, И.В. Лесных // Межвузовский сборник научных трудов Новосибирского ин-та инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. – 1979. – 7/47. – С. 93-98.

132. Хасаев, Н.О. Учет влияния температурных деформаций при геодезическом обеспечении строительства и эксплуатации высотных сооружений башенного типа [Текст] / Н.О. Хасаев // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1988. – № 5. – С. 39-44.

133. Цегельник, Н.П. Наблюдения за осадками и кренами дымовых труб большой высоты [Текст] / Н.П. Цегельник // Геодезические методы определения крена промышленных дымовых труб. – Новочеркасск, 1981. – С. 58-65. (Рукопись деп. в ЦНИИГАиК 1 окт. 1981 г., №№ 65-81 Деп)

134. Четверухин Н.Ф. Параметризация и ее применение в геометрии [Текст] / Н.Ф. Четверухин, Л.А. Яцкевич // Математика в школе. — 1963. — № 5. — С. 15–23.

135. Полозов В.С. Автоматизированное проектирование [Текст] / В.С. Полозов [и др.]. — М.: Машиностроение, 1983. — 280 с.

136. Шеховцов, Г.А. Ступенчатый способ вертикального проектирования [Текст] / Г.А. Шеховцов // Промышленное строительство. – 1974, –№ 1. – С. 43–44.

137. Шеховцов, Г.А. Выбор способа вертикального проектирования [Текст] / Г.А. Шеховцов // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. –1975, вып. 21. – С. 74–76.

138. Шеховцов, Г.А. О точности геодезических наблюдений за деформациями сооружений [Текст] / Г.А. Шеховцов // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. –1975, вып. 22. – С. 88–93;

139. Шеховцов, Г.А. О необходимой точности геодезических наблюдений за деформациями сооружений [Текст] / Г.А. Шеховцов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1976. – № 1. – С. 25–30.

140. Шеховцов, Г.А. Об оценке точности определения крена высоких сооружений [Текст] / Г.А. Шеховцов, Б.А. Ильин // Промышленное строительство. –1983, –№2.– С. 27–28.

141. Шеховцов, Г.А. Оценка точности положения геодезических пунктов: монография [Текст] / Г.А. Шеховцов //– М.: Недра, 1992. – 255 с.

142. Шеховцов, Г.А. Современные методы геодезического контроля ходовой части и путей мостовых кранов: монография [Текст] / Г.А. Шеховцов // Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т.– Н.Новгород : ННГАСУ, 1999. – 164 с.

143. Шеховцов, Г.А. Методические указания по производству специальных геодезических работ на промышленном предприятии [Текст] / Г.А. Шеховцов // Н.Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный ун-т. – 2002. – 36 с.

144. Шеховцов, Г.А. О непосредственных и дистанционных определениях геометрических параметров пространственного положения строительных конструкций [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, Д.А. Евсеев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2007. – № 3. – С. 70–76.

145. Шеховцов, Г.А. Способы контроля пространственного положения сооружений башенного типа треугольной формы: монография [Текст] / Г.А. Шеховцов, В. Н. Мамонов // Н. Новгород, Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, – 2008. – 52 с.

146. Шеховцов, Г.А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений: монография [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова – Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т,– 2009. – 156 с.

147. Шеховцов, Г.А. Способы определения крена высоких сооружений башенного типа электронным тахеометром [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // «Промышленная безопасность-2010». Сб. статей. Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, – 2010. – С. 118–126.

148. Шеховцов, Г.А. Контроль пространственного положения сооружений башенного типа треугольной формы с помощью приборов вертикального проектирования [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р. П. Шеховцова, В.Н. Мамонов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка, –2010. –№ 4. С. 29–32.

149. Шеховцов, Г.А. Определение радиуса сооружений круглой формы электронным тахеометром [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // «Промышленная безопасность-2011». Сб. статей. Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, – 2011. – С. 39–41.

150. Шеховцов, Г.А. Перспективы использования фотографического способа определения пространственного положения строительных конструкций инженерных сооружений [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, Ю.Н. Раскаткин // «Промышленная безопасность - 2012». Сб. статей. Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, – 2012. – С. 35–38.

151. Шеховцова, Р.П. Перспективы использования наземных лазерных сканеров в инженерно-геодезическом производстве [Текст] / Р.П. Шеховцова, К.В. Перфильев // Тезисы докл. науч.-пром. форум «Великие реки – 2012». Т. 1. – Н.Новгород: ННГАСУ, 2012. – С. 1(25)–169.

152. Шеховцов, Г.А. Теоретические основы одностороннего координатного способа определения крена сооружений башенного типа

[Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. –2012. – №5. – С. 30-31.

153. Шеховцов, Г.А. Односторонний координатный способ определения крена высоких сооружений башенного типа круглой формы [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, Ю.Н. Раскаткин, // Приволжский научный журнал. Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, – 2012. – № 4. – С. 172–178.

154. Шеховцов, Г.А. О точности определения радиуса сооружений круглой формы линейно-угловым способом [Текст] / Г.А. Шеховцов, Ю.Н. Раскаткин // «Промышленная безопасность - 2013». Сб. статей. Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, – 2013. – С. 54–57.

155. Шеховцов, Г.А. Геодезические работы при экспертизе промышленной безопасности зданий и сооружений: монография [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. 2-е изд., перераб. и доп. – 2014. – 176 с.

156. Шеховцов, Г. А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений: монография [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, – 2014, – 255 с.

157. Шеховцов, Г.А. Новые способы формирования и использования вертикальных референтных прямых [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2014. – № 6. –С. 22-27.

158. Шеховцов, Г.А. Косвенные способы определения радиуса сооружений круглой формы [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова // «Промышленная безопасность - 2010». Сб. статей. Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, – 2014. – С. 26–36.

159. Шеховцов, Г.А. Определение положения и радиуса сечений сооружений башенного типа круглой формы односторонним координатным способом [Текст] / Г.А. Шеховцов, Ю.Н. Раскаткин, М.М. Шульц // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. –2015. – № 3. – С. 26-31.

160. Шеховцов, Г.А. Калибровка цифровой фотокамеры с целью измерения расстояний [Текст] / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, Е.В. Попов, Ю.Н. Раскаткин // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур. -строит. ун-т. – Н. Новгород, 2015. – № 4. – С. 131-140.

161. Шеховцов, Г.А. Современные методы геодезического контроля ходовой части и путей мостовых кранов: монография [Текст] / Г. А. Шеховцов // Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2018. – 185 с.

162. Шеховцов, Г.А. Контроль пространственного положения и формы высоких сооружений башенного типа: монография [Текст] / Г.А. Шеховцов // Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т.– Нижний Новгород: ННГАСУ, 2018. – 214 с.

163. Шпурре, Э.Ф. Геодезические способы определения наклона фабрично-заводских труб [Текст] / Э.Ф. Шпурре // Учёные записки Бийского института // 1958. № 3. – С. 19-23.

164. Baran Piotr, Grala Mirosław. Wyznaczenie wychylen budowli metoda wcięć katowych // “Prz. geod.” – 1980, 52, №12. – P. 419-420.

165. Bernasik Jerzy, Mikrut Sławomir Automatyzacja fotogrametrycznych pomiarów odkształceń dachowych dźwigarów hal przemysłowych // Geodezja. – 2006. – 12, № 2. – P. 113, 141 – 149.

166. Bruckner R., Mordek P., Lichtner W. Graphische Darstellung einer zweidimensionalen Leit reih // “Z.Vermessungsw.” – 1979, 104, №10. – P. 442-447.

167. Bryś H. Meßverfahren zum Bestimmen der Geometrie der Verformung von Brückenkran und Kranbahnschienen //Allg. Vermess.-Nachr. – 2000. 107. – № 11-12. – P. 391–396.

168. Bujakiewicz A., Majde A., Prządka Z. Photogrammetric measurement of deformations of the industrial halls. “Int. Arch. Photogr. and Remote Sensing. Vol. 25. 15 Congr. Int. Soc. Photogramm. and Remote Sens., Rio de Janeiro, 1984. Pt A 5. Commiss. 5”. S. 1., s. A. – P. 136–140.

169. Fabiankowitsch Johannes, Kahmen Heribert, Matt Phillip. Evaluation of vibrational spectrum of high slim towers with wind electrical turbines // VGI: Osterr. Z. Vermess. und Geoinf. – 2003. 91, № 1. – P. 77-84.

170. Grafarend E. Helmertsche Fusspunktcurve oder Mohrsher Kreis? // Allgemeine Vermessung-Nachrichten. – 1969. – 76. – № 6. – P. 239-250.

171. Homorodi L. A hibsellipszis es a ponthiba // Geodezia es Kartografia. – Budapest. – 1956. – № 4. – P. 321-325.

172. Janusz W. Wyznaczanie trajektorii ruhu suwnicy i odchytek toru podsuwnicowego ze stanowisk naziemnych // Pr. inst. geod. i kartogr.–1994. 41.– № 89.– P. 31–45.

173. Klein K-H. Zur Forderung der qualitatwirksamen Potenziale der Ingenieurvermessung bei der Qualitätssicherung von Kranbahnen. Allg. Vermess.-Nachr. – 2001. 108. – № 3. – P. 91, 92, 94–100.

174. Köhr Julius. Über mittlere Punktfehler // Zeitschrift für Vermessungswesen. – 1969. – 94. – № 11. – P. 445-455.

175. Meixner Heinz Geodezujne pomiaru deformacji. “Prz. gorn.”, – 1980, 36, –№11, 540-544, LXII, LXIII, LXIV, LXV.

176. Miller Z. Zastosowanie fotogrametrii do celow inzynierskich. “Prz. bud.”, –1987, 59, – №5. – P. 200–203, 231–232.

177. Міщенко, Н.О. Визначення крену високих споруд зумовленого впливом однобічного сонячного нагрівання / Н.О. Міщенко // Инженерная геодезия. – 1993. –№36. – С. 82 – 84.

178. Schaefer W. Photogrammetrische Beobachtung von Bauwerksverformungen. “Markscheidewesen”, – 1985, 92, – №4. – P. 148–151.

179. Steuerung des Gleitprozessen beim Bau eines 160-m-Schornsteins unter Berücksichtigung der thermischen Deformation // “Vermessungstechnik” – 1985, 33, №5. – P. 168-170.

180. Schwarz Willfried Moderne Messverfahren in der Ingenieurgeodasie und ihr praktischer Einsatz.. Flächenmanag. Und Bodenordn. –2002.64,– №2. – P. 87– 97.

181. Tarczu-Hornoch A. Über den günstigsten Schnittwinkel und über die Genauigkeitsmasse beim einfachen Vorwärtseinschnitt // Acta geodaetica, geophysica et montanistica. Academiae sceintiarum hungarikae. – 1969. – 4. – № 3-4. – P. 455-467.

182. Zalanffy Laszlo. Ipari Kemenyek Es tornyok bemerese // Geod. es kartogr. –1991. 43, №2. – P. 80-85.

183. Wimmer H. Ein Beitrag zur Gewichtsoptimierung gtoatischer Netze // Veröff. Dtsch. Geod. Kommiss. Bauer. Akad. Wiss. – 1981. – №269. – 114 p.

184. Raskatkina O.V., et al. Improving the accuracy of geometric model to the mark out networks for high-rise buildings // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1441, IOP Publishing, 2020. doi:10.1088/1742-6596/1441/1/012080

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1



Общество с ограниченной ответственностью

**«ГИП-Проект»**

Свидетельство СРО-П-022-03092009

Фактический (почтовый) адрес: 603000, г. Нижний Новгород,

ул. Обозная, д.4, пом. 3 тел.(831)433-50-27

эл. почта: gip\_proekt@mail.ru

**Исх.№12-М от 10.03.2021г.****Акт внедрения результатов работ**

Раскаткиной Ольги Валерьевны по применению

Диссертационной работы «Определение геометрических параметров крупногабаритных труднодоступных сооружений фотограмметрическим методом».

Настоящий Акт составлен о том, что результаты Диссертационной работы «Определение геометрических параметров крупногабаритных труднодоступных сооружений фотограмметрическим методом» Раскаткиной Ольги Валерьевны рассмотрены и приняты к внедрению в ООО «ГИП-Проект», а именно:

1. Разработанный автором вариант фотограмметрического метода используется для определения геометрических параметров положения и формы крупногабаритных труднодоступных сооружений по фотографиям, полученным цифровой фотокамерой. Мониторинг крена высотных сооружений, например дымовых труб, может осуществляться путем периодических измерений с заданными интервалами геометрии объекта с постоянных точек установки фотокамеры. Результаты, полученные путем обработки фотоснимков разных этапов измерений, позволяют сделать заключение о стабильности, либо о нестабильности сооружения.
2. Преимуществами разработанного метода являются:
  - простота, применимость в полевых условиях и отсутствие необходимости прямого контакта с исследуемым объектом;
  - использование недорогого аппаратного и программного обеспечения;
  - не требуется привлечения высококвалифицированного персонала без снижения качества результатов.

Директор ООО «ГИП-Проект»



А.Д. Макаров

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2****ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
«ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ВВГБП»**

603002, Россия, г.Нижний Новгород, ул.Долгополова, д.40, литерВ, каб.№2, тел: 283-04-92  
ОГРН 1125257010064 ИНН 5257134848 / КПП 525701001, р/сч 40702810801090000342 в  
Филиал «Нижегородский» АО «Банк ДОМ.РФ» в г.Н.Новгород, БИК 042202821, к/сч 30101810300000000821

№ 3/03 от «12» марта 2021г.  
На № \_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

**Акт внедрения результатов исследования диссертационной работы  
«Определение геометрических параметров крупногабаритных труднодоступных  
сооружений фотограмметрическим методом»  
Раскаткиной Ольги Валерьевны**

Настоящий Акт составлен о том, что результаты Диссертационной работы «Определение геометрических параметров крупногабаритных труднодоступных сооружений фотограмметрическим методом» Раскаткиной Ольги Валерьевны рассмотрены и использованы в работе ООО «Инженерный Центр ВВГБП», а именно:

1. Разработанные автором варианты фотограмметрического метода для определения расстояний, позволяют решать различные задачи с высокой степенью точности, такие, как возможность по заданному расстоянию до точки на протяжённом объекте найти её положение на снимке; возможность определить расстояние до любой точки объекта на снимке или определить расстояние между любыми его точками.
2. Разработанный автором вариант фотограмметрического метода является эффективным для определения геометрических параметров положения и формы труднодоступных горизонтально протяженных объектов таких, как, например, рельсовые пути мостовых кранов. Данный метод позволяет с одной точки стояния фотокамеры и за один проход мостового крана определить одновременно непрямолинейность подкрановых рельсов контролируемого участка пути, ширину колеи любого размера и траекторию движения крана.
3. Полученные автором результаты показали высокую эффективность и точность фотограмметрического метода определения геометрических параметров крупногабаритных труднодоступных объектов.

Директор  
канд. техн. наук,  
ст. научн. сотр



С.В. Краснов