

**ФЕДОСОВ КОНСТАНТИН ВАСИЛЬЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА КРУПНАГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СУДОСТРОЕНИИ  
(на примере ОАО «ПО «СЕВМАШ»)**

**Специальность 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

**МОСКВА, 2009 г.**

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС»).

**Научный руководитель:**

Доктор технических наук

**Лысенко В.Г.**

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, профессор

**Фирстов В.Г.**

Доктор технических наук, профессор

**Порошин В.В.**

**Ведущая организация:**

Центральный научно-исследовательский институт «ЛОТ»

Защита состоится «18» июня 2009 г. на заседании диссертационного совета Д308.001.01 в ФГУП «ВНИИМС» по адресу 119361, Москва, ул. Озёрная, 46, ауд. 1005.

По адресу: Москва, ул. Озёрная, 46, комн. 1005

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМС»

Автореферат разослан «15» мая 2009 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
Доктор технических наук



**В.Г. Лысенко**

## Общая характеристика работы

### Актуальность исследования.

Мировая тенденция развития технологии судостроения характеризуется переходом к модульному методу постройки кораблей и судов. Метод позволяет формировать суда из максимально насыщенных сборочных единиц, преобразуемых в стандартные конструктивные и функциональные единицы с минимальным объёмом пригоночных операций. При этом около 40% монтажных работ переносятся со стапеля в цех или на специализированное предприятие, снижается трудоёмкость монтажа механизмов, трубопроводов и систем на 15-20% и сокращается цикл постройки корабля в целом. Благодаря внедрению этого метода постройки Южно-Корейская судостроительная верфь DAEWOO выпускает 8 танкеров в год. Опытное внедрение модульного метода с унификацией корпусных конструкций и агрегатный метод монтажа механизмов при строительстве рыбопромыслового судна «Моряна», позволили сократить трудоёмкость постройки судна на 160 тыс. нормочасов и сократить цикл постройки на 120 дней. При модульном методе постройки широко используются виртуальные способы проектирования составляющих элементов кораблей и судов, изменяется организация производства, устанавливаются повышенные требования к точности изготовления деталей и сборочных единиц, ужесточаются требования к контрольным операциям.

Основным фактором, сдерживающим широкое внедрение модульного метода постройки кораблей и судов на судостроительных предприятиях России, является низкая точность изготовления деталей, корпусных конструкций, агрегатов, основных механизмов. А точность изготовления, в свою очередь, зависит от уровня *метрологического обеспечения производства*, применяемых средств измерений, методик выполнения измерений, организационной структуры. Сложившаяся к настоящему времени *структура метрологического обеспечения* на судостроительных предприятиях не в полной мере отвечает современным требованиям: не обеспечивается требуемая точность измерения крупногабаритных конструкций; не внедряются высокоточные трёхкоординатные средства измерений из-за отсутствия исследований о погрешности измерения размеров и отклонений формы с их применением; отсутствуют аттестованные методики выполнения измерений; не исследован процесс передачи размера единицы длины от эталона к рабочим средствам измерений (СИ); отсутствуют эталоны для поверки специализированных трёхкоординатных СИ.

Для обеспечения требуемой точности изготовления составляющих элементов корабля необходимо выявить причины недостаточной точности изготовления изделий судостроения, определить номенклатуру контролируемых параметров техпроцессов или изделий, назначить допуски на них, определить обоснованность назначенных допусков и припусков, определить требуемую точность измерения (контроля) этих параметров и на основании полученных данных выполнить ряд мероприятий по совершенствованию технологических процессов. При этом вопросы достоверности измерений (контроля) параметров техпроцесса или изделий, на основании которой будут приниматься решения о внесении изменений в техпроцесс, приобретают первостепенное значение, поскольку без достоверной информации невозможно сделать правильные выводы и принять правильные решения.

Таким образом, для успешного внедрения модульного метода постройки кораблей и судов, требуется провести научные, технические и метрологические исследования и разработать методические основы метрологического обеспечения производства крупногабаритных конструкций в судостроении.

Настоящая работа посвящена разработке научно-технических и методических основ метрологического обеспечения производства крупногабаритных конструкций в судостроении, которые будут способствовать получению достоверной измерительной информации о точности изготовления крупногабаритных изделий судостроения.

Поэтому актуальность и важность диссертационной работы очевидна.

### **Предмет и объект исследования.**

Предметом исследования является **метрологическое обеспечение** производства крупногабаритных изделий судостроения.

Объектом исследования являются **измерения геометрических параметров оборудования и крупногабаритных изделий** судокорпусостроения, трубообрабатывающего производства, а также **обеспечение единства трёхкоординатных измерений.**

### **Цели и задачи исследования.**

Целью исследования является создание научных, технических и нормативно-методических основ обеспечения единства и требуемой точности измерений геометрических параметров (ГП) крупногабаритных конструкций судостроительного производства, способствующих *обеспечению качества, повышению экономической эффективности производства и конкурентоспособности выпускаемой продукции за счет совершенствования метрологического обеспечения.*

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

1. Анализ существующей структуры метрологического обеспечения измерений геометрических параметров крупногабаритных изделий судостроительного производства с целью определения основных задач, которые необходимо решить для обеспечения измерений ГП с требуемой точностью в судостроении.

2. Исследование и определение необходимой и достаточной номенклатуры измеряемых параметров, которая обеспечит измерение ГП крупногабаритных конструкций с требуемой точностью и сборку конструкций без пригоночных операций.

3. Разработка и исследование математических моделей погрешности измерения координат специализированными трёхкоординатными средствами измерений, как основной составляющей погрешности по определению ГП крупногабаритных конструкций.

4. Разработка научно-обоснованной системы воспроизведения и передачи единицы длины в области измерений координат и ГП крупногабаритных изделий судостроения.

5. Разработка и исследование физических и математических моделей эталонов для проверки специализированных трёхкоординатных средств измерений.

6. Разработка нормативно-методической базы метрологического обеспечения, позволяющей обеспечить измерение ГП крупногабаритных конструкций с требуемой точностью.

### **Методы и средства исследований.**

Работа выполнена на основе теоретических и экспериментальных исследований.

При исследовании методов и средств измерений отклонений формы и взаимного расположения поверхностей изделий судостроения проводились теоретические и экспериментальные исследования инструментальных погрешностей применяемых средств измерений и теоретические исследования методических погрешностей методами математического моделирования с привлечением аппарата аналитической и дифференциальной геометрии, теории матриц. Анализ случайных составляющих погрешностей проводились методами математической статистики и теории вероятностей.

Экспериментальные исследования инструментальных погрешностей проводились на действующих средствах измерений.

### **Информационная база исследований.**

Информационную базу исследований составили научные источники из книг, статей, научных отчётов и докладов на научно-практических конференциях, нормативные документы в области конструирования и технологии судостроения, в области метрологического обеспечения, машиностроения и станкостроения, а также результаты собственных расчётов, разработок и экспериментов автора.

### **Научная новизна исследования.**

Впервые проведены исследования математических моделей оценки неопределённости измерений координат пространственных точек крупногабаритных изделий судостроения специализированными трёхкоординатными средствами измерений, разработаны новые измерительные технологии с применением этих средств измерений, разработан комплекс методик выполнения измерений крупногабаритных конструкций судостроительного производства, основанный на разработанных математических моделях.

Впервые на основе проведённых исследований разработан метрологически обоснованный алгоритм проектирования «забойных» участков трубопроводов на основе измерительной информации, что позволило получить значительный экономический эффект за счёт сокращения номенклатуры шаблонов и труб-эталонов, а также пригоночных операций на сборке.

Впервые исследованы и разработаны физические и математические модели рабочих эталонов, воспроизводящих координаты точек в диапазоне 120-40-20 метров, наиболее востребованном диапазоне в судостроении, и созданы макеты эталонов для проверки специализированных средств трёхкоординатных измерений (используемых для контроля тех изделий, которые ранее обеспечивались технологически).

Научно обоснованы математические модели привязки специализированных трёхкоординатных средств измерений к Государственным эталонам на базе рабочих эталонов.

Разработана нормативно-методическая база документов по метрологическому обеспечению координатных измерений параметров крупногабаритных конструкций. Изменена структура управления измерениями на всех стадиях изготовления крупногабаритных конструкций судостроительного производства. Основные функции метрологического обеспечения производства крупногабаритных конструкций конкретизированы локальными структурами управления измерениями в судокорпусостроении, трубообрабатывающем производстве, при монтаже основных механизмов и спецсистем кораблей и судов (рис. 1,2,3).

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Разработанная научно-обоснованная необходимая и достаточная номенклатура измеряемых параметров обеспечивает изготовление крупногабаритных конструкций с требуемой точностью для безпригоночной сборки.

2. Разработанные математические модели оценки неопределённости измерения координат позволяют выбрать режимы измерений, обеспечивающие требуемую точность.

3. Разработанный алгоритм проектирования «забойных» участков трубопроводов с помощью прецизионной КИМ, обеспечивает их безпригоночную сборку.

4. Разработанные физические и математические модели эталонов позволяют оценить погрешность воспроизведения единицы длины в области координатных измерений.

5. Разработанная научно-обоснованная система воспроизведения и передачи единицы длины в координатных измерениях позволяет осуществить привязку специализированных координатных средств к государственным эталонам.

6. Комплекс нормативно-методических документов по метрологическому обеспечению производства крупногабаритных судостроительных конструкций обеспечивает измерение их ГП с погрешностью не превышающей 20% от допуска на контролируемый параметр.

### **Практическая значимость исследований.**

Результаты выполненных научных и метрологических исследований внедрены в ОАО «ПО «СЕВМАШ» при строительстве полупогружных платформ «MOSS-CS50», стационарной нефтедобывающей платформы «Приразломная», при строительстве мега-яхт проекта А-133, в трубообрабатывающем производстве, при монтаже основных систем и спецсистем кораблей, поставляемых по контрактам для Государственных нужд.

Применение измерительных технологий с использованием трёхкоординатных средств измерений только при строительстве двух полупогружных платформ «MOSS-CS50»

позволило сократить длительность сборки платформ на плаву на 2,5 месяца. Расчётная оценка экономической эффективности при строительстве серии из 8 танкеров составляет 17 млн. долларов.

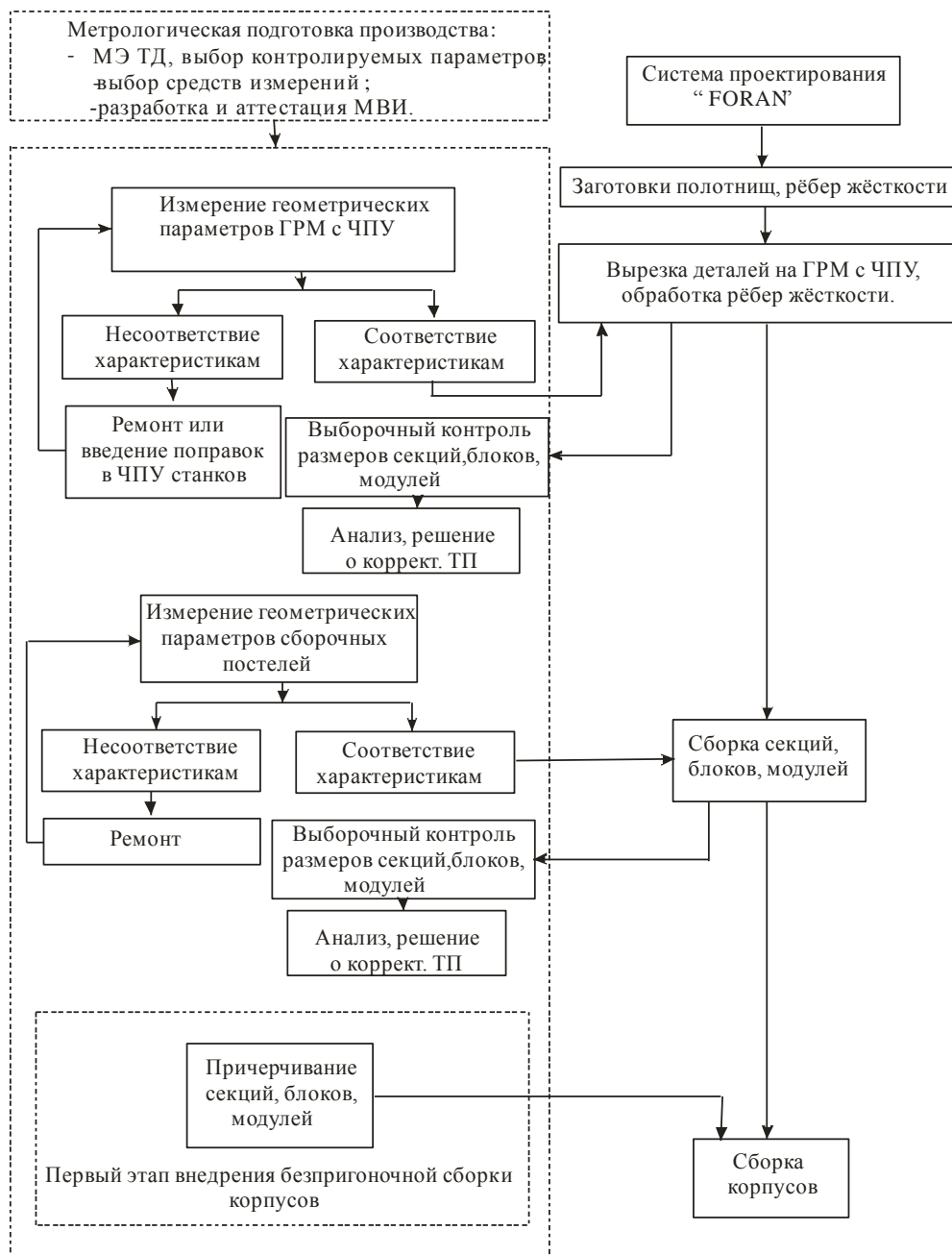


Рис.1 Система метрологического обеспечения в судокорпусостроении

▭ - Блок метрологического обеспечения

Экономическая эффективность внедрения технологий в трубообрабатывающем производстве оценивается в 4-5 млн/год за счёт сокращения конструкторско-технологической подготовки производства, частичного уменьшения количества шаблонов и «труб-эталонов».

**Личный вклад автора.**

Лично автором проведены научные исследования математических моделей погрешности измерения координат пространственных точек тахеометрами и мобильными КИМ, погрешности реализации декартовой системы координат и разработаны конструкции эталонов, разработаны и аттестованы две методики выполнения измерений, утверждён тип специализированного измерительно-запоминающего комплекса ИЗК-ПТ-260, разработаны

локальные структуры управления измерениями в ОАО «ПО «СЕВМАШ». Под непосредственным руководством автора разработаны и аттестованы пять методик выполнения измерений в области судостроения.

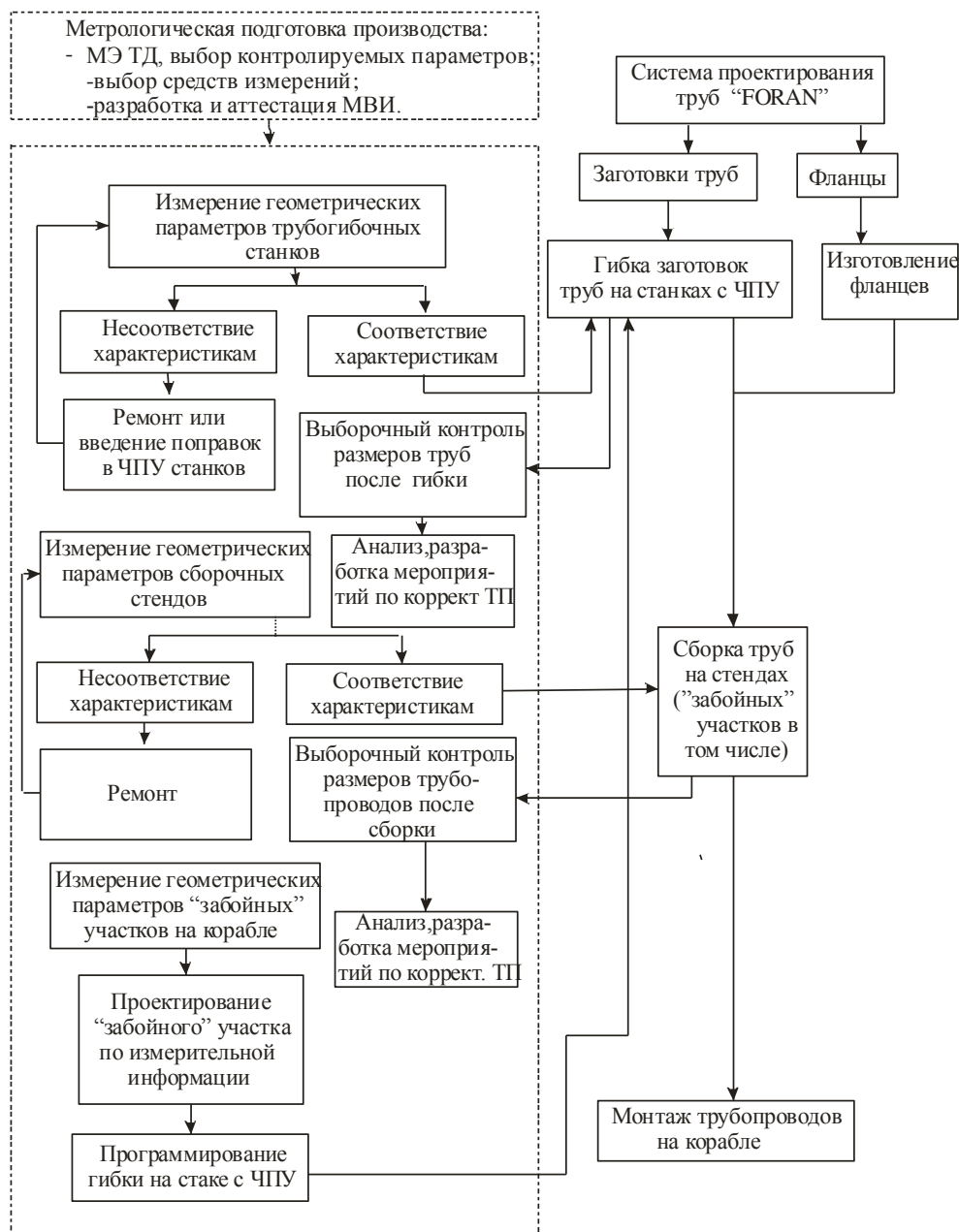


Рис.2 Система метрологического обеспечения трубообрабатывающего производства

----- - Блок метрологического обеспечения

**Апробация работы.**

Результаты исследований докладывались на Всероссийских научно-технических конференциях «100 лет подводному флоту России» (Северодвинск – 2006) и «Судометрика - 2008» (Санкт-Петербург).

Созданы макеты стандов-эталонов и апробированы методики поверки тахеометров и мобильных КИМ на них.

**Публикации.**

По результатам исследований и разработок опубликовано 7 статей и 1 доклад.

**Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, библиографии и приложений. Диссертация содержит 147 страниц текста, включая 28 рисунков, 5 таблиц, 9 приложений.



Рис.3 Система метрологического обеспечения монтажа спецсистем

----- - Блок метрологического обеспечения

### **Краткое содержание работы.**

**Во введении** излагаются мировые тенденции развития технологии судостроения и преимущества модульного принципа постройки кораблей и судов. Отмечаются причины, которые сдерживают широкое внедрение этого принципа на судостроительных предприятиях России, одна из которых – не отвечающее современным требованиям метрологическое обеспечение производства крупногабаритных конструкций в судостроении и необходимость его совершенствования.

**В первой главе** приведена краткая характеристика судостроительного производства и дан анализ **метрологического обеспечения** производства крупногабаритных конструкций. Анализ показал, что действующая структура метрологического обеспечения решает только



часть задач, призванных обеспечить широкое внедрение модульного принципа постройки. Структура метрологического обеспечения не соответствует современным требованиям развития технологии судостроительного производства: используемые средства измерений в корпусообрабатывающем, корпусо-сварочном и стапельно-сборочном производствах не обеспечивают измерения геометрических размеров с точностью, необходимой для сборки узлов без пригоночных операций, не отвечают современным тенденциям развития технологии судостроения; отсутствуют критерии выбора и назначения средств измерений для крупногабаритных изделий, к которым предъявляются повышенные требования по точности установки относительно основных баз корабля; отсутствует система управления производственными измерениями, обеспечивающая поддержание параметров технологических процессов в пределах требований, обеспечивающих сборку без пригоночных операций; практически не используются трёхкоординатные средства измерений, несмотря на то, что контролируемые размеры, отклонения формы и взаимного расположения поверхностей изделий задаются, особенно на сборочных операциях, в пространственной системе координат или от вспомогательных баз скоординированных относительно общей системы координат корабля; не в полной мере решены вопросы поверки современных трёхкоординатных средств измерений. Существующая структура метрологического обеспечения не обеспечивает широкое внедрение модульного принципа постройки кораблей и судов и подлежит **модернизации, значительному обновлению парка рабочих средств измерений и эталонов**. Сделан вывод, что наибольший экономический эффект может быть получен в корпусообрабатывающем, корпусо-сварочном, трубозаготовительном и сборочно-стапельном производствах, а также производствах, поставляющих на сборку детали, сборочные единицы, комплектующие узлы.

Также в первой главе поставлены задачи, которые необходимо было решить:

1. Анализ существующей структуры метрологического обеспечения измерений геометрических параметров крупногабаритных изделий судостроительного производства с целью определения основных задач, которые необходимо решить для обеспечения измерений ГП с требуемой точностью в судостроении.

2. Исследование и определение необходимой и достаточной номенклатуры измеряемых параметров, которая обеспечит измерение ГП крупногабаритных конструкций с требуемой точностью и сборку конструкций без пригоночных операций.

3. Разработка и исследование математических моделей погрешности измерения координат специализированными трёхкоординатными средствами измерений, как основной составляющей погрешности по определению ГП крупногабаритных конструкций.

4. Разработка научно-обоснованной системы воспроизведения и передачи единицы длины в области измерений координат и ГП крупногабаритных изделий судостроения.

5. Разработка и исследование физических и математических моделей эталонов для поверки специализированных трёхкоординатных средств измерений.

6. Разработка нормативно-методической базы метрологического обеспечения, позволяющей обеспечить измерение ГП крупногабаритных конструкций с требуемой точностью.

Во второй главе разработаны общие требования к системе метрологического обеспечения судостроительного производства и типовая номенклатура измеряемых параметров.

*Общие требования.* Структура метрологического обеспечения судостроительного производства должна обеспечивать:

1. Выявление номенклатуры измеряемых (контролируемых) параметров, в наибольшей степени влияющих на качество изготовления изделий и эффективность судостроительного производства, в первую очередь в приоритетных направлениях развития метрологического обеспечения.

2. Выбор критериев оценки погрешности измерения (контроля) этих параметров, для безусловной взаимозаменяемости изделий судостроения.

3. Средствами измерений и методиками выполнения измерений, которые обеспечивают требуемую точность измерения параметров.
4. Метрологическое обслуживание средств измерений.
5. Дееспособную организационную структуру управления процессами измерения.

*Номенклатура измеряемых параметров в судокорпусостроении.*

Проведённый семантический анализ ранжирования параметров крупногабаритных конструкций позволил сформулировать следующее правило: **«для обеспечения собираемости корпуса корабля без пригоночных операций в процессе производства необходимо и достаточно измерять (контролировать) координаты X,Y,Z (растяжку, полушироту, высоту) стыкуемых кромок или поверхностей полотниц, секций и блоков в общекорабельной системе координат.**

Для обеспечения подачи на сборку секций полотниц установленной формы у газорезательных машин (ГРМ) необходимо периодически контролировать и поддерживать в заданных пределах следующие геометрические параметры: погрешность позиционирования осей X, Y; отклонения от прямолинейности и перпендикулярности осей X, Y; коэффициент рассогласования проводов осей X, Y.

В трубообрабатывающем производстве для качественного изготовления «забойных участков» трубопроводов необходимо и достаточно измерить в единой системе координат плоскость базового фланца, плоскость ответного фланца, диаметры отверстий труб и отверстий под крепёжные детали, размеры плоских и цилиндрических помех, расположенных между базовым и ответным фланцами. Этих параметров достаточно для вычисления длин прямых участков, углов погибов, углов между плоскостями погибов, углов от плоскостей XOY базового и ответного фланцев до осей отверстий под крепёжные детали, общую длину L от начала координат базового фланца до начала координат ответного фланца. Алгоритм проектирования «забойного» участка трубопровода по результатам измерительной информации приведён ниже.

По результатам измерений плоскостей фланцев, плоскостей помех, отверстий труб, отверстий во фланцах под крепёжные детали и цилиндрических поверхностей помех рассчитываются коэффициенты уравнений плоских и цилиндрических поверхностей и определяются их уравнения в выбранной системе координат (рис.4).

Алгоритм расчёта коэффициентов уравнений плоских поверхностей.

1. Измерить трёхкоординатным средством измерения координаты  $n$  точек плоскости, например плоскости базового фланца, в системе координат  $O_{cu} X_{cu} Y_{cu} Z_{cu}$ .

2. По произвольно выбранным максимально удалённым друг от друга трём точкам провести плоскость по формуле -

$$\begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

Коэффициенты  $A, B, C$  этого уравнения являются проекциями на оси координат  $O_{cu} X_{cu} Y_{cu} Z_{cu}$  вектора  $N$  нормального плоскости.

3. Развернуть систему координат  $O_{cu} X_{cu} Y_{cu} Z_{cu}$  на углы  $\theta = \arctg(B/A)$  вокруг оси  $Z_{cu}$  и  $\psi = \arctg(C/\sqrt{A^2 + B^2})$  вокруг оси  $Y'_{cu}$  и вычислить координаты  $n$  точек плоскости в новой системе координат  $O'_{cu} X'_{cu} Y'_{cu} Z'_{cu}$  по формуле -  $r'_i = M^{np} r_i$ . Матрица преобразований координат будет иметь вид -

$$M^{np} = \begin{vmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \theta \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

при  $M_1 = M_2 = M_3 = M_4 = I$ .

4. Решить общее уравнение плоскости относительно  $x' = by' + cz' + d$ , где  $b = \left(-\frac{B'}{A'}\right), c = \left(-\frac{C'}{A'}\right), d = \left(-\frac{D'}{A'}\right)$ , и решить систему нормальных уравнений, подставив новые координаты точек. В результате получим значения коэффициентов  $b, c, d$ , по которым можно вычислить уточнённые коэффициенты общего уравнения плоскости  $B', C', D'$  ( $A' = 1$ ) в системе координат  $O'_{cu} X'_{cu} Y'_{cu} Z'_{cu}$ .

5. Вновь развернуть систему координат  $O'_{cu} X'_{cu} Y'_{cu} Z'_{cu}$  на углы  $\theta' = \arctg(B')$  вокруг оси  $Z'_{cu}$  и  $\psi' = \arctg(C'/B')$  вокруг оси  $Y'_{cu}$ . В результате получим уравнение плоскости  $x'' + D'' = 0$  в системе координат  $O''_{cu} X''_{cu} Y''_{cu} Z''_{cu}$ , параллельную плоскости  $O''_{cu} Y''_{cu} Z''_{cu}$ .

6. При необходимости получения уравнения плоскости в системе координат средства измерения необходимо выполнить обратные преобразования координат.

Алгоритм расчёта коэффициентов уравнений цилиндрических поверхностей.

*Вариант 1 (определение расположения цилиндрических поверхностей по результатам измерения двух эллипсов)*

1. В системе координат средства измерения измерить координаты пяти точек, расположенных примерно в одном сечении цилиндрической поверхности, равноудалённых, по возможности, друг от друга, а затем пяти точек, расположенных в другом сечении, максимально удалённом от первого.

2. Через три, из первых пяти точек, провести плоскость и вычисляют коэффициенты уравнения плоскости  $A, B, C$ .

3. Вычислить координаты точек пересечения перпендикуляров оставшихся двух из пяти первых точек на эту плоскость по формулам –

$$x'_i = x_i - \frac{|A_i x_i + B_i y_i + C_i z_i|}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}} \cos(A_i / \sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2})$$

$$y'_i = y_i - \frac{|A_i x_i + B_i y_i + C_i z_i|}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}} \cos(B_i / \sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2})$$

$$z'_i = z_i - \frac{|A_i x_i + B_i y_i + C_i z_i|}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}} \cos(C_i / \sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2})$$

4. Развернуть систему координат  $O_{cu} X_{cu} Y_{cu} Z_{cu}$  последовательно на углы  $\theta_i = \arctg(B_i / A_i)$  вокруг оси  $Z_{cu}$  и  $\psi_i = \arctg(C_i / \sqrt{A_i + B_i})$  вокруг оси  $Y'_{cu}$  и перенести начало системы координат в одну из первых трёх точек, например  $|x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1|^T$ . Таким образом, ось  $X_i$  новой системы координат будет направлена по нормали к плоскости сечения, в которой измерялись координаты первых пяти точек.

5. В плоскости  $Z_i O_i Y_i$  системы координат  $O_i X_i Y_i Z_i$  провести эллипс через пять точек по формуле –

$$\begin{vmatrix} x_i^2 & x_i y_i & y_i^2 & x_i & y_i & 1 \\ x_{1i}^2 & x_{1i} y_{1i} & y_{1i}^2 & x_{1i} & y_{1i} & 1 \\ x_{2i}^2 & x_{2i} y_{2i} & y_{2i}^2 & x_{2i} & y_{2i} & 1 \\ x_{3i}^2 & x_{3i} y_{3i} & y_{3i}^2 & x_{3i} & y_{3i} & 1 \\ x_{4i}^2 & x_{4i} y_{4i} & y_{4i}^2 & x_{4i} & y_{4i} & 1 \\ x_{5i}^2 & x_{5i} y_{5i} & y_{5i}^2 & x_{5i} & y_{5i} & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

В результате получим значения коэффициентов уравнения эллипса  $A, B, C, D, E, F$  в указанной плоскости.

6. По известным коэффициентам уравнения линии второй степени можно вычислить координаты центра линии второго порядка в этой же плоскости–

$$x_{0i} = -\frac{\begin{vmatrix} D & B \\ E & C \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A & B \\ B & C \end{vmatrix}}, y_{0i} = -\frac{\begin{vmatrix} A & D \\ B & E \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A & B \\ B & C \end{vmatrix}}$$

Из теории инвариантов известно, что если выполнить преобразование системы координат  $O_i X_i Y_i Z_i$ , перенеся начало в точку  $(x_{0i}, y_{0i})$  и развернув вокруг оси  $X_i$  на угол

$\varphi = \frac{\operatorname{arctg}(\frac{2B}{A-C})}{2}$ , получится уравнение вида  $\overline{A}x^2 + \overline{C}y^2 + \overline{F} = 0$ , тогда длины малой и большой полуосей эллипса можно вычислить по формулам –

$$a = \sqrt{-\frac{\overline{F}}{\overline{A}}}; b = \sqrt{-\frac{\overline{F}}{\overline{C}}}.$$

Выполнив аналогичные вычисления для второго сечения цилиндра, получим значения координат двух центров эллипсов  $(x_{01}, y_{01}, z_{01})$ ,  $(x_{02}, y_{02}, z_{02})$  и радиусы цилиндров  $r_{ц1}, r_{ц2}$  равные малым полуосям эллипсов в системах координат  $O'_1 X'_1 Y'_1 Z'_1$  и  $O'_2 X'_2 Y'_2 Z'_2$ , начала которых известны в системе  $O_{cu} X_{cu} Y_{cu} Z_{cu}$ , поэтому можно вычислить координаты центров эллипсов в системе координат средства измерения.

Радиус цилиндра вычисляем по формуле -  $r_{ц} = \frac{a_1 + a_2}{2}$ , а уравнение оси круговой цилиндрической поверхности -

$$\frac{(x - x_{01})}{(x_{02} - x_{01})} = \frac{(y - y_{01})}{(y_{02} - y_{01})} = \frac{(z - z_{01})}{(z_{02} - z_{01})}.$$

Используя формулы преобразования координат, координаты любой точки поверхности (точки пересечения оси цилиндрической и плоской поверхностей, линии пересечения плоскостей, координаты точек пересечения осей цилиндрических поверхностей с общим перпендикуляром и пр.) могут быть вычислены в требуемой системе координат.

В результате будут известны:

- координаты точки  $A$  начала системы координат  $\overline{O_0 X_0 Y_0 Z_0}$ , смещённой в положительном направлении вдоль оси  $X_0$  на размер толщины уплотнительной прокладки, и точки  $D$  начала системы координат  $\overline{O_1 X_1 Y_1 Z_1}$  в этой же системе координат, смещённой вдоль оси  $X_1$  в отрицательном направлении на размер толщины уплотнительной прокладки;
- расположение плоских поверхностей помех (коэффициенты уравнения плоских поверхностей) в системе координат  $\overline{O_0 X_0 Y_0 Z_0}$ ;

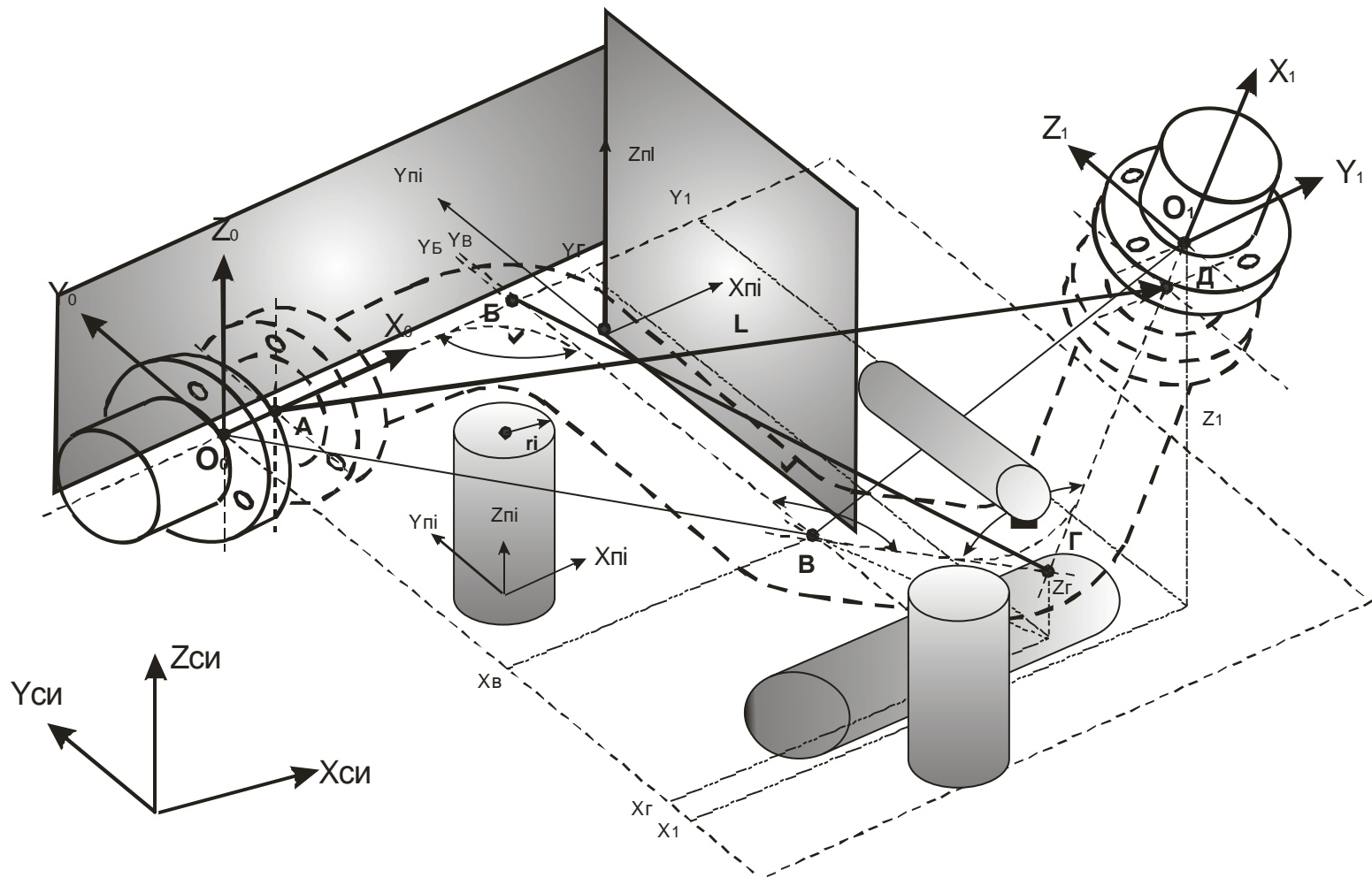


Рис.4. Схема систем координат для расчёта геометрических размеров “забойного” участка трубопровода.

- расположение осей цилиндрических поверхностей помех и их радиусы в системе координат  $\overline{O_0 X_0 Y_0 Z_0}$ .

Алгоритм проектирования «забойного» участка:

1. Вдоль оси  $\overline{X_0}$  отложить отрезок, длина которого равна минимальной длине (по технологическим соображениям) первого прямого участка. Вдоль оси  $\overline{X_1}$  - отрезок, равный минимальной длине последнего прямого участка.

2. Составить уравнение цилиндрической поверхности заданного диаметра, ось которой проходит через точки  $A'$  и  $D'$  с координатами  $\begin{vmatrix} x_0^1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}^T$  и  $\begin{vmatrix} x_0^i & y_0^i & z_0^i & 1 \end{vmatrix}^T$  соответственно. Уравнение цилиндрической поверхности составляется сначала в системе координат с началом в точке  $A'$ , ось  $x$  которой направлена вдоль прямой  $A'D'$ , ось  $y$  параллельна плоскости  $\overline{O_0 X_0 Y_0}$ , ось  $z$  дополняет систему до правой системы координат. А затем с помощью формул преобразования координат (М3, М3а, М7, М7а) вычисляются коэффициенты уравнения цилиндрической поверхности в системе координат  $\overline{O_0 X_0 Y_0 Z_0}$ .

3. Решить  $i$  ( $i$  - количество помех) систем уравнений, одно из уравнений которых уравнение цилиндрической поверхности (п.2), а второе уравнение  $i$ -ой помехи, в пределах объёма ограниченного координатами радиус-вектора  $AD$ .

3.1. Если ни одна из систем уравнений не имеет решений, то поверхности не пересекаются. Выбираются из технологических соображений углы погиба в плоскостях  $AA'D'$  и  $A'D'D'$  и вычисляется угол разворота  $\omega$  последнего прямого участка относительно предыдущей плоскости погиба ( $AA'D'$ ) - угол между плоскостями  $AA'D'$  и  $A'D'D'$  по формуле –

$$\omega = \arccos\left(\pm \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}\right).$$

На этом проектирование участка заканчивается.

3.2. Если какая либо из систем уравнений имеет решение, то поверхности пересекаются. В этом случае необходимо провести корректировку прохождения трубопровода.

При пересечении трубы с плоской поверхностью помех из крайних точек оси трубы на плоскость помехи опускаются перпендикуляры, и ось трубы разворачивают на угол

$$\alpha = \arccos\left(\frac{h_{max} - h_{min}}{\sqrt{\overrightarrow{O_2 - x_{01}}^2 + \overrightarrow{O_2 - y_{01}}^2 + \overrightarrow{O_1 - z_{01}}^2}}\right).$$

Расстояние от оси трубы до плоской поверхности помехи выбирают из условия -  $h_i \geq r_{mp} + \Delta$ , где  $\Delta$  технологический зазор между поверхностью трубы и плоской поверхностью помехи.

При пересечении трубы с цилиндрической поверхностью помехи вычисляют кратчайшее расстояние между осями цилиндрических поверхностей (длину общего перпендикуляра) –

$$h_i = \frac{|(r_2 - r_1) \cdot a_1 a_2|}{\sqrt{(a_1 \times a_2)^2}}$$

для скрещивающихся прямых и

$$h_i = \frac{\sqrt{|(r_2 - r_1) \times a_1|^2}}{\sqrt{(a_1)^2}}$$

для параллельных прямых. Здесь  $r_1$  и  $r_2$  - радиус-векторы произвольных точек, лежащих на осях цилиндров,  $a_1$  и  $a_2$  - направляющие векторы осей цилиндров.

Ось трубы разворачивают в плоскости перпендикулярной предыдущей плоскости погиба.

Расстояние между осями труб выбирают из условия  $h_i \geq r_{mp1} + r_{mp2} + \Delta$ . Расстояние от точки пересечения общего перпендикуляра с осью трубы проектируемого участка до точки перегиба оси трубы вычисляется по формуле (см. схему)–

$$l = (r_{mp1} + r_{mp2} + \Delta) \sin \lambda + \frac{(r_{mp1} + r_{mp2} + \Delta) \cos \lambda - h_i}{\operatorname{tg}(90 - \lambda)}.$$

4. Пункт 3 выполняется до тех пор, пока ось предпоследнего прямого участка не пересечёт точку  $D'$ .

5. По известным координатам точек пересечения осей труб базового и ответного фланцев с плоскостями фланцев, и осей отверстий под крепёжные детали с плоскостями фланцев разворачивают и смещают системы координат базового и ответного фланцев (по формулам преобразования координат) так, чтобы их начало совпадало с точками пересечения осей труб и плоскостями фланцев, а плоскости  $XOY$  совпадали с плоскостями погибов первого и второго прямых участков и последнего и предпоследнего прямых участков соответственно.

После последнего преобразования в системе координат базового фланца будут известны длины прямых участков, углы погибов, углы между плоскостями погибов, углы от плоскостей  $XOY$  базового и ответного фланцев до осей отверстий под крепёжные детали и общая длина  $L$  от начала координат базового фланца до начала координат ответного фланца.

Полученные данные позволяют составить программу операций гибки трубы на станке с ЧПУ так, что обеспечивается совпадение конструкторских, технологических и метрологических баз, а это, в свою очередь, уменьшает погрешность изготовления трубопроводов.

Из условия совпадения конструкторских и технологических баз определены контролируемые параметры трубогибочных станков с ЧПУ и сборочных стендов:

1. Погрешность позиционирования по линейному перемещению патрона вдоль станины.
2. Погрешность углового позиционирования планшайбы гибочного диска в диапазоне 0-360°.
3. Погрешность углового позиционирования патрона в диапазоне 0-360°.
4. Линейный размер от оси поворота направляющей ползуна до оси вращения планшайбы гибочного диска.
5. Линейный размер от оси поворота направляющего ползуна до переднего торца направляющей ползуна.

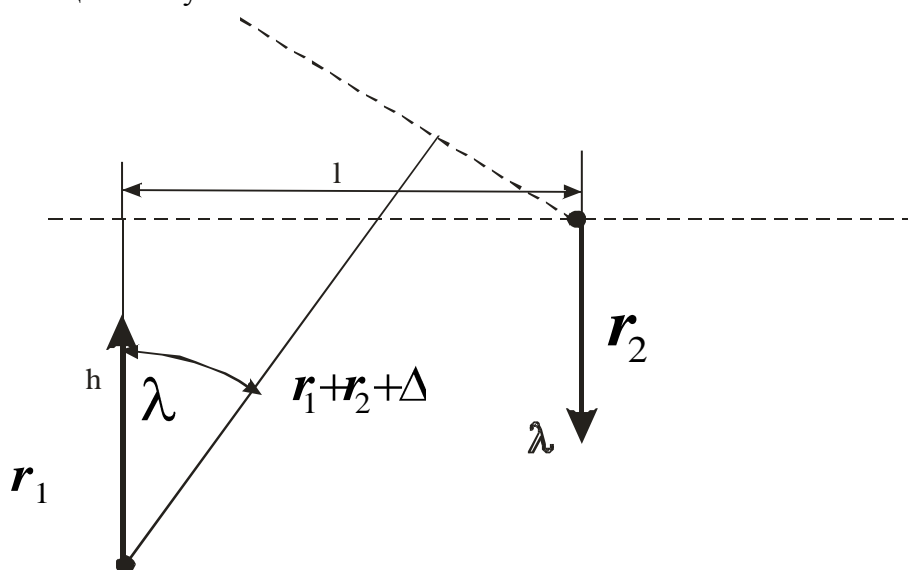


Схема расчёта расстояния  $l$

6. Эксцентриситет ручья гибочного диска относительно оси планшайбы.
7. Погрешность позиционирования на всём диапазоне перемещения подвижного диска сборочного стенда.
8. Погрешность позиционирования по углу разворота подвижного диска сборочного стенда вокруг двух перпендикулярных осей.

Также в главе 2 на основании проведённого анализа сделан следующий вывод - *при измерении параметров технологических процессов и крупногабаритных конструкций судостроительного производства, а также характеристик точности металлообрабатывающего оборудования и оснастки рекомендуется выбирать средства и методики выполнения измерений, доверительный интервал погрешности которых не превышает 20% от допуска на контролируемый параметр.*

Номенклатура измеряемых параметров и требования к погрешности измерения для спецсистем установлены в технических требованиях на их изготовление и монтаж.

**В третьей главе** оценена погрешность измерения координат пространственных точек тахеометрами, погрешность измерения геометрических параметров ГРМ, трубогибочных станков и сборочных стендов.

При исследовании погрешности измерения координат тахеометрами установлено: не исключённые систематические погрешности обычно не превышают 2÷3% от допустимого значения инструментальной погрешности; погрешность измерения координат пространственных точек зависит от расположения измеряемой точки относительно осей декартовой системы координат; основное влияние на погрешность измерения координат оказывают случайные погрешности.

К погрешностям, влияющим на результат измерения координат при произвольном ориентировании оси X (Y), относятся четыре группы случайных погрешностей:

1. Погрешность установки прибора в плоскость горизонта, включающая погрешность уровня при горизонтальном лимбе или погрешность компенсатора наклона вертикальной оси (если он установлен), погрешность вертикальной осевой системы, погрешность неустойчивости низка прибора -  $\sigma_\gamma$ .

2. Погрешность измерения горизонтальных углов, включающая погрешность от недостаточной чувствительности устройства наведения на измеряемую точку, погрешность визирования, суммарную погрешность отсчёта по окулярному микрометру (если процесс отсчёта не автоматизирован), погрешность горизонтального лимба, погрешность неустойчивости низка прибора -  $\sigma_\alpha$ .

3. Погрешность измерения вертикальных углов, включающая погрешность от недостаточной чувствительности устройства наведения на измеряемую точку, погрешность визирования, суммарную погрешность отсчёта по окулярному микрометру (если процесс отсчёта не автоматизирован), погрешность вертикального лимба, погрешность уровня при вертикальном лимбе или погрешность компенсатора, погрешность неустойчивости низка прибора -  $\sigma_\beta$ .

4. Погрешность измерения расстояний дальномером тахеометра -  $\sigma_l$ .

Суммарный случайный вектор ошибки от случайных величин  $\delta\alpha, \delta\beta, \delta l$ , в которые входят не исключённые систематические ошибки, равен сумме векторов  $l\delta\alpha, l\delta\beta, \delta l$  (ввиду малости отклонений углов), а его модуль -

$$\delta r_{\alpha\beta l} = \sqrt{l^2\delta\alpha^2 + l^2\delta\beta^2 + \delta l^2}$$

среднее квадратическое отклонение суммарного вектора ошибки, на основании теоремы сложения дисперсий -

$$\sigma_{\delta r} = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_l^2}.$$

Выведены формулы для расчёта погрешностей  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ :



$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_l^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sigma_\alpha^2 \sin^2 \alpha + \sigma_\beta^2 \sin^2 \beta \cos^2 \alpha};$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_l^2 \cos^2 \beta \sin^2 \alpha + \sigma_\alpha^2 \cos^2 \alpha + \sigma_\beta^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta};$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_l^2 \sin^2 \beta + \sigma_\beta^2 \cos^2 \beta}.$$

По формулам вычислены значения погрешностей измерения координат в диапазоне расстояний от 0 до 125 метров.

Анализ выполненных расчётов показывает, что при соотношении погрешностей  $\frac{\sigma_\alpha(\sigma_\beta)}{\sigma_l} \geq 0,325$  и расстояниях до измеряемой точки более 25 метров разность средних

квадратических погрешностей по осям  $x, y, z$  не превышает 0,05 мм. Такое значение разностей погрешностей оказывает незначительное влияние на погрешность аппроксимации функций по результатам измерения координат, и поэтому ею можно пренебречь. При дистанциях 25 и менее метров и соотношении погрешностей  $\leq 0,325$  разность погрешностей целесообразно учитывать при обработке результатов измерений введением весовых коэффициентов в формулы расчёта коэффициентов уравнения поверхности. Графики погрешностей для дистанции 25 метров для тахеометра TDM5005 приведены на рис. 5.

На основании проведённых исследований сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. При разработке методик выполнения измерений, выполнении измерений судостроительных конструкций необходимо учитывать изменение погрешностей координат в зависимости от расположения объекта относительно системы координат тахеометра.

2. При выполнении измерений геометрических параметров в системе координат объекта систему координат тахеометра необходимо располагать таким образом, чтобы минимизировать погрешность расположения базовых элементов (точек, линий, плоскостей, цилиндров и т.п.).

3. При невозможности оптимального (с точки зрения минимальной погрешности) расположения системы координат тахеометра относительно измеряемых координат поверхностей объекта необходимо учитывать веса погрешностей измерения координат при последующей аппроксимации функций поверхностей.

4. Разность погрешностей по осям  $x, y, z$  следует учитывать, когда доверительный интервал погрешности  $2\sigma$  превышает 20% допуска на контролируемый параметр. Например, для отклонений от плоскостности комингсов (допуск 0,2мм), нанесение базовых линий относительно ДП (допуск  $-0,5 \div 1$ мм) и пр.

Рекомендации по базированию тахеометра относительно измеряемого объекта на дистанциях менее 25 метров.

1. При переносе параллельных направлений (база – линия) ось X или Y системы координат тахеометра целесообразно располагать параллельно обоим направлениям в центре прямоугольника, длинными сторонами которого являются базовые линии.

2. При измерении координат точек на плоских поверхностях ось X или Y системы координат тахеометра целесообразно располагать параллельно измеряемой плоскости.

3. При измерении координат точек на цилиндрических поверхностях ось X или Y тахеометра также должна быть параллельна оси цилиндра.

4. При измерении размеров объектов и отклонений их взаимного расположения относительно базовых плоскостей предпочтительное расположение системы координат тахеометра: начало – на равных расстояниях от контролируемых объектов: ось X или Y параллельно основному базовому элементу, например ДП.

В третьей главе также выбрана номенклатура средств измерений для контроля параметров ГРМ, трубогибочных станков и стандов для сборки труб. Для минимизации погрешностей изготовления труб на станках, схемы измерений параметров станков выбраны таким образом, чтобы совпадали конструкторские, технологические и измерительные базы. Кроме того, для повышения точности согласования систем координат при перестановках

мобильных КИМ используются конические отверстия, а не сферы, входящие в комплект КИМ. При согласовании систем координат по трём сферам вносится дополнительная погрешность, поскольку координаты центра сферы являются функцией от измеренных координат точек (минимум 5) на сфере. При использовании конического отверстия присутствует только погрешность измерения координат одной точки, причём независимо от имеемого отклонения от параллельности оси отверстия и оси щупа (Рис.6).

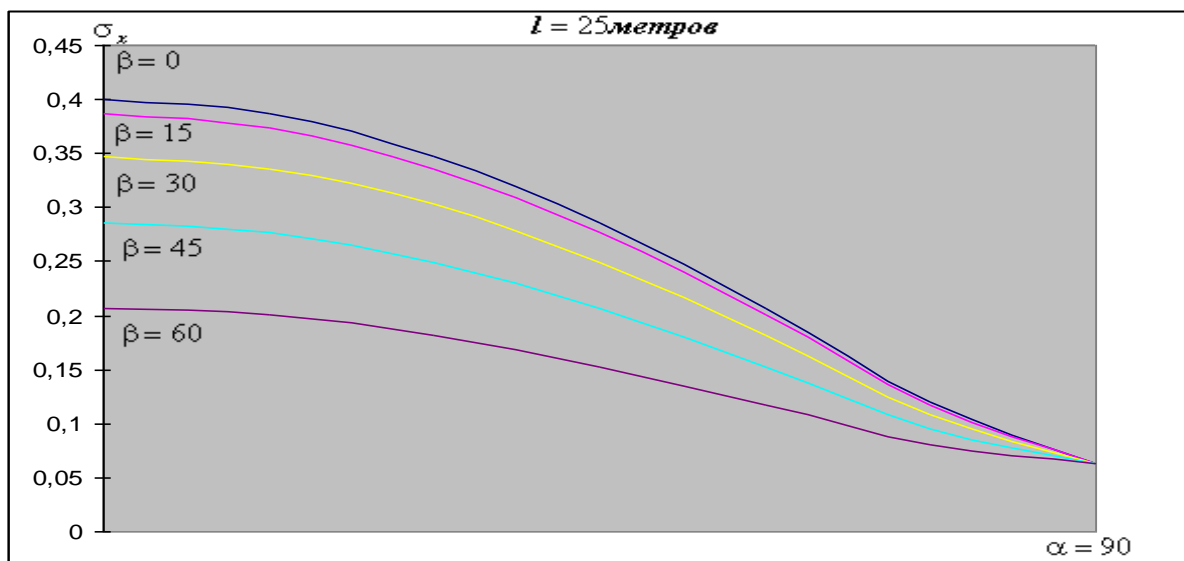
Погрешность измерения координаты точки по коническому отверстию, для КИМ «FARO» например, составляет  $\pm 0,006$  мм. При согласовании систем координат измеряют координаты неподвижных точек (минимум трёх) сначала в системе  $X_1, Y_1, Z_1$ , затем в системе  $X_2, Y_2, Z_2$ . Связь координат  $x_1^i, y_1^i, z_1^i$  каждой точки с координатами  $x_2^i, y_2^i, z_2^i$  выражается формулами преобразования систем координат. Так как длины прямых, соединяющих точки между собой известны (определяются по координатам в каждой системе), то можно вычислить значения углов  $\varphi, \psi, \theta$ , на которые необходимо развернуть новую систему координат  $X_2, Y_2, Z_2$  вокруг своих осей относительно старой так, чтобы их оси были параллельны. Затем совместить начала систем координат и получить значения  $x_1^i, y_1^i, z_1^i$  координат точек в системе  $X_1, Y_1, Z_1$ . Погрешность новых координат в старой системе увеличится за счёт неточного вычисления углов  $\varphi, \psi, \theta$ , как разности проекций прямых на координатные плоскости в разных системах, вследствие погрешности измерения координат в каждой системе.

Следовательно, погрешность измерения координат увеличится на значение –  $\delta x^i(y^i, z^i) = \sqrt{\delta x_1^{i2} + \delta x_2^{i2}} \approx \sqrt{2} \cdot \delta x_1^{i2}$  (из условия равенства  $\delta x_1^i \approx \delta x_2^i$ ), где нижние индексы – номер системы координат.

Таким образом, при каждой перестановке КИМ погрешность измерения координат точек увеличивается на  $\sqrt{2}$ . При  $n$  перестановках значение погрешности составит  $\sqrt{n} \cdot \delta x(y, z)$ .

При измерении размеров трубогибочных станков и сборочных стендов мобильными КИМ погрешность измерения размеров, с учётом увеличения погрешности измерения координат составит –

$\delta = \sqrt{3} \cdot (0,005 + 0,008 \cdot 750/1000) \approx 0,019 \text{ мм}$ , т.е. не превышает 20% допуска на контролируемый параметр.



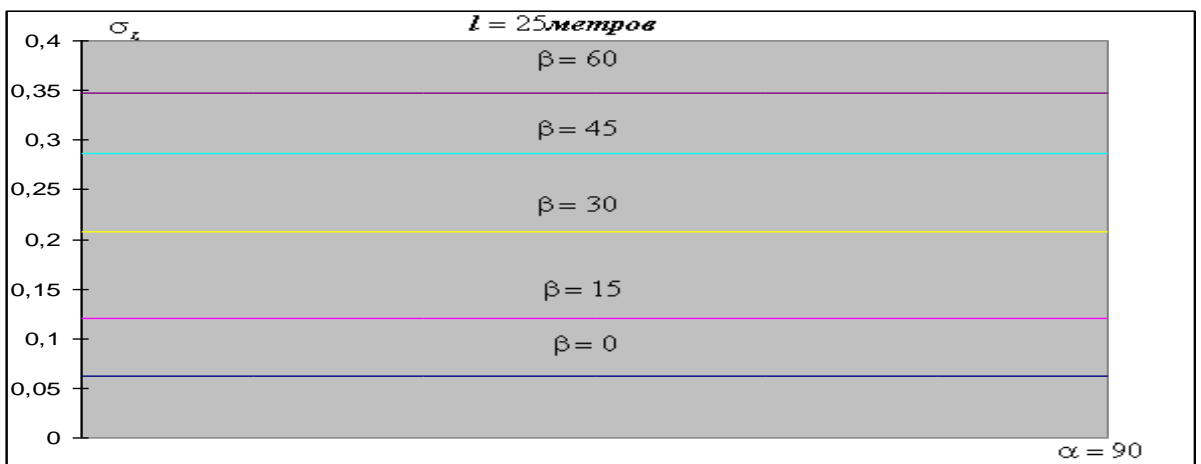
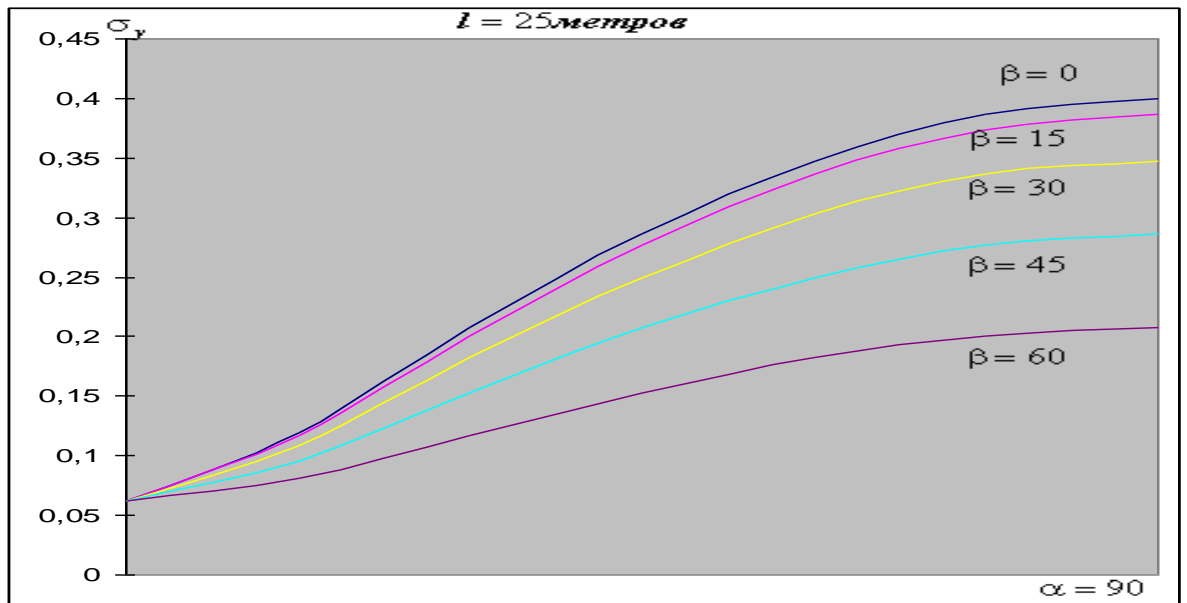


Рис. 5 Средние квадратические погрешности  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  измерения координат точек тахеометром.

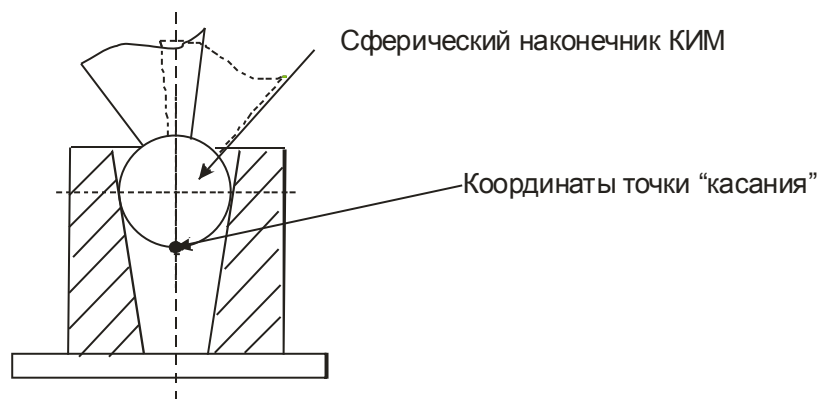


Рис.6 Втулка

В целом можно сделать вывод – для измерения геометрических характеристик трубогибочных станков и сборочных стандов допустимо использовать мобильные КИМ, при этом измеряются все геометрические параметры станка, влияющие на качество изготовления труб.

В четвёртой главе рассмотрены вопросы обеспечения единства измерений тахеометров и мобильных КИМ.

Одним из условий получения результата измерения параметра с требуемой точностью является знание составляющих погрешностей средств измерений, оказывающих влияние на результаты измерений координат. Вторым условием является аттестация методик выполнения измерений. Погрешность измерения координат может быть определена расчётным путём, при известных значениях составляющих погрешностей, или при поверке средств измерений с использованием эталонов. Следует отметить, что учесть влияние атмосферных условий расчётным путём теоретически возможно, но очень сложно. Для такого расчёта необходимо иметь информацию о температуре, плотности воздуха, скорости ветра, влажности, давлении во всём объёме, в котором выполняются измерения. Расположить первичные преобразователи для контроля этих параметров в стапельном цехе возможно, на открытых стапелях и в период достроечных работ на плаву практически невозможно.

При поверке погрешности измерения координат пространственных точек с применением стандов-эталонов возможно создать условия для измерения температуры, влажности, скорости ветра и пр. и оценить дополнительную погрешность измерения координат, вносимую внешними условиями. Поэтому использование стандов-эталонов для поверки погрешности измерения координат тахеометрами представляется целесообразным. Возможно не на постоянной основе, а для изучения влияния внешних воздействующих факторов на погрешность измерения координат, результаты которого могут быть использованы при расчётном оценивании погрешностей.

Для мобильных КИМ с диапазоном измерения до 3,5 метров теоретически возможно выполнить расчётное оценивание погрешностей, но отсутствие данных о составляющих погрешностей отдельных звеньев кинематической схемы не позволяет выполнить такие расчёты. Поверку этих КИМ целесообразно осуществлять по эталонам.

При расчётном оценивании погрешностей измерения координат точек тахеометрами кроме инструментальных погрешностей необходимо учитывать методические и теоретические погрешности: погрешность передачи единицы угла от эталонов к рабочим мерам тахеометра (горизонтальному и вертикальному лимбам); погрешность передачи единицы длины от эталонов к дальномеру тахеометра; точность определения поправок погрешности диаметров лимбов; погрешность установки тахеометров (погрешность центрирования и погрешность установки относительно баз). Погрешность центрирования учитывается в том случае, если тахеометр устанавливается относительно заданной точки по условиям выполнения измерений. Например, заданная точка является началом системы координат или расположена на одной из осей системы координат или на определённом расстоянии от одной из осей системы координат. В общем случае начало системы координат тахеометра, в которой в дальнейшем будут измеряться координаты точек объекта, смещено вдоль трёх осей X, Y и Z (рис. 7). Значения линейных смещений равны:  $\delta x = e \cos \alpha$ ;  $\delta y = e \sin \beta$ ;  $\delta z = \delta_{наб}$ . Погрешность измеренных координат объекта из-за погрешности центрирования рассчитываются по формулам.

Матрица линейных смещений –

$$M_{xyz} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & e \cos \alpha \\ 0 & 1 & 0 & e \sin \alpha \\ 0 & 0 & 1 & \delta_{наб} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

матрица угловых смещений, с учётом малости углов  $\psi, \theta$  –

$$M_{\psi\theta} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & \psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\psi & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & -\theta & 0 & 0 \\ \theta & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -\theta & \psi & 0 \\ \theta & 1 & 0 & 0 \\ -\psi & \psi\theta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

итоговая матрица линейных и угловых смещений –

$$M = \begin{vmatrix} 1 & -\theta & \psi & e \cos \alpha \\ \theta & 1 & 0 & e \sin \alpha \\ -\psi & \psi\theta & 1 & \delta_{нас} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Окончательно погрешность измерения координат точек из-за погрешности

центрирования -

$$\Delta = \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{vmatrix} - M^{-1} \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} z\psi + e \cos \alpha - y\theta \\ x\theta + e \sin \alpha \\ \delta_{нас} - y\psi\theta - x\psi \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Эталон для проверки погрешности измерения пространственных координат точек можно реализовать, если материализовать оси  $X, Y, Z$  как это представлено, например, на рис.9.

Макет такого эталона был воспроизведён в одном из цехов «Севмашпредприятия», на котором была апробирована методика проверки погрешности измерения координат пространственных точек тахеометрами.

Оси декартовой системы координат  $X, Y, Z$  были материализованы марками с помощью микровыверочных телескопов фирмы «Taylor-Hobson», вспомогательных устройств, входящих в комплект телескопа, эталонов угла – многогранных призм (12 и 24 грани) второго разряда с погрешностью аттестации  $\pm 0,3''$ , автоколлиматора АК0,25 первого разряда, нивелира Ni007.

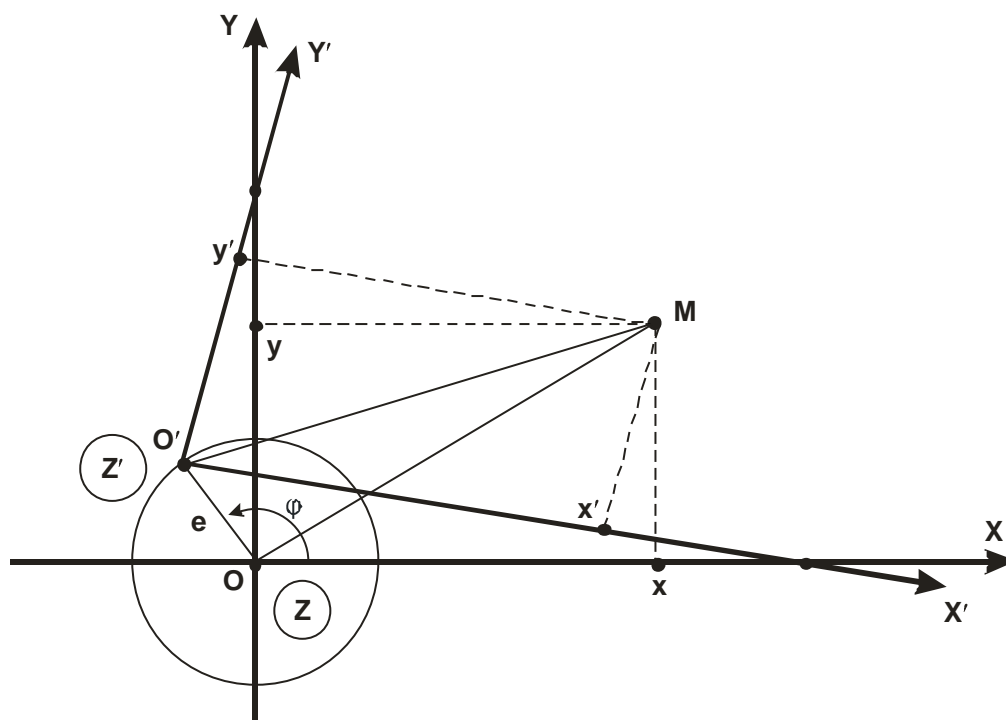
*Погрешность материализации декартовой системы координат.*

При измерении расстояний между точками  $a'-b', a'-c', a'-d', a'-e', a'-f'$  могут быть использованы мерные проволоки длиной до 24 метров, измерительные ленты длиной 24 или 50 метров, интерферометры.

Доверительная абсолютная погрешность измерительных лент второго разряда при доверительной вероятности 0,99 составляет  $2+2L$  мкм, измерительных лент третьего разряда –  $10 + 10L$  мкм. Предельно допускаемая абсолютная погрешность мерных проволок ( $L=24$ метра) не превышает 20 мкм. Предельно допускаемая абсолютная погрешность интерферометра ML10 не превышает 0,7 мкм/метр. Расчёт погрешностей измерения расстояний мерными проволоками, измерительными лентами и интерферометром приведены в таблице.

Таблица

№ п/п	Измеряемое расстояние (м)	Погрешность измерения (мкм)			
		Мерная проволока	Мерная лента		Интерферометр ML10
			L=24м(2р)	L=50м(3р)	
1	10	20	22	110	7
2	20	20	42	210	14
3	24	20	50	250	16,8
4	30	-	-	310	21
5	40	-	-	410	28
6	50	-	-	510	-



$O'$  - фактическая точка установки тахеометра  
 $e$  - погрешность установки тахеометра по оптическому отвесу  
 $\delta Z'$  - погрешность установки по высоте  
 $x, y, z$  - истинные значения координат точки  $M$   
 $x', y', z'$  - фактические значения координат точки  $M$

Рис.7. Погрешность центрирования.

Из таблицы видно, что наибольшую точность при измерении линейных расстояний между марками станда, при прочих равных условиях, можно получить с помощью интерферометра. При измерении расстояний интерферометр будет измерять длину пространственной кривой, повторяющую форму направляющих, по которым перемещается отражатель от начальной точки к конечной, например, от  $a'$  к  $b'$ . Отклонение от прямолинейности направляющих не должно превышать диапазона перемещения отражателя перпендикулярно направлению измерения длины, которое для интерферометра ML10 составляет  $\pm 1$  мм и при котором интенсивность отражённого сигнала находится в пределах допустимых значений. На измеряемых дистанциях свыше 8000 мм влияние такого отклонения от прямолинейности направляющих незначительно - 0,12 мкм или 2% от погрешности измерения расстояния. Поэтому для измерения расстояний между марками станда интерферометром необходимо обеспечить прямолинейность направляющих, по которым перемещается отражатель, в пределах  $\pm 1$  мм.

#### Измерение углов.

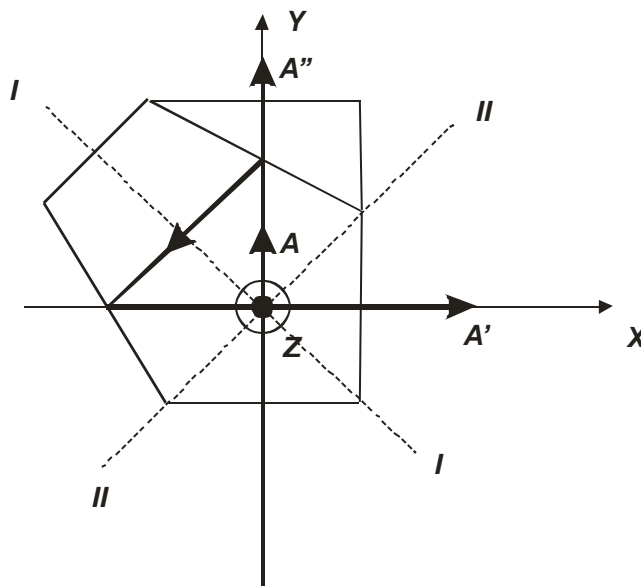
Средняя квадратическая погрешность измерения углов 30 и 45 градусов, с учётом погрешности совмещения перекрестия микровыверочного телескопа с центром катафотного отражателя -  $\pm 0,4''$ .

#### Погрешность установки марок и катафотных отражателей.

Для передачи направлений углов предложено использовать специальные пентапризмы с клином (рис.8) Это позволяет одновременно выполнять измерение отклонений относительно двух взаимноперпендикулярных визирных осей.

Отклонение взаимноперпендикулярных направлений от угла  $90^\circ$ , вследствие неточности изготовления клина и пентапризм не превышает, как правило,  $\pm 1''$ . Линейные смещения точки пересечения особых направлений относительно визирной оси  $A$  приводят к линейному смещению выходного луча  $A'$ . Развороты пентапризмы вокруг особых направлений приводят к увеличению погрешности передачи взаимноперпендикулярных направлений. При

жёсткой фиксации пентапризмы с клином на визирной трубе (телескопе) линейные смещения точки пересечения особых направлений относительно визирной оси не превышают 0,001 мм, а угловые развороты вокруг особых направлений  $\pm 1''$ . В этом случае погрешность передачи взаимноперпендикулярных направлений не превышает 1,5". Если требуется передавать взаимноперпендикулярные направления с более высокой точностью, целесообразно аттестовать угол  $90^\circ$  по многогранной призме и двум автоколлиматорам 1-го разряда. В этом случае погрешность аттестации не превысит 0,3".



*I, II, I, II* - особые направления  
**A** - визирная ось  
**X, Y, Z** - оси системы координат  
**A', A''** - преломлённый и прямой лучи соответственно

Рис.8. Пентапризма с клином.

Средняя квадратическая погрешность измерения углов 30 и 45 градусов, с учётом погрешности совмещения перекрестия микровыверочного телескопа с центром катафотного отражателя -  $\pm 0,4''$ .

Суммарная погрешность установки марок и катафотных отражателей по визирным осям телескопов (с учётом погрешности перефокусировки, погрешности совмещения центра отражателя с перекрестиями телескопов, погрешности преломления визирной оси пентапризмой) составляет  $\pm \sqrt{0,05^2 + 0,063^2 + 0,05^2} \approx \pm 0,1 \text{ мм}$ .

Суммарная погрешность установки отражателей по координатам **X** и **Y** равна  $\pm \sqrt{0,1^2 + 0,0075^2} \approx 0,1 \text{ мм}$ . По координате **Z** -  $\pm \sqrt{\text{tg}^2 \gamma_i \sigma_x^2 + (-x \text{ctg}^2 \gamma_i) \sigma_{\gamma_i}^2} \approx 0,1 \text{ мм}$ .

Погрешность установки катафотных отражателей по координатам **X, Y, Z** макета декартовой системы координат (для углов  $\gamma$  30 и 45 градусов) не превышает 0,11 мм, что составляет 30% и 40% от расчётного значения погрешности измерения координат тахеометром на дистанциях до 25 метров. Доверительная абсолютная погрешность воспроизведения координат при доверительной вероятности 0,95 составляет 0,22 мм.

Таким образом, предложенная схема макета позволяет реализовать декартову систему координат с известными значениями погрешностей контрольных точек. Погрешность реализации координат не превышает 40% от допуска на контролируемый параметр, следовательно, такой стенд можно использовать в качестве эталона для проверки тахеометров. Для измерительных задач решаемых в судостроении стенд может быть ограничен диапазоном координат **X**=120 метров, **Y**=40 метров, **Z**=20 метров.

Погрешность воспроизведения координат пространственных точек представленным эталон-эталон составляет 0,22 мм и соответствует *эталону второго разряда по ГОСТ 8.503 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне 24÷75000 м»*.

Поверка мобильных КИМ может осуществляться по концевым мерам длины или по мерам-эталонам. По концевым мерам длины целесообразно поверять мобильные КИМ с диапазоном измерений до 1000 мм. Поверка КИМ с диапазоном измерений свыше 1000 мм с применением составных блоков концевых мер хоть и обеспечивает требуемую точность, но проблематична с точки зрения практической реализации (закрепление составных блоков к.м.д., поддержание градиента температуры и пр.). Кроме того, учитывая то, что для обеспечения собираемости конструкций без пригоночных операций достаточно измерять только координаты стыкуемых кромок и поверхностей, поверку КИМ целесообразно осуществлять по мерам-эталонам, аттестованным на координатно-измерительных машинах повышенной точности.

Поверка КИМ по мерам-эталонам.

В качестве мер-эталон предлагается использовать чугунные кубы с равномерно распределёнными по поверхности коническими отверстиями или плиты с фиксированным положением на них стоек разной высоты с коническими отверстиями. Координаты точек «касания» наконечника КИМ в конических отверстиях должны быть известны с заданной погрешностью.

Поверка координат  $x_i, y_i, z_i$  точек «касания» может быть проведена стационарными КИМ с известными отклонениями от прямолинейности и ортогональности осей, погрешностями шкал и щуповых головок. Для исключения погрешностей перехода от системы координат КИМ к системе координат меры-эталона аттестацию координат меры-эталона желательно проводить в системе координат меры-эталона. Для этого измеряют координаты двух точек на мере-эталоне максимально удалённых друг от друга и совмещают ось  $X$  КИМ с прямой, проведённой через эти точки с помощью соответствующей функции программного обеспечения. Измеряют третью точку на мере-эталоне, расположенную перпендикулярно прямой, соединяющей две первые точки, и разворачивают систему координат КИМ вокруг оси  $X$  на угол равный  $\arctg(z/y)$ . В итоге получим совмещённые оси  $X$  и  $X'$ , а также плоскости  $XOY$  и  $X'OY'$  КИМ и меры-эталона (рис. 10).

Учёт погрешностей ортогональности, прямолинейности и позиционирования стационарной КИМ можно выполнить по следующему алгоритму.

Радиус-вектор точки «касания» получает возмущения вследствие перечисленных выше отклонений. Изменение радиус-вектора за счёт погрешности позиционирования можно представить в виде –

$$\Delta R'_{noz} = \Delta_{x'}^{x'} + \Delta_{y'}^{y'} + \Delta_{z'}^{z'}, \quad \text{где верхние индексы обозначают}$$

сжатие (растяжение) оси, а нижние ось, в общем случае, неортогональной системы координат КИМ. Абсолютное значение радиус-вектора этой точки в косоугольной системе координат  $X', Y', Z'$ , выраженные через коэффициенты сжатия (растяжения) шкал при линейной зависимости погрешности позиционирования от длины –  $R'_{noz} = \lambda x'_i + \mu y'_i + \nu z'_i$ .

В случае нелинейной зависимости в формулу подставляются функции -  $\lambda = f(L); \mu = f(L), \nu = f(L)$ .

Отклонения от прямолинейности осей КИМ привносят дополнительную погрешность –

$$\begin{aligned} \Delta R'_{прям} &= \Delta_{y'} + \Delta_{z'}; \\ \Delta R'_{прям} &= \Delta_{x'} + \Delta_{z'}; \\ \Delta R'_{прям} &= \Delta_{x'} + \Delta_{y'}. \end{aligned}$$



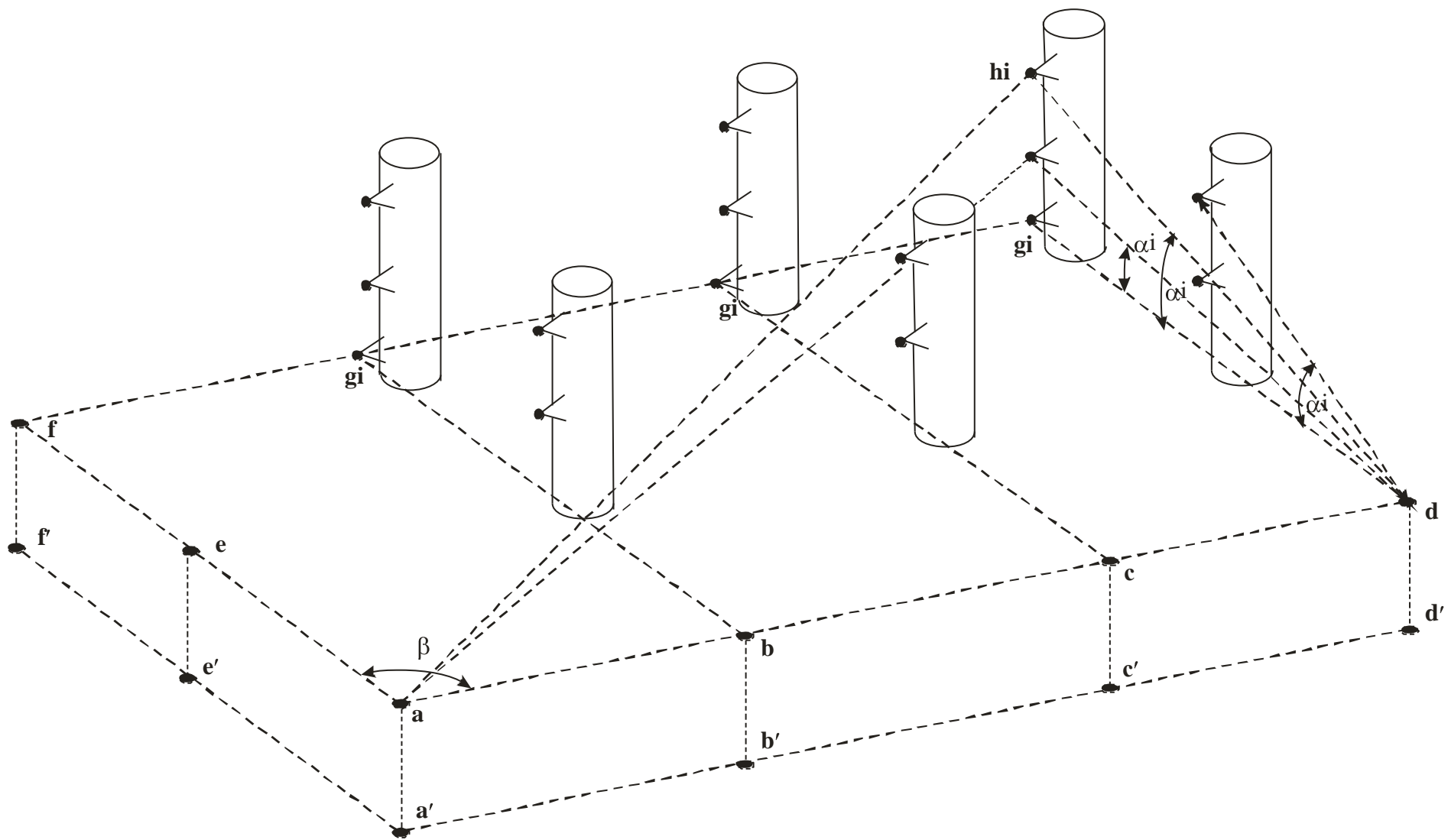


Рис.9. Схема стенда для проверки погрешности измерения координат тахеометрами.

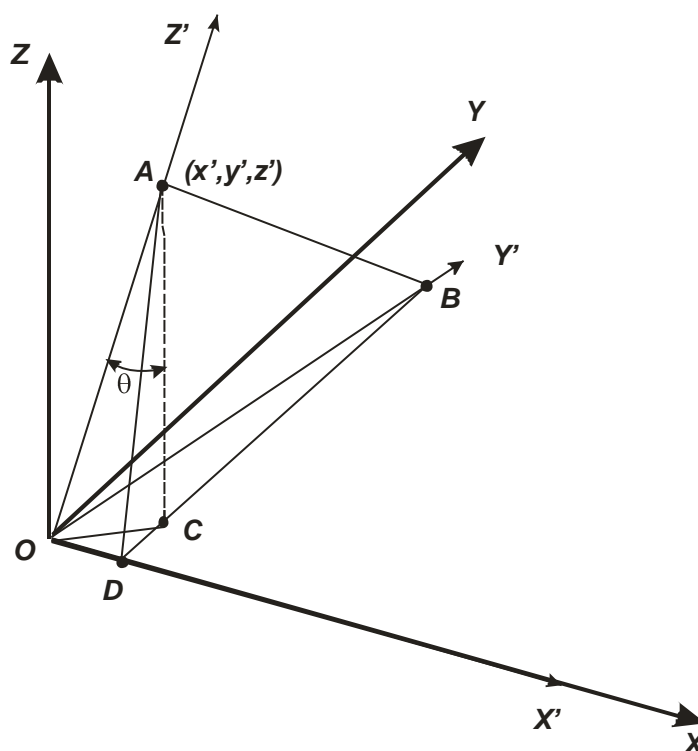


Рис.10 Вектор ошибки неортогональности

Суммарный вектор погрешности из-за отклонений от прямолинейности и погрешности позиционирования в косоугольной системе координат -

$$\Delta R' = \Delta R'_{\text{поз}} + \sum_{x', y', z'} \Delta R'_{\text{прям}}$$

После измерения отклонений от ортогональности осей КИМ будут известны значения углов между осями -  $\alpha_{xy'} = \angle BOD$ ;  $\alpha_{xz'} = \angle AOD$ ;  $\alpha_{y'z'} = \angle AOB$  (рис.11). Также известны координаты  $x', y', z'$   $i$ -ой точки меры эталона, с учётом введённых поправок. Чтобы учесть поправки, вызванные отклонением осей от ортогональности, необходимо найти координаты этой точки в ортогональной системе  $X, Y, Z$ . Координата

$$x' = x_i$$

из условия совмещения осей КИМ и меры-эталона.

Связь координат  $y$  и  $y'$ ,  $z$  и  $z'$  получаем из зависимостей -

$$y_i = y' \cos(90 - \alpha_{yy'}) = y' \cos \alpha_{yy'}$$

$$z_i = \frac{z' \cos \alpha_{xz'} y' \sin \alpha_{y'z'}}{y' \cos \alpha_{xy'}} = z' \cdot \frac{\cos \alpha_{xz'} \sin \alpha_{y'z'}}{\cos \alpha_{xy'}}$$

Таким образом, могут быть рассчитаны значения координат каждой точки меры-эталона, с учётом погрешности позиционирования, отклонений от прямолинейности и перпендикулярности осей КИМ.

### Оценивание погрешности мер-эталонов.

Координаты точек «касания» мер-эталонов в ортогональной системе координат связаны функциональной зависимостью, приведённой выше с координатами косоугольной системы координат (за исключением координаты базовой оси, в нашем случае оси  $X$ ). Поэтому, строго говоря, погрешность аттестации координат этих точек необходимо проводить по методике расчёта погрешностей косвенных измерений. Исходные для расчёта погрешности величины  $x', y', z', \alpha_{yy'}, \alpha_{xz'}, \alpha_{y'z'}, \alpha_{xy'}$  измеряют в разное время – углы при поверке стационарных КИМ, а координаты при аттестации мер-эталонов. В таких случаях результаты, как правило, мало коррелированы, поэтому расчёты выполняются при равных нулю коэффициентах корреляции. Таким образом, при выполнении условий совмещения одной из осей ортогональной и косоугольной систем координат расчёт погрешности аттестации координаты  $x$  проводится по способу обработки результатов прямых многократных измерений, а у и  $z$  по способу обработки результатов косвенных измерений.

Погрешность координаты  $x_i$ .

$$\varepsilon(P) = t \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (x_i - x_i^{cp})^2}{6 \cdot 5}}, \text{ где } t \text{ – коэффициент Стьюдента.}$$

Погрешность координаты  $y'$ .

$$\varepsilon(P) = t \cdot \sqrt{\left( \left( \frac{\partial y}{\partial \alpha_{yy'}} \right)^2 \sigma_{yy'}^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial y'} \right)^2 \sigma_{y'}^2 \right)}.$$

Погрешность координаты  $z$ .

$$\varepsilon(P) = t \cdot \sqrt{\left( \left( \frac{\partial z}{\partial \alpha_{xz'}} \right)^2 \sigma_{xz'}^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial \alpha_{y'z'}} \right)^2 \sigma_{y'z'}^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial \alpha_{xy'}} \right)^2 \sigma_{xy'}^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial z'} \right)^2 \sigma_{z'}^2 \right)}.$$

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

На основании проведённых исследований в диссертации впервые получены следующие научные результаты:

1. Исследована и обоснована необходимая и достаточная номенклатура измеряемых параметров крупногабаритных деталей, блоков, модулей, металлообрабатывающего оборудования.

2. Впервые исследованы и минимизированы путем компенсации погрешности измерения координат пространственных точек поверхностей специализированными трёхкоординатными средствами измерений и разработаны рекомендации по применению этих средств для измерения геометрических параметров крупногабаритных конструкций.

3. Впервые разработан алгоритм проектирования «забойных» участков трубопроводов по измерительной информации.

4. Впервые разработаны эталоны второго разряда для поверки специализированных трёхкоординатных средств измерений в диапазоне 120-40-20 метров.

5. Разработаны проекты поверочных схем для специализированных трёхкоординатных средств измерений (рис.11, 12).

Выполненные научно обоснованные исследования и разработки легли в основу создания новых измерительных технологий в судостроительной отрасли:

- разработан комплекс методик выполнения измерений для контроля ГП крупногабаритных конструкций судостроения, монтажа основных механизмов и спецсистем;
- проведены испытания с целью утверждения типа специализированного измерительно-запоминающего комплекса ИЗК-ПТ-260 для трубообрабатывающего производства;
- разработаны локальные структуры управления измерениями в судокорпусостроении, трубообрабатывающем производстве, при монтаже спецсистем (рис. ).
- экономический эффект от внедрения структуры метрологического обеспечения на строительство серии из 8 танкеров водоизмещением 45000 тонн оценивается ориентировочно в 17 млн. долларов, в трубообрабатывающее производство оценивается в 4-5 млн. рублей в год.

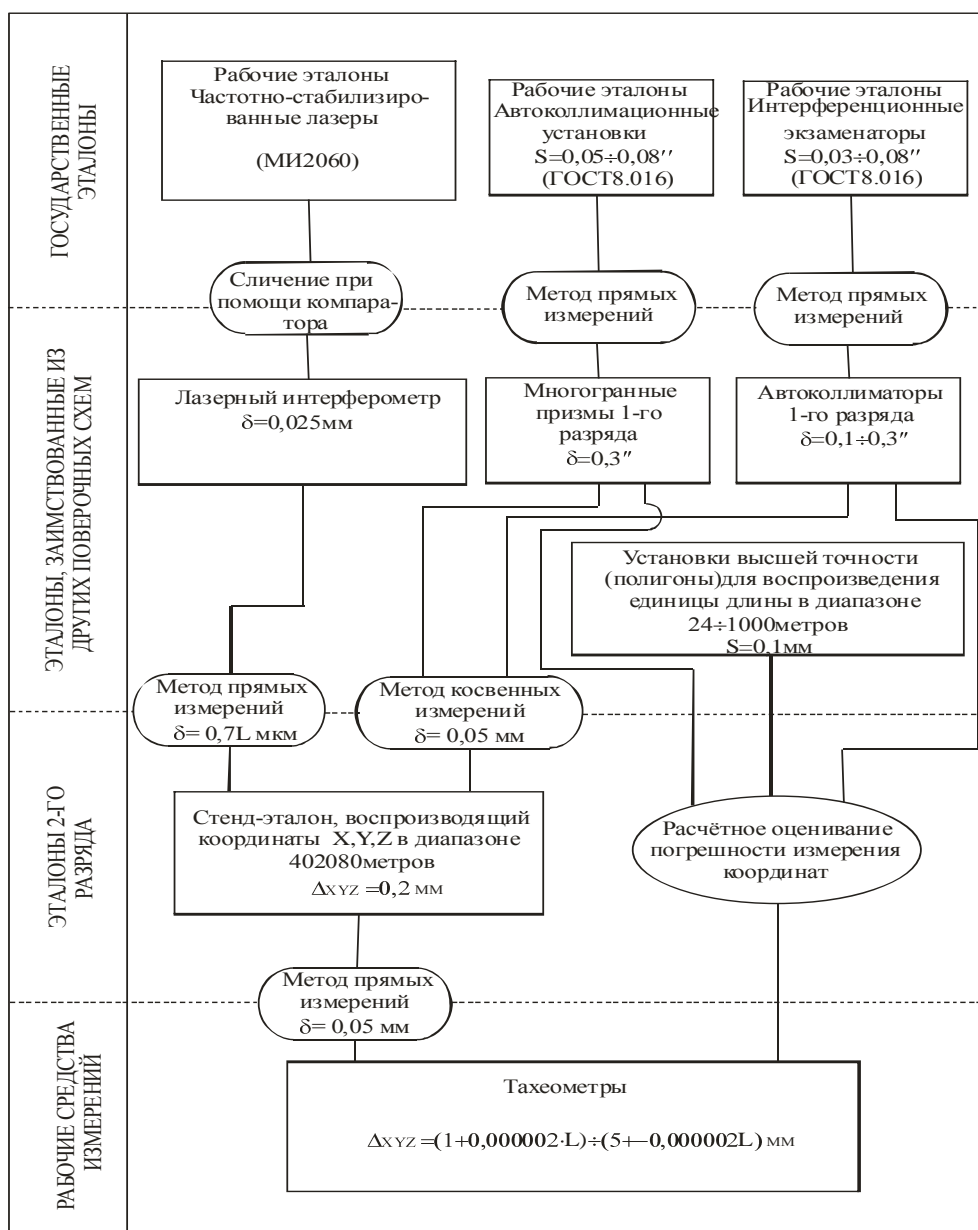


Рис.11 Поверочная схема для тахеометров

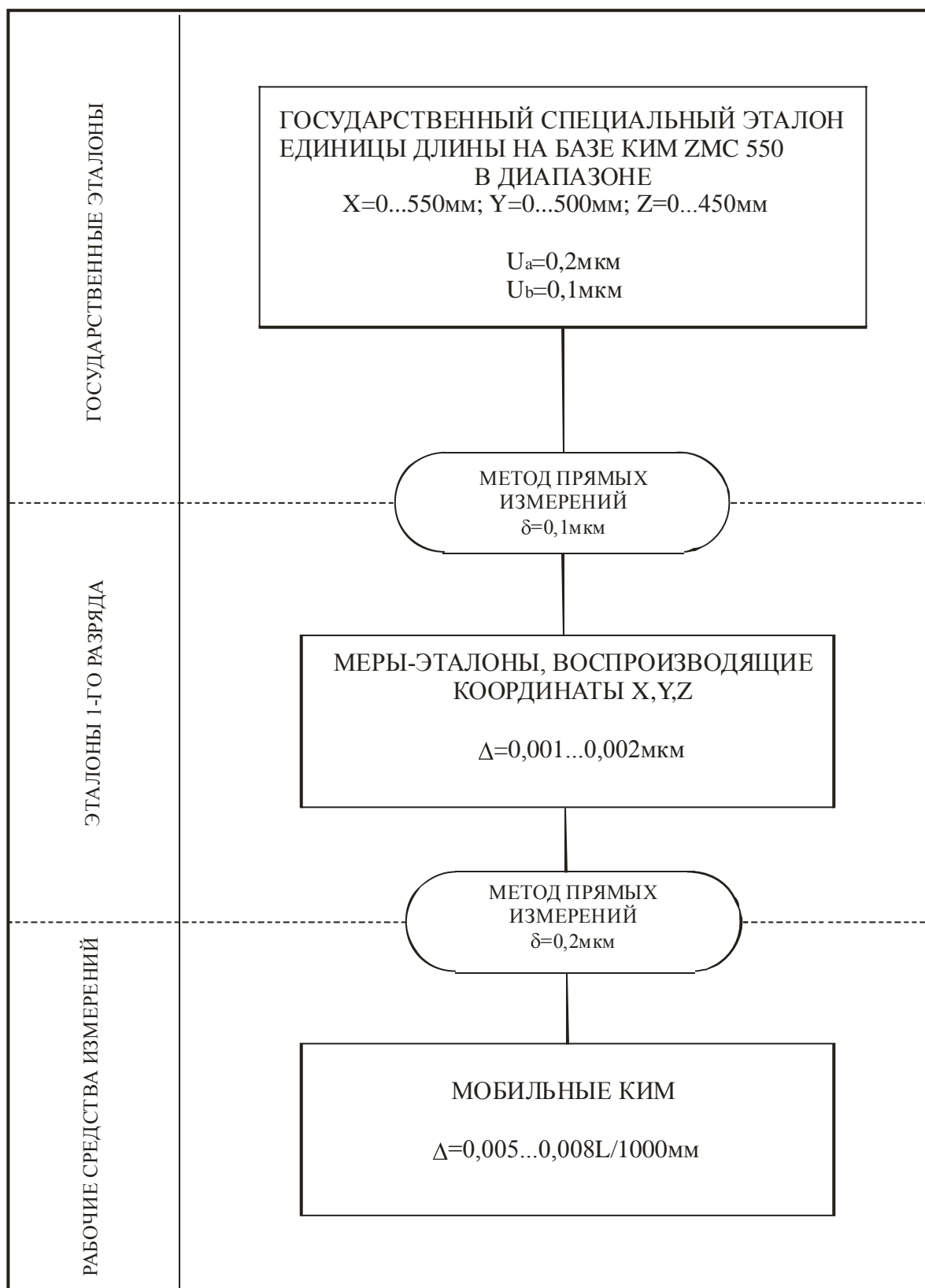


Рис.12 Поверочная\ схема для мобильных КИМ

**Список публикаций автора по исследуемой проблеме:**

1. Федосов К.В., Федосов В.К. «Вопросы метрологического обеспечения качества изготовления изделий судокорпусостроения» Нучно – практическая конференция «100 лет Российскому подводному флоту», г. Северодвинск, март 2006.
2. Федосов К.В. «Алгоритм проектирования «забойных» участков трубопроводов по измерительной информации». Доклад на второй Всероссийской научно-технической конференции «Судометрика-2008», г. Санкт-Петербург, 13-15 октября 2008 г.
3. Федосов К.В. Лысенко В.Г. «О погрешности реализации декартовой системы координат» ГМ, №4 2009.
4. Федосов Е.В., Кононогов С.А., Лысенко В.Г. «Научно-технические проблемы метрологического обеспечения изготовления крупногабаритных изделий судостроительного производства», ЗПМ, №5, 2009.
5. Лысенко В.Г., Федосов, К.В. Брянкин С.Ю. «Приоритетные направления метрологического обеспечения координатных методов измерений геометрических параметров деталей». Научно-практическая конференция «100 лет Российскому подводному флоту», 2-4 марта 2006 года, г. Северодвинск.
6. Лысенко В.Г., Федосов К.В., Брянкин С.Ю., Пошивалов А.В., «Прямые и косвенные методы определения погрешностей щуповой головки координатно-измерительной машины». Научно-практическая конференция «100 лет Российскому подводному флоту», 2-4 марта 2006 года, г. Северодвинск.
7. Лысенко В.Г., Федосов К.В., Брянкин С.Ю., Голубев С.С., «Применение математического моделирования для оценки точности координатных измерений на координатно-измерительных машинах». Научно-практическая конференция «100 лет Российскому подводному флоту», 2-4 марта 2006 года, г. Северодвинск.
8. Кононогов С.А., Лысенко В.Г., Федосов К.В. «Оценка неопределённости координатных измерений в сферической системе координат геометрических параметров крупногабаритных изделий прецизионного машиностроения» ЗПМ, № 1, 2009..

**Список организационных документов и аттестованных методик выполнения измерений.**

- СТП 67-226-2004 «СМК. Метрологическая экспертиза технической документации. Организация и порядок проведения».
- СТП 67-136-2001 «СМК. Метрологическое обеспечение подготовки производства. Общие положения»
- 25.27-1.03.008-2004 «МУ. ГСИ. Методика выполнения измерений пространственного положения приспособлений и фундаментов для установки приборов ЗЧ-30КУ»;
- 25.27-1.03.016-2005 «МУ. ГСИ. Измерение формы обводов V<sub>ip</sub>-яхт пр. А-133. Методика выполнения измерений»;
- 25.27-1.03.014-2005 «МУ. ГСИ. Контроль пространственного расположения осей валопроводов для обеспечения центровки комплексов «ВАЛОПРОВОД – ГТЗА» на зак. 11430. Методика выполнения измерений»;
- 25.27-1.03.015-2005 «МУ. ГСИ. Работы проверочные выполняемые на верхней палубе судна проекта 11430 в условиях нахождения его на плаву. Методика выполнения измерений»;
- 25.27-1.03.013-2006 «МУ. ГСИ. Геометрические параметры гребных винтов. Методика выполнения измерений с помощью электронной координатной измерительной системы Axuz/STM»;
- 25.09-1.03.030-2007 «МУ. ГСИ. Согласование БО ДП 20120. Методика выполнения измерений»;
- 25.27-1.03.038-2007 «МУ. ГСИ. Проверочные работы при монтаже изделий «Ладога-МЛ-3.1» и «Переколка-3.1. Методика выполнения измерений».