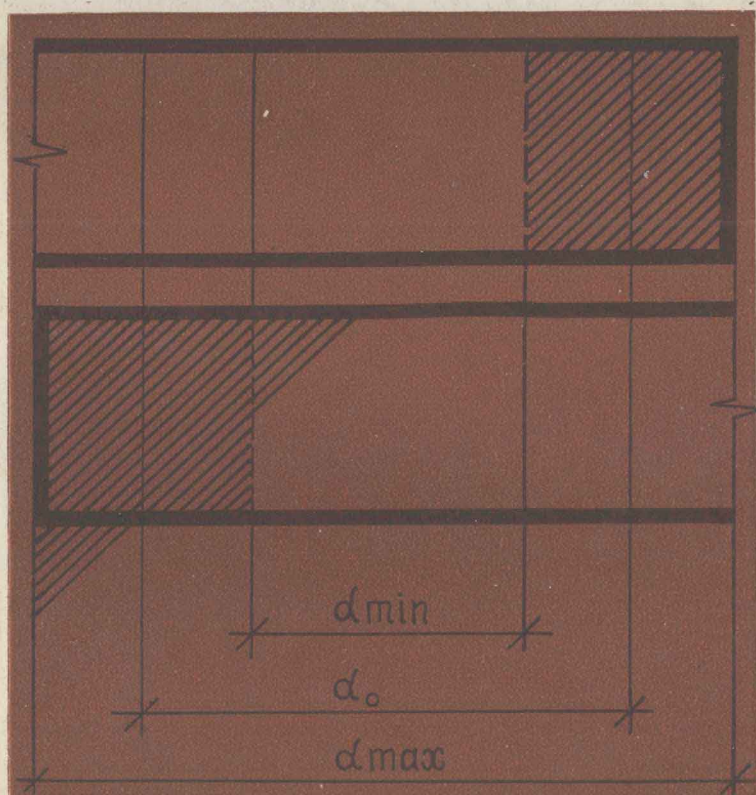


Ю. В. Столбов

# СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНО- МОНТАЖНЫХ РАБОТ



Ю. В. СТОЛБОВ

# СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬНО- МОНТАЖНЫХ РАБОТ



Москва  
Стройиздат  
1982

Рецензент — доцент кафедры инженерной геодезии МИСИ  
им. В. В. Куйбышева канд. техн. наук А. Н. Сухов

**Столбов Ю. В.**

**С 81** Статистические методы контроля качества строительно-монтажных работ. — М.: Стройиздат, 1982. — 87 с., ил.

Изложены вопросы контроля качества строительно-монтажных работ с применением статистических методов. Рассмотрены расчеты допусков на строительно-монтажные и разбивочные работы, норм точности на контрольно-измерительные операции при строительстве подземной и надземной частей зданий и сооружений и монтаже технологического оборудования. Приведены методика количественной оценки качества и статистический контроль строительно-монтажных работ по количественному признаку с учетом погрешностей контрольных измерений и технологических процессов возведения зданий и сооружений.

Для инженерно-технических работников научно-исследовательских, проектных и строительных организаций.

**С**  $\frac{3204000000-536}{047(01)-82}$  158—82.

**ББК 38.6**  
**6С6.03**

© Стройиздат, 1982

## ВВЕДЕНИЕ

В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года сказано о том, что главная задача одиннадцатой пятилетки состоит в обеспечении дальнейшего роста благосостояния советских людей на основе устойчивого, поступательного развития народного хозяйства, ускорения научно-технического прогресса и перевода экономики на интенсивный путь развития, более рационального использования производственного потенциала страны, всемерной экономии всех видов ресурсов и улучшении качества работы.

Особо важное значение проблема повышения качества продукции имеет для строительства, так как выполнение и сдача работ с дефектами приводят к значительным затратам строительных организаций, не говоря уже об ущербе, который несут заказчики. Затраты на устранение дефектов и переделки на отдельных стройках достигают 5% сметной стоимости, а на преждевременный ремонт жилых домов в первые три года эксплуатации в ряде городов — 3%.

По данным НИИСП Госстроя СССР, большая часть обнаруженных дефектов при возведении зданий и сооружений являются следствием нарушения требований Строительных норм и правил и отступлений от проектов. Повышение качества строительно-монтажных работ — один из значительных резервов снижения их себестоимости.

Одной из основных характеристик качества возводимых зданий и сооружений является точность положения строительных конструкций, которая зависит от погрешностей, появляющихся при изготовлении деталей, строительно-монтажных и геодезических разбивочных работах.

Соблюдение в натуре геометрических параметров, заложенных в проектах зданий и сооружений, с необходимой точностью требует внедрения в строительное производство системы управления точностью, как составной части системы управления качеством продукции. Для этого необходимо иметь информацию о ходе технологических процессов и управлять ими. Такое управление возможно при внедрении в производство вероятностно-статистических методов оценки параметров, характеризующих ход технологических процессов, и статистических методов контроля качества строительно-монтажных работ.

В книге изложены вопросы контроля качества строительно-монтажных работ с применением статистических методов. Особое внимание уделено обоснованию взаимосвязанных допусков на строительно-монтажные и геодезические работы, а также норм точности на контрольно-измерительные операции при строительстве подземной и надземной частей зданий и сооружений и монтаже технологического оборудования.

Обоснование допусков выполнено с учетом погрешностей технологических процессов возведения здания или сооружения (строительно-монтажных работ) и контрольных измерений.

# Глава I. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО НАЗНАЧЕНИЮ ДОПУСКОВ И АНАЛИЗУ ТОЧНОСТИ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

## 1. Погрешности и допуски при возведении зданий и сооружений

Одной из важнейших характеристик качества современного индустриального строительства является точность изготовления и установки конструкций в проектное положение, определяющая их прочность, несущую способность, эксплуатационную надежность.

Известно, что размер изготовленной конструкции не всегда совпадает с размером, назначенным в проекте, так как на каждой технологической операции строительно-монтажного процесса возникают погрешности. Расчетные размеры конструкций, указанные в проекте, называют проектными или номинальными  $x_0$ . Действительными или натурными  $x_i$  называют размеры конструкций, полученные после их изготовления, или размеры отдельных элементов здания, полученные в результате выноса проекта в натуру (при условии исключения погрешностей измерений).

О точности монтажа строительных конструкций можно судить по степени приближения действительных размеров и положений к основным проектным. Действительные размеры могут отклоняться от проектных в сторону увеличения (положительное отклонение) и в сторону уменьшения (отрицательное отклонение). Наибольшее отклонение размера от проектного значения  $\delta_{\max}$  называют верхним предельным отклонением, а наименьшее отклонение  $\delta_{\min}$  — нижним предельным отклонением, т. е.

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\max} &= x_i - x_0, \\ \delta_{\min} &= x_0 - x_i. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Эти предельные отклонения от проектных размеров ограничиваются определенными допускаемыми отклонениями, обозначаемыми символами  $\pm \delta_i$ . В свою очередь, каждый размер будет иметь предельные значения: одно наибольшее  $x_{\max}$ , а другое — наименьшее  $x_{\min}$ . Разность между предельными размерами или положениями является допуском размера или положения  $\Delta$ :

$$\Delta = x_{\max} - x_{\min}. \quad (2)$$

Зона между наибольшим и наименьшим предельными отклонениями размера называется полем допуска. Графическое изображение допускаемых отклонений и допусков на строительно-монтажные и геодезические погрешности представлено на рис. 1.

Все размеры и допуски на них разделяются на конструкционные и производственные. Конструкционными называют допуски, которые удовлетворяют оптимальным эксплуатационным требованиям, предъявляемым к зданиям и сооружениям. Они должны обеспечить необходимое качество конструкций и удовлетворять требованиям взаимозаменяемости, т. е. обеспечивать индустриальные методы монтажа строительных элементов без дополнительной подгонки и обработки.

Производственными называют допуски, соблюдаемые при выполнении отдельных производственных процессов (изготовлении

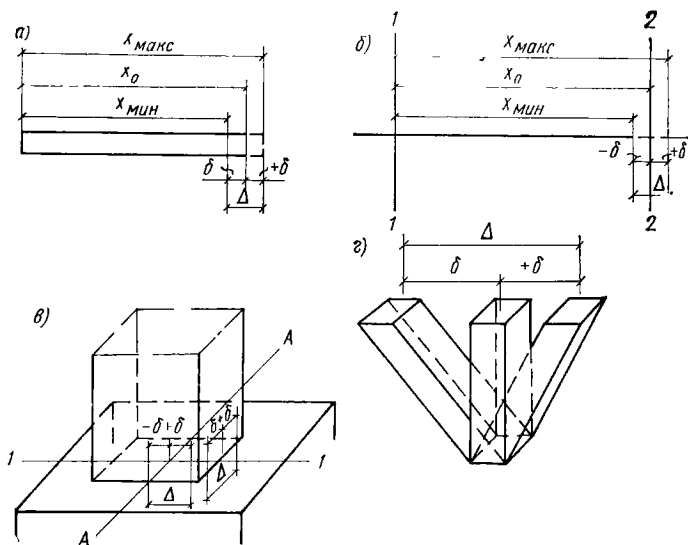


Рис. 1. Графическое изображение допускаемых отклонений и допусков на строительно-монтажные и геодезические погрешности

*a* — проектные размеры сборных строительных конструкций; *б* — схема детального геодезического построения разбивочных осей; *в* — смещение сборной конструкции с разбивочной оси; *г* — отклонение оси строительной конструкции от вертикали

строительных элементов, геодезических разбивочных работах, монтаже конструкций). Их должны назначать исходя из рациональности производства, они должны отвечать установленным проектом требованиям к качеству конструкции и взаимозаменяемости ее элементов. Разделяют допуски также на элементарные и суммарные. Все производственные допуски будут элементарными, а конструкционные могут быть как элементарными, так и суммарными. Последние являются результатом накопления нескольких элементарных допусков. Эти допуски определяют на основе расчета точности конструкции. В зависимости от исходных данных задача может быть: **прямой**, когда по величине производственных допусков находят суммарный конструкционный допуск (проверочный расчет);

**обратной**, когда по суммарному конструкционному допуску получают производственные допуски (проектный расчет).

Установленная проектом точность определяется допуском, а достигнутая точность оценивается погрешностью. Допускаемые погрешности получают исходя из предельных размеров конструкций и предельных положений элементов конструкций в узлах сопряжений. Положение детали в конструкции зависит от зазоров между сопрягаемыми элементами, размеров площадки опирания на расположенные ниже элементы, смещения плоскостью сопрягаемых деталей и от отклонения их от вертикали (рис. 2).

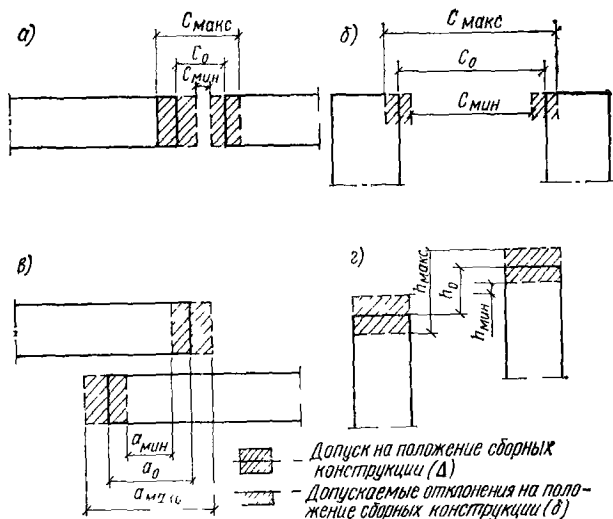


Рис. 2 Зазоры (а, б, г) на стыках и площадки опирания (а) сборных конструкций

Точность и допуски, с одной стороны, должны рассматриваться как оценка качественных признаков, характеризующих конструкцию или строительно-монтажный процесс, а с другой стороны — как оценка взаимозаменяемости однотипных строительных элементов. Взаимозаменяемость является комплексной задачей, которая включает в себя вопросы проектирования, изготовления и монтажа элементов сборных зданий и сооружений. Ее разделяют на габаритную (по геометрии) и структурную (по физико-механическим свойствам). В строительстве взаимозаменяемость элементов конструкций оценивают после их изготовления и установки в проектное положение. Сделать это можно, когда на все геометрические и физико-механические параметры строительных элементов определены допуски, значения которых должны быть согласованы так, чтобы при монтаже конструкций не нужно было ничего подбирать и подгонять. При выполнении вышеуказанных условий оценка взаимозаменяемости строительных деталей и узлов при монтаже сборных зданий и сооружений сводится к проверке установленных допусков.

В настоящее время допуски на изготовление деталей, разбивочные и монтажные работы регламентируются соответствующими Строительными нормами и правилами (СНиП). При назначении допусков на отдельные технологические операции необходимо учитывать их стоимость, для чего будет использоваться сооружение, производственные отклонения действительных размеров конструкций или положений от проектных.

Исследованиями, проведенными в нашей стране и за рубежом, установлено, что общее соотношение между допусками на проектные размеры сборных конструкций и стоимостью их изготовления аппроксимируется гиперболической кривой. Большие допуски на раз-

мер конструкции легче выдержать при производстве работ и при этом будет выше производительность труда и ниже стоимость этой строительной конструкции. Необоснованное назначение излишне жестких допусков ведет к повышению трудоемкости и стоимости строительства. Поэтому нет необходимости в установлении повышенной точности в размерах или положениях элементов, если эта точность не вызывается назначением конструкции и условиями эксплуатации сооружения.

Система допусков в строительстве представляет собой стандартизацию точности технологических процессов при возведении зданий и сооружений. Она построена по принципу группирования предельных погрешностей  $\delta=3m$  (все главы СНиП) или удвоенного значения предельных погрешностей  $\Delta=6m$  (государственные стандарты системы обеспечения геометрической точности в строительстве) отдельных строительно-монтажных и геодезических работ в классы точности.

При проектировании зданий и сооружений должны закладываться классы точности в зависимости от назначения сооружений и способа выполнения строительно-монтажных и геодезических работ.

При разработке единой системы допусков в строительстве за основу была взята система, принятая в машиностроении.

Допуск для каждого класса точности определяется по формуле

$$\Delta = Ki, \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент точности или число единиц допуска;  $i$  — единица допуска, характеризующая зависимость допуска от нормируемого размера, мм.

Границы интервалов номинальных размеров  $L$ , по которым вычисляют единицы допусков и численные значения допусков, приняты на основе рядов предпочтительных чисел  $R5$  и  $R10$ .

Формулы для вычисления единицы допуска и значения допусков на изготовление элементов, на разбивочные работы и установку конструкций приведены в таблицах ГОСТ 21779-76.

В системе допусков на изготовление и монтаж строительных конструкций, на разбивочные работы принят ряд классов точности по Международной системе допусков ИСО с коэффициентом геометрической прогрессии  $K = \sqrt[5]{10} \approx 1,6$ .

По ГОСТ 21779-76, допуски на линейные размеры и перпендикулярность смежных поверхностей элементов разбиты на 9 классов точности. При этом для допусков на линейные размеры элементов для 1-го класса точности принято  $K=0,1$  (по ИСО  $K=100$ ), а для допусков на перпендикулярность смежных поверхностей элементов для 1-го класса принято  $K=0,25$ .

Допуски на непрямолинейность и неплоскостность элементов и неравенство диагоналей приведены с 1-го по 6-й классы точности, начиная с  $K=0,4$  для 1-го класса.

Точность разбивочных работ и установки элементов в проектное положение регламентируются 6-ю классами точности, начиная со значения  $K=0,25$  для 1-го класса.

Предельные погрешности или допускаемые отклонения на геодезические разбивочные работы, по ГОСТ 21779-76, приведены в табл. 1—3 и на рис. 3.

Точность положения сборных конструкций обусловлена погрешностями изготовления строительных элементов, геодезических и



# 1. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ РАЗБИВКИ ОСЕЙ В ПЛАНЕ $\delta_{гр}$ , мм

| Номиналь-<br>ные раз-<br>меры $L$<br>между<br>осями, м | Класс точности |     |      |     |     |     |
|--------------------------------------------------------|----------------|-----|------|-----|-----|-----|
|                                                        | 1-й            | 2-й | 3-й  | 4-й | 5-й | 6-й |
| До 16                                                  | 1              | 2   | 3    | 5   | 8   | 13  |
| 16—25                                                  | 2              | 3   | 5    | 8   | 13  | 20  |
| 25—40                                                  | 3              | 5   | 8    | 13  | 20  | 32  |
| 40—63                                                  | 5              | 8   | 13   | 20  | 32  | 50  |
| 63—100                                                 | 8              | 13  | 20   | 32  | 50  | 80  |
| 100—160                                                | 13             | 20  | 32   | 50  | 80  | 130 |
| Значение<br>$K$                                        | 0,25           | 0,4 | 0,63 | 1   | 1,6 | 2,5 |

# 2. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ОСЕЙ ПО ВЕРТИКАЛИ $\delta_{гп}$ , мм

| Номиналь-<br>ные раз-<br>меры $L$<br>между<br>горизонта-<br>ми, м | Класс точности |     |      |     |     |     |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|-----|------|-----|-----|-----|
|                                                                   | 1-й            | 2-й | 3-й  | 4-й | 5-й | 6-й |
| До 16                                                             | 0,5            | 1   | 2    | 3   | 5   | 8   |
| 16—25                                                             | 1              | 2   | 3    | 5   | 8   | 13  |
| 25—40                                                             | 2              | 3   | 5    | 8   | 13  | 20  |
| 40—63                                                             | 3              | 5   | 8    | 13  | 20  | 32  |
| 63—100                                                            | 5              | 8   | 13   | 20  | 32  | 50  |
| 100—160                                                           | 8              | 13  | 20   | 32  | 50  | —   |
| Значение<br>$K$                                                   | 0,25           | 0,4 | 0,63 | 1   | 1,6 | 2,5 |

# 3. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ВЫСОТНЫХ ОТМЕТОК $\delta_{гв}$ , мм

| Номиналь-<br>ные раз-<br>меры $L$<br>между<br>осями, м | Класс точности |     |      |     |     |     |
|--------------------------------------------------------|----------------|-----|------|-----|-----|-----|
|                                                        | 1-й            | 2-й | 3-й  | 4-й | 5-й | 6-й |
| До 16                                                  | 0,5            | 1   | 1,5  | 2   | 3   | 5   |
| 16—25                                                  | 1              | 1,5 | 2    | 3   | 5   | 8   |
| 25—40                                                  | 1,5            | 2   | 3    | 5   | 8   | 13  |
| 40—63                                                  | 2              | 3   | 5    | 3   | 13  | 20  |
| 63—100                                                 | 3              | 5   | 8    | 13  | 20  | 32  |
| 100—160                                                | 5              | 8   | 13   | 20  | 32  | 50  |
| Значение<br>$K$                                        | 0,25           | 0,4 | 0,63 | 1   | 1,6 | 2,5 |

монтажных работ. Рассмотрим более подробно погрешности геодезических работ, которые осуществляют как при разбивке осей и выносе отметок, так при контроле строительно-монтажных работ.

Геодезические работы, выполняемые при возведении зданий и сооружений, заключаются в построении в натуре проектных углов, отрезков линий, передаче отметок на монтажные горизонты, проверке вертикальности установленных элементов, передаче разбивочных осей на вышележащие горизонты. Влияние погрешностей для каждого вида работ достаточно подробно исследовано [11, 23] и в основном заключается в следующем.

На точность построения проектного угла в натуре оказывают влияние следующие погрешности: инструментальная  $m_{\text{и}}$ , центрирования визирного знака  $m_{\text{цз}}$ , центрирования теодолита  $m_{\text{цт}}$  и фиксации заданного направления на плоскости осевого знака  $m_{\text{фн}}$ , т. е.

$$m_{\alpha} = \sqrt{m_{\text{и}}^2 + m_{\text{цз}}^2 + m_{\text{цт}}^2 + m_{\text{фн}}^2}. \quad (4)$$

В случае построения угла  $n$  приемами формула (4) принимает вид

$$m_{\alpha} = \sqrt{m_{\text{и}}^2/n + m_{\text{цз}}^2 + m_{\text{цт}}^2 + m_{\text{фн}}^2}. \quad (5)$$

В табл. 4 приведены средние квадратические погрешности  $m_{\alpha}''$  построения угла одним приемом при использовании теодолитов с оптическими центрами и при  $m_{\text{фн}} = \pm 0,5$  мм.

#### 4. СРЕДНИЕ КВАДРАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ, С, ПОСТРОЕНИЯ УГЛА ОДНИМ ПРИЕМОМ

| Тип<br>теодолита | Расстояние до проектной точки, м |            |          |          |          |          |
|------------------|----------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|
|                  | 10                               | 20         | 30       | 40       | 50       | 100      |
| T-30             | $\pm 32,8$                       | $\pm 30,8$ | $\pm 30$ | $\pm 30$ | $\pm 30$ | $\pm 30$ |
| T-20             | 24                               | 21         | 20       | 20       | 20       | 20       |
| T-15             | 19,5                             | 16,3       | 15,6     | 15,3     | 15,1     | 15,1     |
| T-10             | 16                               | 12         | 11       | 10       | 10       | 10       |
| T-5              | 13                               | 8          | 7        | 6        | 6        | 6        |
| T-2              | 13                               | 7          | 5        | 4        | 3        | 3        |

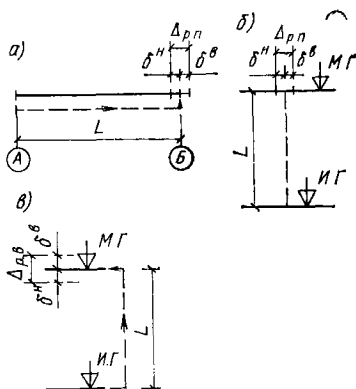


Рис. 3. Допуски на разбивочные работы

$a$  — допуск на разбивку осей в плане;  $b$  — допуск на передачу осей по вертикали;  $c$  — допуск на передачу высотных отметок;  $и\Gamma$  — исходный горизонт;  $м\Gamma$  — монтажный горизонт

Точность построения разбивочной оси  $m_{po}$  сооружений в натуре металлической рулеткой обусловлена влиянием следующих погрешностей: компарирования  $m_{кр}$ , нестворности  $m_{ос}$ , натяжения  $m_{пр}$ , наклона  $m_{нр}$ , разности температур  $m_t$ , ветра  $m_{вн}$ , отсчета  $m_{ор}$ , фиксации концов рулетки  $m_{фр}$ , т. е.

$$m_{po} = \sqrt{[(m_{кр})^2 + (m_{вн})^2 + (m_{ос})^2 + (m_{пр})^2] n^2 + [(m_{нр})^2 + m_t^2 + m_{ор}^2 + m_{фр}^2] n}, \quad (6)$$

где  $n$  — число отложений рулетки в длине разбивочной оси.

Значения средних квадратических погрешностей построения линий в натуре  $m_{po}$  (при  $m_{фр} = \pm 1$  мм) приведены в табл. 5.

##### 5. СРЕДНИЕ КВАДРАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

| Расстояние, м | Погрешности, мм |              | Расстояние, м | Погрешности, мм |              |
|---------------|-----------------|--------------|---------------|-----------------|--------------|
|               | на весу         | на плоскости |               | на весу         | на плоскости |
| 10            | $\pm 1,6$       | $\pm 1,4$    | 60            | $\pm 3,6$       | $\pm 2,8$    |
| 20            | $\pm 2,6$       | $\pm 1,9$    | 80            | $\pm 4$         | $\pm 3,1$    |
| 40            | $\pm 3,2$       | $\pm 2,4$    | 100           | $\pm 4,3$       | $\pm 3,3$    |

На точность построения (передачи) в натуре проектных отметок оказывают влияние следующие погрешности: несоблюдения главного условия нивелира (в случае неравенства плеч)  $m_{гу}$ , установки уровня в нуль-пункт  $m_{уу}$ , отсчитывания по рейке  $m_{ор}$ , в делениях рейки  $m_{др}$ , наклона рейки  $m_{нр}$ , фиксации риски  $m_{фр}$ .

Тогда средняя квадратическая погрешность передачи проектной отметки  $m_{по}$  в натуре при одной постановке нивелира определится по формуле

$$m_{по} = \sqrt{m_{гу}^2 + m_{уу}^2 + m_{ор}^2 + m_{др}^2 + m_{нр}^2 + m_{фр}^2}. \quad (7)$$

Значения  $m_{по}$  при условии  $m_{фр} = \pm 0,5$  мм приведены в табл. 6.

##### 6. СРЕДНИЕ КВАДРАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ОТМЕТОК, ММ

| Неравенство плеч $\Delta S$ , м | Расстояние от нивелира до рейки, м |           |           |           |           |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                 | 10                                 | 20        | 30        | 40        | 50        |
| 10                              | $\pm 0,8$                          | $\pm 0,9$ | $\pm 1$   | $\pm 1,1$ | $\pm 1,1$ |
| 20                              | $\pm 1,2$                          | $\pm 1,2$ | $\pm 1,2$ | $\pm 1,3$ | $\pm 1,3$ |
| 30                              | $\pm 1,6$                          | $\pm 1,6$ | $\pm 1,7$ | $\pm 1,7$ | $\pm 1,8$ |
| 40                              | $\pm 2$                            | $\pm 2,1$ | $\pm 2,1$ | $\pm 2,2$ | $\pm 2,2$ |

Геодезический контроль отклонений элементов от вертикали и передача разбивочных осей на монтажные горизонты многоэтажных зданий и высотных сооружений выполняют с помощью теодолитов и приборов вертикального проектирования (ОЦП, ПОВП, PZL и др.).

Теодолитами можно контролировать отклонения конструкций и передачу разбивочных осей методом наклонного визирования или бокового нивелирования. Рассмотрим проектирование разбивочных осей или определение отклонений строительных элементов от вертикали методом наклонного визирования, где на их точность оказывают влияние следующие погрешности: за наклон оси вращения трубы  $m_i$ ; коллимационная  $m_c$ ; за неvertикальность оси вращения инструмента  $m_v$ ; визирования  $m_b$ ; центрирования  $m_d$ ; редукции  $m_p$ ; фиксации  $m_\phi$ . Тогда средняя квадратическая погрешность передачи разбивочной оси или определения отклонений элементов  $m_{нп}$  определится по формуле

$$m_{нп} = \sqrt{m_i^2 + m_c^2 + m_v^2 + m_b^2 + m_d^2 + m_p^2 + m_\phi^2}. \quad (8)$$

В табл. 7 приведены погрешности наклонного визирования и вертикального проектирования в зависимости от высоты конструкций.

#### 7. СРЕДНИЕ КВАДРАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ОСЕЙ, ММ

| Способ передачи                                      | Высота конструкций, м |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                      | 10                    | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  | 100 |
| Теодолитом                                           |                       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Т-30:                                                |                       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| при одном круге                                      | 1                     | 1,8 | 2,7 | 3,6 | 4,7 | 5,4 | 6,3 | 7,2 | 8,1 | 9,3 |
| при двух кругах                                      | 0,6                   | 1   | 1,4 | 1,8 | 2,2 | 2,7 | 3,1 | 3,6 | 4   | 4,4 |
| с накладным уровнем (чувствительностью $\tau=20''$ ) | 0,5                   | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1   | 1,1 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| Зенит-прибором                                       | 0,5                   | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 |

#### 2. Основные положения по назначению допусков в строительстве

Индустриальные методы возведения зданий и сооружений из сборных элементов качественно изменили организационную структуру и технический уровень современного строительства.

В настоящее время строительная площадка превращается в строительно-монтажную, где здания и сооружения собирают с заданной точностью из отдельных взаимозаменяемых строительных элементов, изготовленных на специальных предприятиях. На точность возведения здания и сооружения из сборных элементов существенное влияние оказывают различные факторы погрешностей.

Исследованиями установлено, что распределение погрешностей в основном следует нормальному закону и что элементарные по-

погрешности в положении строительных элементов и узлов суммируются и характеризуются предельными отклонениями размеров швов, размерами площадок или уступов между ними, сопрягаемых в единую плоскость. Условия же габаритной или геометрической взаимозаменяемости обеспечиваются, когда положение элементов не выходит за пределы интервалов соответствующих суммарных допусков. Вследствие этого необходимо рассмотреть задачу определения вероятности попадания в заданный интервал нормальной случайной величины. Если случайная величина  $x$  следует закону нормального распределения и может принимать любые значения (в интервале  $l$ ) в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ , то вероятность ее распределения характеризуется выражением

$$P(-\infty < x < +\infty) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (9)$$

где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение случайной величины, стандарт;  $a$  — математическое ожидание случайной величины;  $e$  — основание натуральных логарифмов.

Вероятность  $P(-\infty < x < +\infty) = 1$ .

В связи с тем что погрешности в положении строительных элементов влияют на прочность, несущую способность, эксплуатационную надежность конструкций сборных зданий и сооружений, возникает необходимость сужения интервалов погрешностей возведения сооружений, а это приведет к уменьшению вероятности  $P$ . Следовательно, интервал  $l$  тесно связан с расчетной вероятностью.

В частном случае вероятность получения отклонений размеров, лежащих в пределах  $x_1$  и  $x_2$ , находят решением определенного интеграла

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} y dx = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (10)$$

Преобразуем формулу (10), введя новую переменную  $t = (x-a)/\sigma$ , которую называют нормированием, и, учитывая, что  $x = t\sigma + a$  и  $dx = \sigma dt$ , получим:

$$P(x_1 < x < x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_2} e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_1} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (11)$$

где  $t_1 = (x_1 - a)/\sigma$ ;  $t_2 = (x_2 - a)/\sigma$

Нормированное распределение ведет к перенесению начала координат в центр группирования и к выражению абсцисс в долях  $\sigma$ .

В пособиях по математической статистике приведены таблицы значений функций Лапласа [2]

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (12)$$

Пользуясь функцией Лапласа, окончательно получим

$$P(x_1 < x < x_2) = \Phi\left(\frac{x_1 - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - a}{\sigma}\right) \quad (13)$$

или

$$P(x_1 < x < x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1).$$

Учитывая симметричность кривой нормального распределения, вероятность появления нормированного значения случайной погрешности в интервале от  $-t_1$  до  $+t_2$  будет

$$P(-t_1 < t < t_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = 2\Phi(t). \quad (14)$$

Как известно, эта вероятность называется доверительной и относится к интервалу

$$l = 2t. \quad (15)$$

Таким образом, определение интервалов погрешностей возведения сборных зданий и сооружений тесно связано с выбором доверительной вероятности, которая принимается с учетом условий взаимозаменяемости.

Суммарные погрешности в положении строительных элементов или узлов, характеризующиеся предельными отклонениями  $\delta$ , являются результатом накопления элементарных погрешностей при возведении сборных зданий и сооружений. Учитывая это, формулу (14) можно представить так:

$$P(-t\sigma < \delta < +t\sigma) = 2\Phi(t). \quad (16)$$

Длина доверительного интервала будет

$$l = 2t\sigma. \quad (17)$$

При решении практических задач, связанных с нормальным распределением, приходится рассматривать вероятность попадания  $x$  симметрично в интервал относительно математического ожидания  $a$  (среднего значения). Тогда формулу (16) можно представить в виде

$$P\{x - \delta < a < x + \delta\} = 2\Phi(t) \quad (18)$$

или

$$P(x - t\sigma < a < x + t\sigma) = 2\Phi(t). \quad (19)$$

Тогда предельные размеры или положения строительного элемента можно выразить следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} x_{\max} &= a + t\sigma; \\ x_{\min} &= a - t\sigma, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

а допуск размеров или положения

$$\delta = x_{\max} - x_{\min} = 2t\sigma. \quad (21)$$

Принимая различные значения переменной  $t$ , можно установить допустимые погрешности с определенной доверительной вероятностью. Например, доверительная вероятность принятия интервалов:

$$\left. \begin{aligned} P(x - \sigma < a < x + \sigma) &= 0,6827 \text{ при } t = 1; \\ P(x - 2\sigma < a < x + 2\sigma) &= 0,9545 \text{ » } t = 2; \\ P(x - 3\sigma < a < x + 3\sigma) &= 0,9973 \text{ » } t = 3; \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Отсюда видно, что если случайная величина имеет нормальное распределение, то вероятность ее отклонения от своего математического ожидания (среднего значения) не более чем на  $\sigma$  составляет 68,27, не более чем на  $2\sigma$  — 95,45 и не менее чем на  $3\sigma$  — 99,73%. Для обеспечения 100%-ной гарантии монтажа строительных элементов необходимо было бы назначать излишне большие размеры площадок опирания, зазоров или устанавливать чрезмерно жесткие по величине производственные допуски. Поскольку величина 0,9973 близка к единице, можно считать, что погрешность в размере или положении строительного элемента отклоняется от своего математического ожидания (среднего значения) не более чем на  $3\sigma$ . Это вероятность того, что абсолютная величина отклонения очень мала, а именно 0,0027, т. е. такое отклонение возможно только в одном случае из трехсот. Такие события, исходя из принципа маловероятных событий, можно считать практически невозможными. Это правило, справедливое только для нормального распределения, называется *правилом трех сигм*.

При установлении границ допускаемых отклонений и допусков геометрических и физико-механических характеристик качества материалов, деталей и конструкций используют правило трех сигм, т. е. принимают при этом доверительную вероятность 0,9973 [1]. Эта величина при назначении предельных погрешностей возведения сборных зданий и сооружений принята Постоянной комиссией по строительству Совета Экономической Взаимопомощи (секция проектных решений, типового проектирования и норм).

Таким образом, расчетная вероятность  $P=0,9973$  лежит в основе точности сопряжения строительных элементов в процессе возведения сборных зданий и сооружений и надежной работы их в период эксплуатации. Поэтому предельная погрешность возведения сборных зданий и сооружений

$$\delta = \pm 3\sigma. \quad (23)$$

Вследствие этого положение строительного элемента в процессе его изготовления и монтажа может отклониться от своего проектного или номинального значения в интервале  $6\sigma$ . При этом границы этого интервала будут определять предельные размеры или положения строительного элемента, значения которых будут

$$\left. \begin{aligned} x_{\max} &= a + 3\sigma; \\ x_{\min} &= a - 3\sigma. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Тогда допуск размеров или положения (рис. 4)

$$\Delta = x_{\max} - x_{\min} = 6\sigma. \quad (25)$$

Таким образом, стандарт  $\sigma$  является не только мерой распределения погрешностей, но и мерой точности.

Сравнивая распределение фактических отклонений с величиной допуска, установленной для данной операции строительно-монтажного процесса, можно оценивать ее точность. Для оценки точности генеральных параметров  $\sigma$  и  $a$  по выборочным характеристикам правило «трех сигм», как отмечается в [23], строго говоря, использовать нельзя. Из курса теории вероятностей известно, что предельная погрешность  $\delta = \pm 3\sigma$  относится к генеральной совокупности результатов измерений. В практике строительства мы не имеем дела с генеральной совокупностью, так как число измерений всегда ограничено.

При известной величине  $\sigma$ , что в действительности нереально, правило «трех сигм» [2]

$$|\sigma - m| < 3 \frac{\sigma}{\sqrt{(2N-1)}} \quad (26)$$

имеет надежность  $P = \Phi(3) = 0,9973$ . Но мы оперируем вместо стандарта  $\sigma$  средней квадратической погрешностью  $m$ , являющейся точечной оценкой  $\sigma$ .

При такой замене надежность правила «трех сигм» будет меньше 0,9973. Ее значение будет снижаться с уменьшением числа измерений  $N$ . Поэтому не случайно при оценке точности измерений в геодезии [11, 23] часто принимают предельную погрешность  $\delta = \pm 2m$ . Например, для нормального распределения в теории информации принимают  $\delta = 2,07m$ . Следует отметить, что в нормативных документах по строительству предельные погрешности называют допускаемыми отклонениями.

В практике строительства также для оценки точности технологических процессов строительно-монтажного производства можно предельную погрешность принимать равной  $\delta = \pm 2m$ .

### 3. Статистические оценки для анализа точности строительных и монтажных работ

При возведении зданий и сооружений выполняют различные измерения, по которым контролируют качество строительства. Основными характеристиками точности являются среднее арифметическое значение  $\bar{x}$  и средняя квадратическая погрешность  $m$ . Параметры распределения  $\bar{x}$  и  $m$  определяют по известным выражениям:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i x_i}{N}; \quad (27)$$

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n n_i (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}. \quad (28)$$

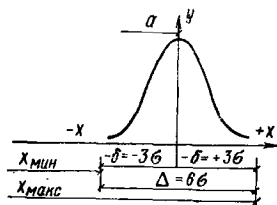


Рис. 4. Зависимость допуска от стандарта  $\sigma$



Для исследования совокупности измеренных величин объемом  $N$  разбивают результаты наблюдений на интервал шириной  $h$ , которую определяют по формуле Стерджеса

$$h = R / (1 + 3,2 \lg N), \quad (29)$$

где  $R$  — размах варьирования;  $N$  — число наблюдений.

Иногда для учета неравномерности распределения величины  $x_i$  внутри интервалов в формулу (28) вводят поправку Шеппарда, равную  $0,083h$ . Тогда формула для определения  $m$  примет вид

$$m = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{n_i (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} - 0,083h^2. \quad (30)$$

Для сравнительной оценки полученных из статистической обработки результатов измерений с нормативными величинами находят доверительные интервалы математического ожидания  $a$  и среднего квадратического отклонения или стандарта  $\sigma$ .

Доверительные интервалы для математического ожидания  $a$  и стандарта  $\sigma$ , относящиеся к генеральной совокупности (к большому числу) измерений, можно определять непосредственно после нахождения их выборочных характеристик  $\bar{x}$  и  $m$ . Для оценки доверительных интервалов необходимо установить доверительную вероятность (надежность)  $P$ .

Доверительные интервалы математического ожидания  $a$  и стандарта  $\sigma$  можно определить по выражениям:

$$\bar{x} - t \frac{m}{\sqrt{N}} < a < \bar{x} + t \frac{m}{\sqrt{N}}; \quad (31)$$

$$\bar{x} - t \frac{m}{\sqrt{2N-1}} < \sigma < \bar{x} + t \frac{m}{\sqrt{2N-1}}, \quad (32)$$

где  $t$  — нормируемый множитель, зависящий от  $P$ .

Оценки математического ожидания  $a$  и стандарта  $\sigma$ , приведенные в формулах (31) и (32), являются предельными, справедливыми для больших  $N$ .

Для определения оценок  $a$  по ограниченному объему выборок используют распределение Стьюдента и в формулу (31) вводят новый коэффициент  $t_g$ . Тогда формула (31) примет вид

$$\bar{x} - t_g \frac{m}{\sqrt{n}} < a < \bar{x} + t_g \frac{m}{\sqrt{n}}. \quad (33)$$

Для определения доверительного интервала стандарта при ограниченных объемах выборок применяют распределение  $\chi^2$  с  $N-1$  степенями свободы. Доверительные интервалы для  $\sigma^2$  и  $\sigma$  с надежностью  $P$  устанавливают по выражениям:

$$\gamma_1^2 m < \sigma^2 < \gamma_2^2 m; \quad (34)$$

$$\gamma_1 m < \sigma < \gamma_2 m, \quad (35)$$