

Оценка технологичности сборочных элементов при монтаже стальной конструкции

М.М. Тонаканян

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет, Санкт-Петербургу*

Аннотация: Описаны методы расчета технологических и функциональных допусков при изготовлении и монтаже стальных конструкций. Был проведен экспериментальный монтаж конструкции для возможности уточнения допусков, и были выдвинуты основы методологии оценки качественной и количественной технологичности сборочных элементов для упрощения процессов изготовления и монтажа конструкции.

Ключевые слова: методы расчета допусков, монтаж конструкции, изготовление конструкций, технологичность, комплексный показатель технологичности.

Развитие строительства как отрасли всегда являлось показателем развития страны. В работах Л.С. Авиромы [1], Б.И. Беляева [2] подтверждается идея того, что качество строительства – это основной параметр, при соблюдении которого можно судить о темпах развития, и о том, насколько они существенны. Также, при соблюдении должного уровня качества, инженеры смогут решать задачи непосредственно на стадии проектирования. Чем выше качество, тем больше вероятность возможности решения поставленных задач при возведении строительной конструкции. Одной из основных составляющих качества является точность. Этот вопрос рассматривают также в своих трудах и зарубежные специалисты [3,4].

Для достижения более качественного строительства необходимо решать следующие задачи [5]:

1. Необходимость обоснованных норм точности на изготовление строительных конструкций.
2. Подготовительные и разбивочные работы.
3. Строительно-монтажные работы.

Нередко подобные задачи приходится решать в условиях строительной площадки. Это происходит в силу не всегда благоприятных экономических обстоятельств при возведении строительной конструкции. В данном случае необходимо решать вопросы собираемости конструкций при следующих технологических процессах:

1. Изготовление сборочных элементов конструкции в условиях строительной площадки. Следует выполнить максимально технологичную конструкцию, отвечающую всем требованиям и действующим нормативным документам;
2. Монтаж конструкции следует выполнить после проведения необходимых расчетов технологических и функциональных допусков.

Под геометрической точностью понимают степень приближения действительных геометрических параметров, определяющих размеры, конфигурацию и положение конструкций зданий и сооружений и их элементов, к номинальным (проектным) параметрам [6].

Геометрическая точность изготовления, а затем и монтажа сборочных элементов, является самым важным параметром, который может оказывать влияние на собираемость конструкции.

Погрешности при строительно-монтажных работах оказывают огромное влияние на точность и собираемость конструкции.

Следовательно, назначение и расчет обоснованных допусков на геометрические параметры строительных объектов становится неотъемлемой частью строительства.

Известно, что данные, полученные путем проведения расчетов технологических и функциональных допусков, будут всегда отличаться от данных, полученных экспериментальным путем по причине присутствия погрешности в технологической размерной цепи, и влияние факторов не

геометрического характера бесспорно. Соответственно, следует подробнее изучить эти показатели.

Проведя анализ факторов негеометрического характера, можно сделать вывод о том, что все они тесно связаны друг с другом. Стоит отметить, что основным фактором, на который можно опереться и оценить собираемость всей конструкции является именно технологичность.

Технологичность конструкции - совокупность свойств конструкции сборочных элементов, которые обеспечивают её изготовление, монтаж по наиболее эффективной технологии по сравнению с однотипными конструкциями того же назначения при одинаковых условиях их изготовления и монтажа и при одних и тех же показателях качества.

Оценка технологичности может быть двух видов:

1. **Качественная оценка.** С помощью данного параметра технологичность характеризуется обобщенно, основой служит опыт исполнителя. Она строится на анализе. Качественная оценка технологичности служит обоснованием для количественной технологичности при проектировании конструкций.
2. **Количественная оценка.** Производится с помощью системы, содержащей в себе ниже перечисленные показатели:
 1. базовые (исходные) показатели технологичности;
 2. показатели технологичности, достигнутые при разработке сборочных элементов;
 3. показатели уровня технологичности конструкции разрабатываемого сборочного элемента [7,8].

Сборочные элементы металлического каркаса были изготовлены, а затем смонтированы на строительной площадке. Были определены основные конструктивные элементы каркаса со своими параметрами.

Исходные данные (Рис.1):

$$h_{CB1}=7,3\text{м}; h_{CB2}=5,5\text{м}$$

Расстояние между двумя соседними элементами, соединенными связью:

$$A=6\text{м}$$

$$L=\sqrt{7,3^2 + 6^2}=9,44\text{м}$$

$$L=\sqrt{5,5^2 + 6^2}=8,1\text{м}$$

$\Delta A=6\text{мм}$ (допуск разбивки осей в плане)

$\Delta_{KH} = 12\text{мм}$ – допуск симметричности установки низа колонны

$\Delta_{KB} = 30\text{мм}$ – допуск совмещения ориентиров установки верха колонн

при $h_1=7,3\text{ м}$; при $h_2=5,5\text{ м}$

Поперечная рама

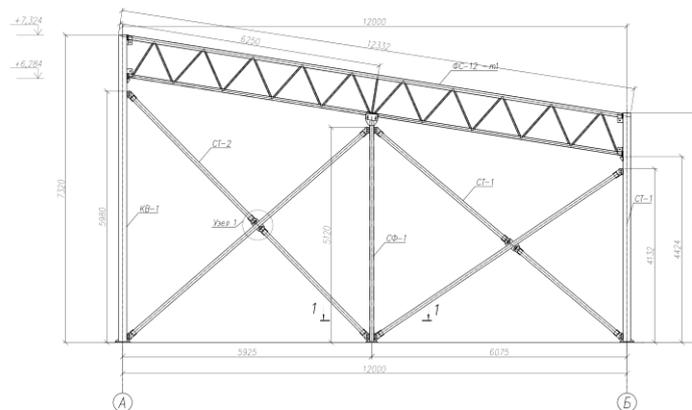


Рис. 1. Поперечная рама конструкции

Крепление соединительных элементов между колоннами и фермами – фланцевое.

Крепление ферм к колоннам – болтовое.

Точность изготовления фланцевых соединений:

$$\Delta_{\Sigma}=\sqrt{\Delta A^2 + 2 \cdot \Delta_{KH}^2 + 2 \cdot \Delta_{KB}^2} = \sqrt{6^2 + 2 \cdot 10^2 + 2 \cdot 24^2} = 37\text{мм}$$

$$A=12\text{м};$$

$\Delta A=6\text{мм}$ (согласно таблице 1 ГОСТ 21779-82)

$$\Delta M = 8 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\phi} = d_{\text{отв}} - d_{\delta} = 23 - 20 = 3 \text{ мм}$$

Собираемость = $\frac{3}{37-8} = 0,1 < 1$ следовательно, собираемость не обеспечена

Отклонение верха колонн при монтаже не должно превышать $\Delta_{\text{КВ}} = 20 \text{ мм}$

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta A^2 + 2 \cdot \Delta_{\text{КН}}^2 + \Delta M^2} = \sqrt{6^2 + 2 \cdot 20^2 + 8^2} = 30 \text{ мм}$$

Если функциональный допуск примем $\Delta_{\phi} = 20 \text{ мм}$, то собираемость:

$$C = \frac{\Delta_{\phi}}{\Delta_{\Sigma}} = 1,5 > 1, \text{ следовательно, собираемость обеспечена.}$$

Прогоны (Рис.2):

Шаг колонн 4,5м; 6м; 7,5м; 12м; (Рис.2)

Шаг прогонов 3м (Рис.2)

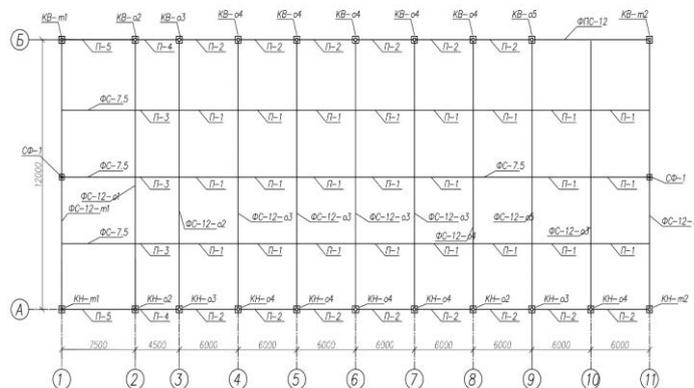


Рис. 2. Элементы по верхнему поясу конструкции

Так как дополнительные напряжения от натяга не велики, следовательно, не имеет смысла ужесточать требования к точности изготовления и монтажа.

Связевые блоки колонн продольных рядов (Рис. 3)

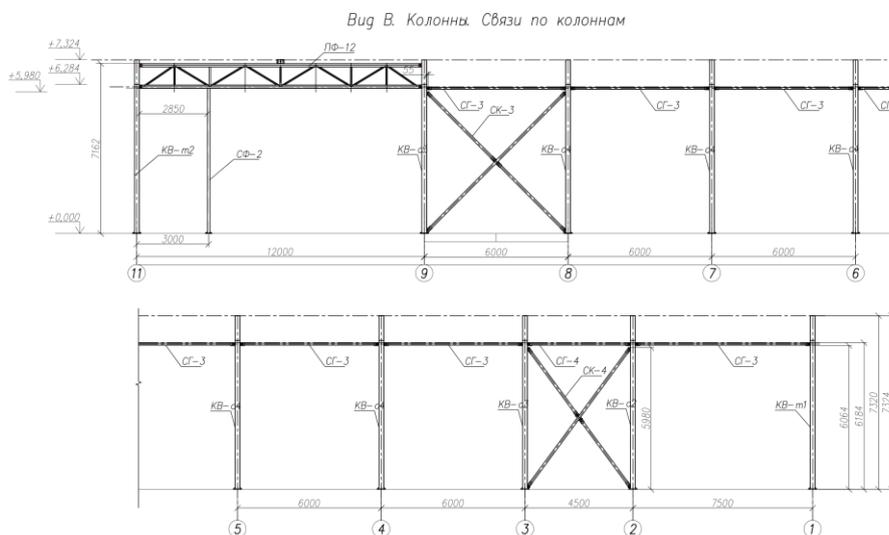


Рис. 3. Связи по колоннам

Метод «минимума-максимума»

Рассматриваем плоскую раму однопролетного одноэтажного здания

Уравнение размерной цепи в данном случае имеет вид:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\Gamma} + 2\Delta_{\text{И}}^{\text{К}} + \Delta_{\text{И}}^{\Phi} + 2\Delta_{\text{Н}}^{\text{К}} + 2\Delta_{\text{В}}^{\text{К}} + 2\Delta_{\text{М}}^{\Phi}$$

В данном уравнении слагаемые – это допуски на геодезические работы по разбивке строительных осей объекта, допуски на изготовление колонн, ферм, допуски на монтаж колонн и ферм соответственно [9,10].

Способ равных допусков.

Основная идея этого способа в том, что все допуски считаются численно равными между собой.

$$\Delta_i = \Delta_{\Gamma} = \Delta_{\text{И}}^{\text{К}} = \Delta_{\text{И}}^{\Phi} = \Delta_{\text{Н}}^{\text{К}} = \Delta_{\text{В}}^{\text{К}} = \Delta_{\text{М}}^{\Phi}$$

Суммарный допуск равен функциональному: $\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\Phi} = 96$ мм

Следовательно, основное уравнение имеет вид:

$$\Delta_{\Sigma} = 10\Delta_i;$$

$$\Delta_i = 96/10 = 9,6 \text{ мм}$$

Способ равной точности.

Если рассчитывать данным способом, то основная формула данного расчета имеет вид:

$$\Delta_{\Sigma} = K_{\text{ср}} (I_{\Gamma} + 2I_{\text{И}}^{\text{К}} + I_{\text{И}}^{\Phi} + 2I_{\text{Н}}^{\text{К}} + 2I_{\text{В}}^{\text{К}} + 2I_{\text{М}}^{\Phi})$$

$K_{\text{ср}}$ - коэффициент точности, который принимается одинаковым (число единиц допуска)

I – единицы допуска.

Значения на составляющие звенья размерной цепи представлены ниже:

$$I_{\Gamma} = 12 \text{ мм}$$

$$I_{\text{И}}^{\text{К}} = 5,23 \text{ мм}$$

$$I_{\text{И}}^{\Phi} = 25,61 \text{ мм}$$

$$I_{\text{Н}}^{\text{К}} = 9,65 \text{ мм}$$

$$I_{\text{В}}^{\text{К}} = 32,84 \text{ мм}$$

$$I_{\text{М}}^{\Phi} = 15,36 \text{ мм}$$

Выражение для определения коэффициента точности:

$$K_{\text{ср}} = \Delta_{\Sigma} / (I_{\Gamma} + 2I_{\text{И}}^{\text{К}} + I_{\text{И}}^{\Phi} + 2I_{\text{Н}}^{\text{К}} + 2I_{\text{В}}^{\text{К}} + 2I_{\text{М}}^{\Phi})$$

$$K_{\text{ср}} = 96 / (12 + 2 \cdot 5,23 + 25,61 + 2 \cdot 9,65 + 2 \cdot 32,84 + 2 \cdot 15,36) = 0,58$$

Следовательно, технологические допуски будут равны:

$$\Delta_{\Gamma} = 12 \cdot 0,58 = 6,96 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{И}}^{\text{К}} = 5,23 \cdot 0,58 = 3,03 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{И}}^{\Phi} = 25,61 \cdot 0,58 = 14,85 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{Н}}^{\text{К}} = 9,65 \cdot 0,58 = 5,6 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{В}}^{\text{К}} = 32,84 \cdot 0,58 = 19,05 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{М}}^{\Phi} = 15,36 \cdot 0,58 = 8,91 \text{ мм}$$

Теоретико-вероятностный метод

Способы расчета:

1. Способ попыток

2. Способ равных допусков
3. Способ равной точности

Способ попыток

Основное уравнение данного способа выглядит таким образом:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_1^2 + 2 \cdot \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + 2 \cdot \Delta_4^2 + 2 \cdot \Delta_5^2 + 2 \cdot \Delta_6^2}$$

$$\Delta_1 = \Delta_{\Gamma}; \Delta_2 = \Delta_{\text{И}}^{\text{К}}; \Delta_3 = \Delta_{\text{И}}^{\text{Ф}}; \Delta_4 = \Delta_{\text{Н}}^{\text{К}}; \Delta_5 = \Delta_{\text{В}}^{\text{К}}; \Delta_6 = \Delta_{\text{М}}^{\text{Ф}};$$

Считаем что суммарный допуск равен функциональному: $\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\Phi} = 96$ мм

Согласно СП 70.13330.2012, определяем технологические допуски:

$$\Delta_{\text{И}}^{\text{К}} = 6 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{И}}^{\text{Ф}} = 8 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{Н}}^{\text{К}} = 5 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{В}}^{\text{К}} = 10 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\text{М}}^{\text{Ф}} = 15 \text{ мм}$$

Согласно СП 70.13330.2012, средняя квадратическая погрешность разбивки осей определяется по формуле:

$m_{\Gamma}/L=1/3000$ – при пролете 12м, следовательно $m_{\Gamma}=4$ мм. Если учесть показатель ответственности здания $\gamma_n=0,95$, то допуск на разбивку осей будет равен: $\Delta_{\Gamma}=2 \cdot t \cdot m_{\Gamma}=4 \cdot 4=16$ мм.

$\Delta_{\Sigma}=33,04 < \Delta_{\Phi} = 96$, следовательно, собираемость обеспечена.

Способ равных допусков

Данный тип расчета предусматривает равенство всех технологических допусков.

$$\Delta_{\Sigma}=96 \text{ мм}; \Delta_i = \sqrt{\Delta_{\Sigma}^2 / 10} = 30,36 \text{ мм}$$

Способ равной точности

Чтобы определить технологические допуски сборочных элементов данным способом следует определить одинаковый класс точности для всех элементов и определить допуски по формуле:

$$\Delta_i = K \cdot I_i$$

Основное выражение имеет вид:

$$\Delta_{\Sigma}^2 = K_{\text{ср}}^2 \cdot (I_1^2 + 2 \cdot I_2^2 + I_3^2 + 2 \cdot I_4^2 + 2 \cdot I_5^2 + 2 \cdot I_6^2)$$

$$I_1 = I_{\Gamma}$$

$$I_2 = I_{\text{И}}^{\text{К}}$$

$$I_3 = I_{\text{И}}^{\Phi}$$

$$I_4 = I_{\text{Н}}^{\text{К}}$$

$$I_5 = I_{\text{В}}^{\text{К}}$$

$$I_6 = I_{\text{М}}^{\Phi}$$

$$96^2 = K_{\text{ср}}^2 \cdot (12^2 + 2 \cdot 5,23^2 + 25,63^2 + 2 \cdot 9,65^2 + 2 \cdot 32,84^2 + 2 \cdot 15,36^2)$$

$$K_{\text{ср}} = 0,63$$

Следовательно, значения технологических допусков будут такими:

$$I_{\Gamma} = 12 \cdot 0,63 = 7,56 \text{ мм}$$

$$I_{\text{И}}^{\text{К}} = 5,23 \cdot 0,63 = 3,29 \text{ мм}$$

$$I_{\text{И}}^{\Phi} = 25,61 \cdot 0,63 = 16,13 \text{ мм}$$

$$I_{\text{Н}}^{\text{К}} = 9,65 \cdot 0,63 = 6,56 \text{ мм}$$

$$I_{\text{В}}^{\text{К}} = 32,84 \cdot 0,63 = 20,69 \text{ мм}$$

$$I_{\text{М}}^{\Phi} = 15,36 \cdot 0,63 = 9,68 \text{ мм}$$

Вероятностно-статистический метод

Данный метод позволит решить прямую задачу в данных строительных процессах – определить собираемость здания и технологические допуски эмпирическим путем [10].

Практика показывает, что допуски на монтаж колонн относительно строительных осей является жестким и зачастую практически невыполнимыми. Также можно отметить, что погрешности разбивочных работ, монтаж колонн относительно строительных (разбивочных) осей и их отклонения от вертикали существенно влияют на взаимное положение верха колонн друг относительно друга.

После проведения ряда метрологических операций были вычислены 3 основных параметра для осуществления данного расчета:

$$\Delta_{И}^K=6,84 \text{ мм}$$

$$\Delta_{И}^{\Phi}=9,53 \text{ мм}$$

$$\Delta_{Г} =12,00 \text{ мм}$$

Суммарный допуск $\Delta_{\Sigma}=96\text{мм}$; он также равен и функциональному допуску.

Задаем значение допуска $\Delta_{Н}^K=10 \text{ мм}$

Основное выражение выглядит таким образом:

$$K_{\text{cp}}^2 = \frac{\left[(\Delta_{\Sigma})^2 - \left[(\Delta_{Г})^2 + 2(\Delta_{И}^K)^2 + 2(\Delta_{И}^{\Phi})^2 + 2(\Delta_{Н}^K)^2 \right] \right]}{\left[2(I_{В}^K)^2 + 2(I_{М}^K)^2 \right]}$$

Подставляем значения наших допусков:

$$K_{\text{cp}}^2=92,7/51,27=1,808; K_{\text{cp}}=1,34$$

Следовательно, получаем значения допусков:

$$\Delta_{В}^K=32,84 \cdot 1,34= 44,01 \text{ мм}$$

$$\Delta_{И}^K=6,84 \cdot 1,34= 9,17 \text{ мм}$$

$$\Delta_{И}^{\Phi}=9,53 \cdot 1,34=12,77 \text{ мм}$$

$$\Delta_{Н}^K=10 \cdot 1,34=13,4 \text{ мм}$$

$$\Delta_{М}^{\Phi}=15,36 \cdot 1,34=20,58 \text{ мм}$$

$$\Delta_{Г} =12,00 \cdot 1,34=16,08 \text{ мм}$$

Сравнивая результаты этих методов, можно сказать, что при использовании метода минимума-максимума взяты слишком жесткие допуски.

Сделав анализ данных, полученных вероятностным методом, можно сделать вывод, что получено распределение допуска, но оно все равно является недостаточно точным и носит довольно приблизительный характер.

Допуски, полученные методом попыток, взяты из СП70.13330.2012, но могут не отражать действительной картины, так как при возведении зданий не всегда соблюдаются нормы точности.

Когда же известны параметры (уровень геодезического сопровождения объекта, уровень технологичности возведения конструкции), то высчитать допуски, отражающие действительность гораздо проще, другой вопрос в том, что они не всегда будут отвечать заявленным нормам.

Количественная оценка технологичности сборочных элементов считается на стадии проектирования и зависит от комплексного показателя.

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^n \varphi_i}$$

Где

k_i – значение i -ого показателя технологичности сборочного элемента

φ_i – коэффициент весомости i -ого частного показателя технологичности сборочного элемента

n – количество принятых показателей

Далее выбираются параметры для расчета количественной оценки технологичности:

1. Технологичность разделительной операции. Способ производства заготовок для изготовления сборочного элемента. Этот параметр

характеризуется оснащенностью производственных мощностей на строительной площадке.

2. Масса детали. Этот параметр важен при использовании в отдельно взятой технологической операции человеческого ресурса.
3. Способ крепления. Возможность крепления деталей на сварку или на болты, или на заклепки. Это объясняется тем, что сварные узловые соединения более технологичны в изготовлении, нежели болтовые, но при этом, болтовые соединения гораздо проще в монтаже, при условии попадании опорных фланцев в проектное положение, нежели соединения на сварке. Так как после производства сварных работ необходимо выполнить ряд технологических операций по защите сварного шва, а именно: сбить окалины и шлак, зачистить сварной шов таким образом, чтобы не срезать его, покрыть антикоррозийным составом.
4. Количество деталей в 1-м сборочном элементе. Сложность изготовления сборочного элемента также зависит от количества деталей в нем.
5. Уровень повторяемости конструктивных элементов во всей конструкции. Наивысшая технологичность, согласно данному показателю, достигается в случае, когда конструкция состоит из одинаковых сборочных элементов или наоборот будет минимальной, в случае, когда конструкция содержит в себе множество различных по параметрам сборочных элементов.
6. Технологичность монтажа отдельно взятого сборочного элемента. Данный показатель отражает то, насколько трудоемок монтаж рассчитываемого сборочного элемента.

Также стоит отметить, что если расчетный комплексный показатель технологичности выше базового (исходного), то рассматриваемый сборочный элемент является технологичным для изготовления в условиях строительной площадки и последующего монтажа.

Заключение

После проведения ряда расчетов и строительно-монтажных работ:

1. Установлено, что данные полученные с помощью теоретических методов расчета технологических и функциональных допусков действительно не схожи со значениями, полученными эмпирическим путем. Это происходит по причине накапливающейся погрешности в технологической размерной цепи.
2. Выявлено, что вероятностно-статистический метод наиболее точно отражает действительные значения допусков, так как в его основу ложатся данные, полученные эмпирическим путем.
3. Для повышения технологичности сборки следует оценить качественную и рассчитать количественную технологичность отдельных сборочных элементов с помощью применения комплексного коэффициента, опираясь на факторы, описанные в статье. Это позволит упростить процессы изготовления и монтажа конструкций.

Литература

1. Авиром Л.С. Надежность конструкций сборных зданий и сооружений.- Л.:Стройиздат,1971.-216с.
 2. Беляев Б.И. О точности изготовления и монтажа стальных конструкций "Промышленное строительство", 1961, №4. – С. 3-5.
 3. Martinez P., Ahmad R., Al-Hussein M.A. vision-based system for pre-inspection of steel frame manufacturing //Automation in Construction. – 2019. – Т. 97. – С. 151-163.
 4. Shahtaheri Y. et al. Managing risk in modular construction using dimensional and geometric tolerance strategies //Automation in construction. – 2017. – Т. 83. – С. 303-315.
-

5. Выпшис А.П., Парасонис И.И., Клевцов В.А. Обеспечение точности геометрических параметров монтажа конструкций одноэтажных каркасов промышленных зданий //Промышленное строительство. - 1988.- №6. с.37-38.
6. Столбова С.Ю. Методы расчета и обоснование технологических допусков планового и вертикального положения конструкций при возведении одноэтажных производственных зданий. // Вестник СибАДИ.-2013. – С. 57-62.
7. Семенов А.Н. Технологичность конструкции изделия машиностроения. - Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2016. – 217 с.
8. Бочкарев, П. Ю., Л.Г. Бокова. Оценка производственной технологичности деталей: учебное пособие — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 132 с.
9. Столбов Ю.В., Столбова Ю.В., Хуторная О.Ю. Экономическое обоснование допусков на геодезические и строительно-монтажные работы при возведении зданий и сооружений. // Землеустроительное и кадастровое обеспечение комплексного развития территории и недвижимости: Сб. трудов. – Омск: ИПК Макшеевой Е.А., 2010. – С. 131-135
10. Столбов Ю.В. Статистические методы контроля качества строительно-монтажных работ. –М.: Стройиздат, 1982. –87с.

References

1. Avirom L.S. Nadezhnost' konstrukcij sbornyh zdaniy i sooruzhenij. [Reliability of prefabricated buildings and structures]. L.: Strojizdat, 1971. 216p.
 2. Beljaev B.I. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1961. №4. pp 3-5.
 3. Martinez P., Ahmad R., Al-Hussein M. Automation in Construction. 2019. T. 97. pp. 151-163.
 4. Shahtaheri Y. et al. Automation in construction. 2017. T. 83. pp. 303-315.
-



5. Vypshis A.P., Parasonis I.I., Klevcov V.A. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1988. №6. pp. 37-38.
6. Stolbova S.Ju. Vestnik SibADI. 2013. pp. 57-62.
7. Semenov A.N. Tehnologichnost' konstrukcii izdelija mashinostroenija. [Manufacturability of mechanical engineering product design]. Rybinsk: RGATU imeni P.A. Solov'eva. 2016. 217 p.
8. Bochkarev, P. Ju., Bokova. L.G. Ocenka proizvodstvennoj tehnologichnosti detalej [Assessment of the manufacturability of parts]: uchebnoe posobie . Sankt-Peterburg : Lan', 2017. 132 p.
9. Stolbov Ju.V., Stolbova S.Ju., Hutornaja O.Ju. Zemleustroitel'noe i kadastrovoe obespechenie kompleksnogo razvitija territorii i nedvizhimosti: Sb. trudov. Omsk: IPK Maksheevoj E.A. 2010. pp. 131-135
10. Stolbov Ju.V. Statisticheskie metody kontrolja kachestva stroitel'no-montazhnyh rabot [Statistical methods for quality control of construction and installation works]. M.: Strojizdat, 1982. 87 p.

Дата поступления: 22.01.2024

Дата публикации: 2.03.2024