



Выявление и анализ значимости источников неопределенности при оценке модуля крупности песка

Т.А. Лебедева¹, А.М. Даминова²✉

^{1,2}Братский государственный университет, Братск, Россия

Аннотация. Целью данной работы является разработка и апробация подхода к оценке неопределенности измерений модуля крупности песка, основанного на выявлении значимых источников неопределенности для обеспечения достоверности результатов контроля качества и соответствия требованиям нормативных документов. Исследование направлено на разработку эффективной методики оценки неопределенности, необходимой для повышения точности и надежности контрольных мероприятий. Для достижения поставленной цели был применен подход, соответствующий ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Он включал выявление потенциальных источников неопределенности в процессе определения модуля крупности песка, их классификацию на случайные и систематические. Для количественной оценки значимости этих источников был использован дисперсионный анализ на основе планированного эксперимента. Дисперсионный анализ позволил установить, что наиболее значимым источником неопределенности является неоднородность материала, которая объясняет 96,3 % общей дисперсии результатов определения модуля крупности песка. Человеческий фактор также статистически значим, но его вклад существенно меньше. Используемое оборудование не оказало статистически значимого влияния на дисперсию результатов. Полученные результаты проиллюстрированы с помощью статистических гистограмм. Исследование показало значимую роль неоднородности песка как основного источника неопределенности типа А. Для снижения суммарной неопределенности необходимо управление фактором «Материал» путем глубокого исследования характеристик песка, обуславливающих изменчивость и с учетом этого внедрение системы контроля качества поступающих партий песка.

Ключевые слова: модуль крупности песка, источники неопределенности, дисперсия результатов, дисперсионный анализ, случайные и систематические составляющие неопределенности

Для цитирования: Лебедева Т.А., Даминова А.М. Выявление и анализ значимости источников неопределенности при оценке модуля крупности песка // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2026. Т. 16. № 2. С. 369–378. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2026-2-369-378>. EDN: RGVADQ.

Original article

Identification and analysis of the significance of sources of uncertainty in estimating the sand size modulus

Tatyana A. Lebedeva¹, Anastasiya M. Daminova²✉

^{1,2}Bratsk State University, Bratsk, Russia

Abstract. The purpose of this work is to develop and test an approach to assessing the uncertainty of measuring the sand size modulus based on identifying significant sources of uncertainty to ensure the reliability of quality control results and compliance with the requirements of regulatory documents. The research is aimed at developing an effective methodology for estimating uncertainty, which is necessary to improve the accuracy and reliability of control measures. To achieve this goal, an approach was applied in accordance with GOST 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. It included identifying potential sources of uncertainty in the process of determining the sand size modulus, and classifying them into random and

systematic ones. To quantify the significance of these sources, a variance analysis based on a planned experiment was used. The dispersion analysis allowed us to establish that the most significant source of uncertainty is the heterogeneity of the material, which explains 96.3% of the total dispersion of the results of determining the sand size modulus. The human factor is also statistically significant, but its contribution is significantly less. The equipment used did not have a statistically significant effect on the variance of the results. The obtained results are illustrated using statistical histograms. The study showed the significant role of sand heterogeneity as the main source of uncertainty of type A. To reduce the total uncertainty, it is necessary to manage the "Material" factor by deeply studying the characteristics of sand that cause variability and, taking this into account, the introduction of a quality control system for incoming sand shipments.

Keywords: finess modulus of sand, sources of uncertainty, variance of results, analysis of variance, random and systematic components of uncertainty

For citation: Lebedeva T.A., Daminova A.M. Identification and analysis of the significance of sources of uncertainty in estimating the sand size modulus. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2026;16(2):369-378. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2026-2-369-378>. EDN: RGVADQ.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение достоверности результатов контроля качества является условием объективной оценки соответствия строительной продукции требованиям нормативных документов [1, 2]. Как известно, результаты определения показателей качества продукции обладают вариативностью, которая обусловлена влиянием множества факторов [3]. В основе современных подходов к обеспечению точности и надежности результатов контроля – принципы метрологического обеспечения [4–6]. Международный опыт в сфере метрологического обеспечения качества продукции демонстрирует новый подход к оценке вариативности результатов контроля на основе неопределенности измерений [7, 8]. Национальная система подтверждения соответствия продукции также требует оценки вклада испытательной лаборатории в неопределенность измерений посредством ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» [9–12]. Этот стандарт определяет, что в тех случаях, когда метод испытаний исключает строгую оценку неопределенности измерений, оценивание должно проводиться на основе понимания теоретических принципов или практического опыта выполнения метода [13–20]. Это обуславливает необходимость анализа измерительного процесса, выявление всех источников неопределенности с учетом специфики метода проведения испытаний.

Следовательно, для каждого метода испытаний необходима разработка методики выявления источников и количественного учета неопределенности измерений. Так, для контроля качества в строительстве применяется множество методов испытаний, каждый из которых, имея свою специфику, требует индивидуального подхода к оценке неопределенности [21–

30]. Методы испытаний песка для использования в строительстве также имеют свои особенности и для обеспечения надежности результатов контроля качества песка по ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний (новая редакция документа с изменениями на 01.12.2018)» необходима оценка неопределенности измерений с учетом этих особенностей и разработка ее методики. Целью настоящей работы является разработка и апробация методического подхода к оценке неопределенности измерений модуля крупности песка, основанного на выявлении значимых источников неопределенности для обеспечения достоверности результатов контроля качества и соответствия требованиям нормативных документов.

МЕТОДЫ

Оценивание неопределенности измерений при испытаниях песка производилось в соответствии с ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения» и включало количественное определение случайных и систематических составляющих неопределенности, влияющих на вариацию модуля крупности. Для этого были выявлены источники неопределенности путем анализа измерительного процесса по определению модуля крупности песка по ГОСТ 8735-88 (ручной способ), производилась их классификация на случайные и систематические, а также определялась их значимость методом дисперсионного анализа с проведением дробного факторного эксперимента. Для выполнения дисперсионного анализа был использован универсальный статистический пакет STADIA. Результаты анализа положены в основу рекомендаций по оценке неопределенности при определении модуля крупности песка, включая неопределенность типа A и B.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С целью проведения дисперсионного анализа был выполнен эксперимент, на начальном этапе которого были выбраны наиболее вероятные и практически значимые факторы, обуславливающие неопределенность.

К источникам неопределенности типа А (случайные факторы) можно отнести:

- неоднородность партии песка;
- случайные отклонения от оптимального режима высушивания, приводящие к неточности определения массы;
- случайные изменения влажности воздуха, влияющие на массу пробы после высушивания;
- субъективность отбора пробы, связанная с личным опытом оператора;
- нестабильность температуры в сушильном шкафу;
- агломерация частиц песка, влияющая на результаты просеивания;
- случайные ошибки при выполнении математических расчетов и записи результатов.

Источники неопределенности типа В (систематические факторы):

- погрешность весов;
- погрешность термометра;
- несоответствие размера ячеек сит заявленному, связанное с систематическим отклонением фактического размера ячеек сит от номинального значения.

Следует учесть, что метод определения модуля крупности песка регламентирован ГОСТ 8735 и при соблюдении нормативных требований к процедуре измерений действие таких факторов, как метод отбора пробы и условия проведения измерений, будет сведено к минимуму. В связи с этим, остальные источники неопределенности, обуславливающие вариативность и смещение измеряемой величины, можно сгруппировать для проведения дисперсионного анализа с целью оценки их значимости (табл. 1, 2).

Для оценки значимости факторов «Материал», «Лаборант», «Оборудование» и их взаимодействий по дробному факторному плану проведен эксперимент, позволяющий оценить основные эффекты (влияние каждого фактора по отдельности) и двухфакторные взаимодействия на модуль крупности песка (табл. 2).

Таблица 1. Описание факторов и уровней дробного трехфакторного эксперимента
Table 1. Description of the factors and levels of the fractional three-factor experiment

№	Источники неопределенности	Обоснование	Уровни варьирования факторов
1	Партия песка (фактор: «Материал»)	Песок является материалом с естественной неоднородностью по размеру частиц и составу, которые меняются от партии к партии. Даже при идеальной методике отбора и высокой точности измерений результаты будут подвержены вариации	Верхний уровень (+1): партия песка № 1 Средний уровень (0): партия песка № 2 Нижний уровень (-1): партия песка № 3
2	Человеческий фактор (фактор: «Лаборант»)	Различия в действиях лаборантов, заключающиеся в различной технике просеивания, и интерпретации результатов могут привести к разбросу данных	Верхний уровень (+1): лаборант № 1 Средний уровень (0): лаборант № 2 Нижний уровень (-1): лаборант № 3
3	Комплект оборудования (фактор: «Оборудование»)	Техническое состояние и точность оборудования (сит, весов) влияют на результаты измерений, но при регулярной поверке/калибровке и техническом обслуживании их вклад в неопределенность можно минимизировать	Верхний уровень (+1): комплект оборудования № 1 Средний уровень (0): комплект оборудования № 2 Нижний уровень (-1): комплект оборудования № 3

Таблица 2. План дробного трехфакторного эксперимента
Table 2. The plan of a fractional three-factor experiment

№ п.п	Значения переменных						Модуль крупности (Мк) по результатам эксперимента
	Кодированные			Натуральные			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	
1	+	+	-	Материал № 1	Лаборант № 1	Оборудование № 3	2,38
2	+	0	0	Материал № 1	Лаборант № 2	Оборудование № 2	2,45
3	+	-	+	Материал № 1	Лаборант № 3	Оборудование № 1	2,35
4	0	+	-	Материал № 2	Лаборант № 1	Оборудование № 3	2,78
5	0	0	0	Материал № 2	Лаборант № 2	Оборудование № 2	2,68
6	0	-	+	Материал № 2	Лаборант № 3	Оборудование № 1	2,75
7	-	+	-	Материал № 3	Лаборант № 1	Оборудование № 3	3,12
8	-	0	0	Материал № 3	Лаборант № 2	Оборудование № 2	3,01
9	-	-	+	Материал № 3	Лаборант № 3	Оборудование № 1	3,05

Результаты дисперсионного анализа представлены в табл. 3. Оценка статистической значимости факторов производилась на основе вероятности отклонения нулевой гипотезы (р-значение). При вероятности ниже 5 %

был сделан вывод о том, что альтернативная гипотеза верна и имеет место статистический эффект, то есть фактор оказывает статистически значимое влияние на вариацию модуля крупности песка.

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа по оценке значимости факторов и их взаимодействий

Table 3. The results of the analysis of variance to assess the significance of factors and their interactions

Наименование фактора	df	SS (Sum_sq)	MS	F	р-значение	η ²
Материал (А)	2	6,45	3,225	129,00	< 0,000*	0,963
Лаборант (В)	2	0,15	0,0750	4,00	0,033	0,022
Оборудование (С)	2	0,01	0,0050	0,17	0,067	0,001
А * В	4	0,08	0,2000	0,67	0,621	0,012
А * С	4	0,06	0,0150	0,50	0,733	0,009
В * С	4	0,03	0,0075	0,25	0,905	0,004
А * В * С	8	0,24	0,0300			
Итого	26	7,02				

Примечание: *Р-значения < 0,000 указывает, что оно значительно меньше заданного программным обеспечением минимума

При интерпретации результатов дисперсионного анализа было установлено, что наиболее значимым фактором является «Материал».

Различия между уровнями фактора «Материал» вносят подавляющий вклад в вариацию

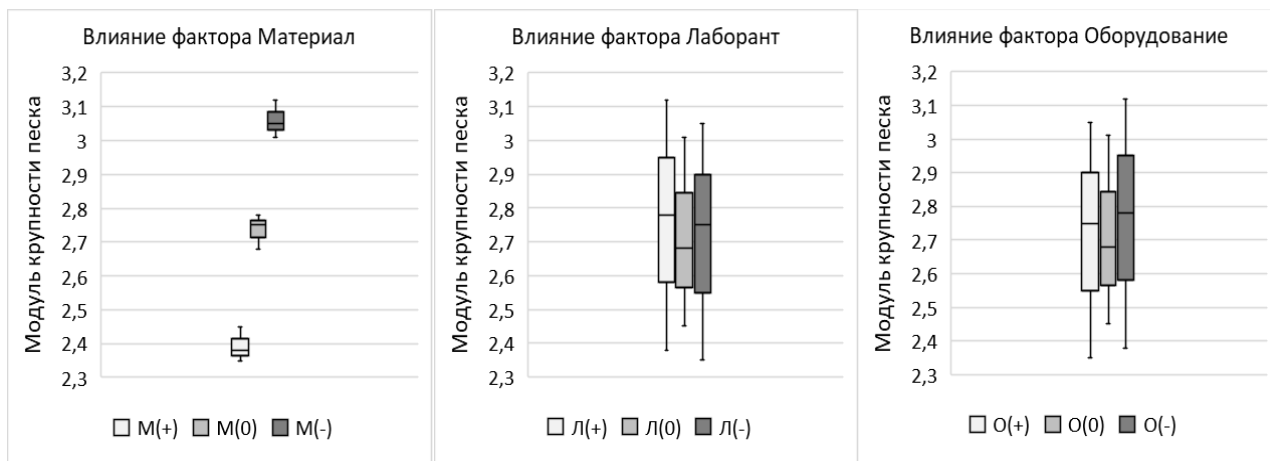
модуля крупности песка, о чем свидетельствует р-значение <<0,05, а также значение ета-квадрат (η² = 0,963) определяющее 96,3 % общей дисперсии модуля крупности. Фактор «Лаборант» также является статистически значимым на уровне 0,05 с р-значением равным

0,033. Вклад фактора в общую вариацию модуля крупности песка составляет всего лишь 2,2 %, с соответствующей мерой величины эффекта $\eta^2 = 0,022$. Величина эффекта фактора «Оборудование», измеренная с помощью $\eta^2 = 0,001$, составила 0,1 %, р-значение, равное $0,067 > 0,05$, свидетельствует об отсутствии статистически значимого вклада в общую вариацию модуля крупности песка. Различия между используемыми комплектами оборудования не оказывают существенного влияния на изменчивость модуля крупности песка. Все ком-

плекты оборудования для испытаний показывают стабильные результаты. Интерпретация взаимодействий факторов показывает отсутствие статистически значимого влияния на изменчивость модуля крупности песка (р-значения взаимодействий превышают уровень 0,05).

Вклад взаимодействий факторов в общую вариацию не значителен.

Масштаб эффектов, выявленный по результатам дисперсионного анализа также проиллюстрирован на рисунке с использованием статистической гистограммы «ящик с усами».



**Влияние факторов «Материал», «Лаборант», «Оборудование»
на изменчивость модуля крупности песка**

The effect of Material, Technician, Equipment on the variability of sand fineness modulus

Для фактора «Материал» «ящики» не перекрываются и значительно удалены друг от друга, медианы расположены по возрастанию, что свидетельствует о значительном влиянии фактора на дисперсию модуля крупности песка. Узкие «ящики» и короткие «усы» говорят о низкой внутренней изменчивости данных в каждой группе материалов от действия других факторов. График подтверждает результаты дисперсионного анализа, а именно самый значимый вклад фактора «Материал» (96,3 %) в общую дисперсию модуля крупности песка.

Гистограммы для факторов «Лаборант» и «Оборудование» демонстрируют значительное перекрытие «ящиков» и близко расположенные медианы, что свидетельствует о незначительном влиянии факторов на дисперсию модуля крупности песка. Все «ящики» имеют заметно больший размер и длинные «усы», что говорит о большом разбросе внутри групп от действия фактора «Материал». Данные гистограмм согласуются с результатами дисперсионного анализа, который показал незначительный вклад факторов «Лаборант» и «Оборудование» – 2,2 и 0,1 % соответственно в общую дисперсию модуля крупности песка.

Для количественной оценки неопределенности при определении модуля крупности песка в соответствии с ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 необходим учет случайных и систематических составляющих неопределенности. Целесообразно в качестве источников неопределенности типа А рассматривать только факторы «Материал» и «Лаборант», поскольку вклад в дисперсию «Оборудования» статистически не значим. В качестве источника неопределенности типа В целесообразно рассматривать фактор «Оборудование» как вклад в смещение. Поскольку составляющая неопределенности, обусловленная факторами «Материал» и «Лаборант» имеет случайный характер, ее количественную оценку необходимо производить на основе стандартного отклонения. Составляющую неопределенности, обусловленную фактором «Оборудование» в виду своего систематического характера, необходимо определять на основе априорной информации через выбранное вероятностное распределение. Например, с использованием значения паспортной погрешности оборудования через дисперсию симметричного прямоугольного распределения. Путем

квадратного суммирования стандартных неопределенностей типа А и типа В оценивают суммарную неопределенность. Поскольку по результатам исследования фактор «Материал» – самый значимый источник неопределенности типа А, то его вклад в суммарную неопределенность является значительным. В связи с этим, для минимизации суммарной неопределенности необходимо управление фактором «Материал». Для этого необходимо определение характеристик песка, обуславливающих изменчивость модуля крупности и внедрения системы контроля и отслеживания проблемных партий песка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее значимым источником неопределенности при определении модуля крупно-

сти песка является неоднородность самого материала, определяющая 96,3 % общей дисперсии результатов. Доля человеческого фактора составляет лишь 2,2 %. Используемое оборудование не вносит статистически значимого вклада (порядка 0,1 %) в общую дисперсию.

2. При количественной оценке суммарной неопределенности неоднородность материала и человеческий фактор учтены как мера дисперсии (источники неопределенности типа А), вклад оборудования учтен как мера смещения (источник неопределенности типа В).

3. Минимизация общей неопределенности при определении модуля крупности песка требует управления фактором «Материал» путем глубокого исследования характеристик песка, обуславливающих изменчивость, и с учетом этого внедрение системы контроля качества поступающих партий песка.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Давыдов В.М., Шкробова В.И. Методы определения причин несоответствий процесса установленным требованиям // Информационные технологии XXI века: сборник научных трудов. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2023. С. 281–288. EDN: QVXRCA.
2. Montgomery D.C. Introduction to Statistical Quality Control. New York: John Wiley&Sons, 2020. 754 p.
3. Гатауллин Р.Р., Шакирова Д.М. Инструменты менеджмента качества // Повышение управленческого, экономического, социального и инновационно-технического потенциала предприятий, отраслей и народно-хозяйственных комплексов: сб. статей XIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 19–20 мая 2022 г.). Пенза, 2022. С. 56–58. EDN: ECWHYD.
4. Шишлаков М.А. Закон «Об обеспечении единства измерений» и неопределенность измерения // Главный метролог. 2019. № 4. С. 38–45. EDN: UBVMMS.
5. Шкробова В.И., Давыдов В.М. Исследование погрешностей при определении причин несоответствий как фактор повышения качества продукции // Роль технического регулирования и стандартизации в условиях цифровой экономики. Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (г. Екатеринбург, 02 ноября 2023 г.). Екатеринбург, 2023. С. 360–366. EDN: AGMYRA.
6. Балашова Ю.А., Изранов С.А. Неопределенность измерений // Актуальные вопросы современной науки и образования. Сб. статей XX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 20 июня 2022 г.). Пенза, 2022. С. 48–50. EDN: ULANQG.
7. Turdialieva M.M., Raxmonberdiyeva L.B. qizi Application of Measurement Uncertainty Methods in Scientific and Engineering Research // International Conference on Interdisciplinary Science. 2025. Vol. 2. Iss. 6. P. 170–174.
8. Knapp W. Tolerance and Uncertainty // Transactions on Engineering Sciences. 2001. Vol. 34. P. 357–366.
9. Понкратенко А.В., Давыдов В.М. Понятие неопределенности измерений и его развитие в отечественной метрологии // Роль технического регулирования и стандартизации в условиях цифровой экономики. Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (г. Екатеринбург, 02 ноября 2023 г.). Екатеринбург, 2023. С. 353–360. EDN: WBPDPV.
10. Грачёва Ю.В. Неопределенность измерений при калибровке лабораторных дозирующих устройств // Аналитика. 2021. Т. 11. № 2. С. 154–159. <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2021.11.2.154.159>. EDN: NMUMJD.
11. Чижова А.А. Оценивание неопределенности измерений // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Дню космонавтики: в 3 т. (г. Красноярск, 12–16 апреля 2021 г.). Красноярск, 2021. Т. 2. С. 869–871. EDN: JSQAGI.
12. Zinoviev A.A., Lebedeva T.A., Daminova A.M. Status of Construction Laboratories and Their Role in the Safety Structure of Buildings and Structures // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2434. Iss. 1. P. 020025. <https://doi.org/10.1063/5.0095665>.
13. Воронова Т.С., Пильцов М.В., Кулыгин В.А. Неопределенность измерений при определении их точности // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2023. № 20. С. 12–15. EDN: BGCWGS.

14. Хамханова Д.Н., Хадыков М.Т., Мосоров В.И., Бахрунов К.К. Оценивание неопределенности измерения при испытаниях на растяжение высокопрочных болтов // *iPolytech Journal*. 2022. Т. 26. № 4. С. 601–611. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-601-611>. EDN: MUBWSJ.
15. Молчанов М.А., Голубинский Ю.М. Разработка комплексного показателя однородности поверхности на основе критериев неопределенности // *Economic Aspects of Industrial Development in the Transition to a Digital Economy*. Сб. науч. статей по материалам VI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 21 сентября 2021 г.). Уфа, 2021. С. 5–11. EDN: DJDBSY.
16. Селиванова З.М., Скоморохов К.В. Идентификация измерительной ситуации при определении теплофизических свойств твердых материалов в условиях неопределенности // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2021. Т. 27. № 4. С. 516–527. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2021.04.pp.516-527>. EDN: FJARTY.
17. Хамханова Д.Н., Сундарон Э.М. Источники неопределенности при поверке мерной стеклянной колбы // *Advances in Science and Technology*. Сб. статей XXVI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 31 января 2020 г.). М., 2020. С. 157–159. EDN: GPHXVY.
18. Савровский К.К. Методология оценки неопределенности результатов калибровки измерительного оборудования, применяемого для обеспечения механических испытаний материалов // *Главный метролог*. 2020. № 6. С. 30–37. EDN: AZRIVX.
19. Aggogeri F., Barbato G., Modesto Barini E., Genta G., Levi R. Measurement Uncertainty Assessment of Coordinate Measuring Machines by Simulation and Planned Experimentation // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2011. Vol. 4. Iss. 1. P. 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.01.007>.
20. van Dijk M., Kok G. Comparison of Uncertainty Evaluation Methods for Virtual Experiments with an Application to a Virtual CMM // *Measurement: Sensors*. 2025. Vol. 38. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101785>.
21. Рогачева Т.В. Расчет неопределенности при проведении испытаний по определению группы горючести строительных материалов // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. 2010. № 2. С. 70–77. EDN: SMWNYZ.
22. Кутяйкин В.Г., Горбачев П.А. Оценивание неопределенности при определении прочностных характеристик материалов // *Компетентность*. 2021. № 7. С. 16–20. <https://doi.org/10.24412/1993-8780-2021-7-16-20>. EDN: GFUKRI.
23. Ченцова Ю.С., Толмачев В.В., Забелина А.А. Оценивание неопределенности при испытаниях на ударный изгиб с использованием стандартного образца // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2023. Т. 19. № 4. С. 143–150. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-143-150>. EDN: YPVPJL.
24. Мухамеджанова О.Г., Демидов Д.Г., Рекус И.Г., Комарова Л.Ю. Методика расчета неопределенности прочности на растяжение при изгибе бетонных призм // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 2. С. 542–547. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-2-542-547>. EDN: PWXIMD.
25. Хакимов О. Ультразвуковой метод определения прочности бетона и его неопределенность // *Тенденции и перспективы развития городов*. 2023. Т. 1. № 1. С. 351–353.
26. Мартинсон В.Л., Кочетков А.В., Болячевец И.А., Малазония Г.Ш., Белозеров Я.М. Расчет неопределенности измерения толщины образцов асфальтобетона в лаборатории строительного контроля // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2024. Т. 3. С. 145–150. EDN: OHJOTU.
27. Пивоваров В.А. Методы контроля прочности бетона на основе измерений поверхностной твердости, проблемы метрологического обеспечения измерений // *Мир измерений*. 2017. № 1. С. 6–13. EDN: YHOICT.
28. Alavi S.A., Noel M. Uncertainty and Prediction Intervals of New Machine Learning Approach for Non-Destructive Evaluation of Concrete Compressive Strength // *Buildings*. 2025. Vol. 15. Iss. 4. P. 544. <https://doi.org/10.3390/buildings15040544>.
29. Собина Е.П. Метрология пористости и проницаемости твердых веществ и материалов: монография. Екатеринбург: Издательско-полиграфический центр УрФУ, 2021. 428 с. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-B-978-5-7996-3249-6>. EDN: EFKLMC.
30. Лебедева Т.А., Мирзоев М.А. Выявление источников неопределенности измерений при контроле качества строительных материалов на основе жидкостекольных композиций // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки*. 2024. Т. 1. С. 220–222. EDN: QAQNTN.

REFERENCES

1. Davydov V.M., Shkrobova V.I. Methods for Determining the Causes of Process Non-Conformities to Established Requirements. In: *Information Technologies of the 21st Century: Collection of Scientific Papers*. Khabarovsk: Pacific State University, 2023. P. 281–288. (In Russ.). EDN: QVXRCA.
2. Montgomery D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*. New York: John Wiley&Sons, 2020. 754 p.

3. Gataullin R.R., Shakirova D.M. Quality Management Tools. In: *Povyshenie upravlencheskogo, ekonomicheskogo, sotsial'nogo i innovatsionno-tekhnicheskogo potentsiala predpriyatii, otraslei i narodno-khozyaistvennykh kompleksov: sbornik statei XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Enhancing the Managerial, Economic, Social, and Innovative-Technical Potential of Enterprises, Industries, and National Economic Complexes: A Collection of Articles from the XIII International Scientific and Practical Conference*. 19–20 May 2022, Penza. Penza; 2022. P. 56–58. (In Russ.). EDN: ECWHYD.
4. Shishlakov M.A. The Law "On Ensuring the Uniformity of Measurements" and the Uncertainty of Measurement. *Glavnyi metrolog*. 2019;4:38-45. (In Russ.). EDN: UBVMC.
5. Shkrobova V.I., Davydov V.M. Research of Errors in Determining the Causes of Inconformity as a Factor of Increasing Product Quality. In: *Rol tekhnicheskogo regulirovaniya i standartizatsii v usloviyakh tsifrovoi ekonomiki. Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh = The Role of Technical Regulation and Standardization in the Digital Economy. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference of Young Scientists*. 02 November 2023, Yekaterinburg. Yekaterinburg; 2023. P. 360–366. (In Russ.). EDN: AGMYRA.
6. Balashova Yu.A., Izranov S.A. Measurement Uncertainty. In: *Aktualnye voprosy sovremennoi nauki i obrazovaniya. Sbornik statei XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Current Issues in Modern Science and Education. Collection of Articles from the XX International Scientific and Practical Conference*. 20 June 2022, Penza. Penza; 2022. P. 48–50. (In Russ.). EDN: ULANQG.
7. Turdialieva M.M., Raxmonberdiyeva L.B. qizi Application of Measurement Uncertainty Methods in Scientific and Engineering Research. *International Conference on Interdisciplinary Science*. 2025;2(6):170-174.
8. Knapp W. Tolerance and Uncertainty. *Transactions on Engineering Sciences*. 2001;34:357-366.
9. Ponkratenko A.V., Davydov V.M. The Concept of Uncertainty of Measurement and Its Development in Russian Metrology. In: *Rol tekhnicheskogo regulirovaniya i standartizatsii v usloviyakh tsifrovoi ekonomiki. Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh = The Role of Technical Regulation and Standardization in the Digital Economy. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference of Young Scientists*. 02 November 2023, Yekaterinburg. Yekaterinburg; 2023. P. 353–360. (In Russ.). EDN: WBPDPV.
10. Gracheva Yu.V. Estimation of Measurement Uncertainty During Calibration of Laboratory Metering Devices. *Analytics*. 2021;11(2):154-159. (In Russ.). <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2021.11.2.154.159>. EDN: NMUMJD.
11. Chizhova A.A. Estimation of Measurement Uncertainty. In: *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики. Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu kosmonavтики: v 3 tomakh = Current Issues in Aviation and Cosmonautics. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference Dedicated to Cosmonautics Day: in 3 Volumes*. 12–16 April 2021, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2021. Vol. 2. P. 869–871. (In Russ.). EDN: JSQAGI.
12. Zinoviev A.A., Lebedeva T.A., Daminova A.M. Status of Construction Laboratories and Their Role in the Safety Structure of Buildings and Structures. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2434(1):020025. <https://doi.org/10.1063/5.0095665>.
13. Voronova T.S., Piltsov M.V., Kulygin V.A. Uncertainty of Measurements in Determining their Accuracy. *Scientific Papers Collection of the Angarsk State Technical University*. 2023;20:12-15. (In Russ.). EDN: BGCWGS.
14. Khamkhanova D.N., Khadykov M.T., Mosorov V.I., Bakhrunov K.K. Evaluation of the Measurement Uncertainty During the Tensile Tests of High-Strength Bolts. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):601-611. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-601-611>. EDN: MUBWSJ.
15. Molchanov M.A., Golubinskii Yu.M. Development of a Comprehensive Indicator of Surface Homogeneity Based on Uncertainty Criteria. In: *Economic Aspects of Industrial Development in the Transition to a Digital Economy. Sbornik nauchnykh statei po materialam VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Economic Aspects of Industrial Development in the Transition to a Digital Economy. Collection of Scientific Articles Based on the Materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. 21 September 2021, Ufa. Ufa; 2021. P. 5–11. (In Russ.). EDN: DJDBSY.
16. Selivanova Z.M., Skomorokhov K.V. Identification of the Measuring Situation When Determining Thermal Properties of Solid Materials under Uncertainty. *Transactions TSTU*. 2021;27(4):516-527. (In Russ.). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2021.04.pp.516-527>. EDN: FJARTY.
17. Khamkhanova D.N., Saundaron E.M. Sources of Uncertainty of Measurements at the Verification of a Dimensional Glass Flask. In: *Advances in Science and Technology. Sbornik statei XXVI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Advances in Science and Technology. Collection of articles from the XXVI International Scientific and Practical Conference*. 31 January 2020, Moscow. Moscow; 2020. P. 157–159. (In Russ.). EDN: GPHXVY.
18. Savrovskii K.K. Methodology for Assessing the Uncertainty of Calibration Results of Measuring Equipment Used to Ensure Mechanical Testing of Materials. *Glavnyi metrolog*. 2020;6:30-37. (In Russ.). EDN: AZRIVX.

19. Aggogeri F., Barbato G., Modesto Barini E., Genta G., Levi R. Measurement Uncertainty Assessment of Coordinate Measuring Machines by Simulation and Planned Experimentation. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2011;4(1):51-56. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.01.007>.
20. van Dijk M., Kok G. Comparison of Uncertainty Evaluation Methods for Virtual Experiments with an Application to a Virtual CMM. *Measurement: Sensors*. 2025;38:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101785>.
21. Rogacheva T.V. Calculation of Uncertainty in Tests to Determine the Flammability Group of Building Materials. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MCHS Respubliki Belarus*. 2010;2:70-77. (In Russ.). EDN: SMWNYZ.
22. Kutaykin V.G., Gorbachev P.A. Estimation of Uncertainty in Determining the Strength of Materials' Characteristics. *Competency*. 2021;7:16-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1993-8780-2021-7-16-20>. EDN: GFUKRI.
23. Chentsova Iu.S., Tolmachev V.V., Zabelina A.A. Estimation of Uncertainty in Charpy Pendulum Impact Test Using the Reference Material. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(4):143-150. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-143-150>. EDN: YPVPJL.
24. Muhamedjanova O.G., Demidov D.G., Rekus I.G., Komarova L.Yu. Measurement Methodology for Uncertainty of Resilience to Stretching in a Curve of Concrete Prisms. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2021;2:542-547. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-2-542-547>. EDN: PWXIMD.
25. Khakimov O. Ultrasonic Method for Determining Concrete Strength and Its Uncertainty. *Tendentsii i perspektivy razvitiya gorodov*. 2023;1(1):351-353. (In Russ.).
26. Martinson V.L., Kochetkov A.V., Bolyachevets I.A., Malazonia G.S., Belozarov Ya.M. Calculation of the Uncertainty of Measuring the Thickness of Samples Asphalt Concrete in the Construction Control Laboratory. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2024;3:145-150. (In Russ.). EDN: OHJOTU.
27. Pivovarov V.A. Methods of Monitoring Concrete Strength Based on Surface Hardness Measurements, Problems of Metrological Support of Measurements. *Measurements World*. 2017;1:6-13. (In Russ.). EDN: YHOICT.
28. Alavi S.A., Noel M. Uncertainty and Prediction Intervals of New Machine Learning Approach for Non-Destructive Evaluation of Concrete Compressive Strength. *Buildings*. 2025;15(4):544. <https://doi.org/10.3390/buildings15040544>.
29. Sobina E.P. *Metrology of Solid Materials and Substances Porosity and Permeability*. Ekaterinburg: Publishing and Printing Center of UrFU, 2021. 428 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2687-0886-B-978-5-7996-3249-6>. EDN: EFKLMC.
30. Lebedeva T.A., Mirzoev M.A. Identification of Sources of Measurement Uncertainty in Quality Control of Building Materials Based on Liquid Glass Compositions. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2024;1:220-222. (In Russ.). EDN: QAQNTN.

Информация об авторах

Лебедева Татьяна Анатольевна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры строительных конструкций
и технологий строительства,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия,
e-mail: karusel_bratsk@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8104-8064>
Author ID: 646031

Даминова Анастасия Михайловна,

к.т.н., доцент кафедры строительных
конструкций и технологий строительства,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40,
Россия,
✉e-mail: daminova_work@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7752-4484>
Author ID: 641376

Information about the authors

Tatiana A. Lebedeva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Building
Structures and Construction Technologies,
Bratsk State University,
40 Makarenko St., Bratsk 665709, Russia,
e-mail: karusel_bratsk@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8104-8064>
Author ID: 646031

Anastasiya M. Daminova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the De-
partment of Building Structures and Construction
Technologies,
Bratsk State University,
40 Makarenko St., Bratsk 665709, Russia,
✉e-mail: daminova_work@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7752-4484>
Author ID: 641376

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.01.2026.
Одобрена после рецензирования 26.02.2026.
Принята к публикации 03.03.2026.

Information about the article

The article was submitted 27.01.2026.
Approved after reviewing 26.02.2026.
Accepted for publication 03.03.2026.