

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 691.553

Оценка пространственной однородности сухих строительных смесей

Е.М. Гетьманова, Е.А. Шляхова

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассмотрен подход к оценке однородности сухой штукатурной смеси на гипсовом вяжущем, основанный на статистической обработке результатов определения водоудерживающей способности. Цель работы — установить возможность применения методов математической статистики для оценки пространственной неоднородности смеси в объеме смесителя. Исследование выполнено на основе сопоставления выборок, сформированных по результатам испытаний проб, отобранных из двух различных зон смесителя. В работе использован критерий Стьюдента. Показано, что статистический анализ позволяет более объективно оценивать качество смешения, выявлять устойчивые различия между зонами смесителя и обосновывать необходимость совершенствования технологии перемешивания.

Ключевые слова: сухие строительные смеси; гипсовая штукатурная смесь; однородность смеси; водоудерживающая способность; статистический анализ; критерий Стьюдента

Для цитирования. Гетьманова Е.М., Шляхова Е.А. Оценка пространственной однородности сухих строительных смесей. *Молодой исследователь Дона*. 2026;11(3):48–52.

Assessment of Spatial Homogeneity of Dry Building Mixes

Elena M. Getmanova, Elena A. Shlyakhova

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The article studies the problem of assessing the homogeneity of dry plaster mixes based on gypsum binder by using statistical approach to processing the results of water retention capacity calculations. The objective of the study was to establish the possibility of using mathematical statistics for assessment of the spatial heterogeneity of a mixture contained in a mixer. The research implied the comparison of testing results of the specimens from the sample groups taken from two different zones of a mixer. The Student's t-test was used. It was demonstrated that statistical analysis enables a more unbiased assessment of mixing quality, making it possible to identify consistent differences between zones of a mixer and justify the need for improving mixing technology.

Keywords: dry building mixes; gypsum-based plaster mix; homogeneity of a mixture; water retention capacity; statistical analysis; Student's t-test

For Citation. Getmanova EM, Shlyakhova EA. Assessment of Spatial Homogeneity of Dry Building Mixes. *Young Researcher of Don*. 2026;11(3):48–52.

Введение. Развитие строительного материаловедения связано с проектированием составов, обладающих заранее заданными физико-механическими характеристиками. Современные сухие строительные смеси (далее ССС) представляют собой многокомпонентные системы, в состав которых, помимо минерального вяжущего и заполнителя, могут входить тонкодисперсные минеральные добавки, полимерные модификаторы, водоудерживающие агенты, редиспергируемые порошки, пластифицирующие, гидрофобизирующие и иные функциональные компоненты. Усложнение рецептурного состава закономерно расширяет диапазон регулируемых свойств материала, однако одновременно существенно повышает чувствительность готового продукта к отклонениям на стадии дозирования, смешения и технологического контроля. Даже незначительная неоднородность распределе-

ния отдельных компонентов в объеме смеси способна привести к изменению эксплуатационно значимых показателей. Вследствие этого вопрос однородности ССС и ее оценки приобретает ключевое значение в обеспечении качества продукции.

В исследованиях, посвященных технологии производства сухих строительных смесей, однородность рассматривается как один из базовых показателей качества готового продукта. В частности, в работах по смесительному оборудованию и технологиям подготовки ССС подчеркивается, что именно равномерность распределения компонентов во многом определяет соответствие смеси нормативным и эксплуатационным требованиям [1]. Отмечается также, что на производственной линии особое значение приобретают конструкция смесителя, характер движения частиц, режимы перемешивания и организация загрузки компонентов, поскольку именно эти параметры формируют конечную степень однородности системы [2].

Контроль качества сухих строительных смесей представляет собой сложную научно-техническую задачу, поскольку объект контроля является дисперсной многокомпонентной системой со стохастическим характером распределения частиц. В реальных условиях производства качество смеси определяется как рецептурой, так и совокупным влиянием переменных технологических факторов: точностью дозирования, гранулометрическим составом сырья, различиями в насыпной плотности компонентов, влажностью материалов, временем смешения, состоянием рабочих органов оборудования, а также условиями отбора проб. В результате показатели качества могут варьироваться как в пространстве, то есть в различных зонах смесителя, так и во времени — от одной производственной партии или месяца наблюдений к другому. Это означает, что простое сопоставление отдельных измерений или даже средних значений без статистической интерпретации не позволяет надежно судить о наличии либо отсутствии систематической неоднородности.

Именно поэтому в задачах контроля и оценки качества сухих строительных смесей возрастает роль статистических методов обработки экспериментальных данных. Их применение позволяет перейти от описательного уровня анализа к количественно обоснованной проверке гипотез о характере распределения показателей качества. Статистический подход делает возможным различение случайных колебаний результатов измерений и устойчивых, воспроизводимых различий, обусловленных особенностями технологического процесса.

Основная часть. Оценка однородности сухих строительных смесей представляет собой самостоятельную научно-методическую проблему, поскольку в настоящее время отсутствует универсальный стандартизированный подход, позволяющий количественно характеризовать степень равномерности распределения компонентов в объеме смеси, что также отмечается в [2, 3]. В отличие от нормируемых государственными стандартами показателей, однородность не является отдельным физико-механическим свойством материала, а лишь отражает характер распределения компонентов или параметров смеси в пространстве.

В связи с этим однородность оценивается косвенно — на основе результатов испытаний, отбираемых от партии ССС проб, и статистической обработки экспериментальных данных отдельных показателей качества. При этом выбор конкретного показателя, схема отбора, включая место, глубину, объем и момент отбора проб, существенно влияют на результат оценки, поскольку различные свойства смеси обладают неодинаковой чувствительностью к неоднородности распределения компонентов.

Дополнительная сложность заключается в том, что сухая строительная смесь является многокомпонентной дисперсной системой, в которой отдельные составляющие различаются по гранулометрическому составу, насыпной плотности, форме частиц и склонности к сегрегации. Вследствие этого смесь может проявлять различную степень однородности по разным компонентам и показателям, что затрудняет ее однозначную характеристику. Как показывают исследования процессов смешения сыпучих материалов, различия в свойствах частиц могут приводить к пространственной неоднородности даже при внешне стабильном технологическом режиме [4].

По этой причине достоверная оценка однородности невозможна без статистической обработки экспериментальных данных, позволяющей разграничить случайную вариацию измерений и устойчивые различия между исследуемыми зонами смеси.

Таким образом, в современных исследованиях однородность ССС целесообразно рассматривать как степень равномерности распределения исследуемого показателя, устанавливаемую на основе репрезентативного проб-отбора и статистически обоснованного анализа результатов испытаний.

Целью настоящего исследования является оценка пространственной однородности сухой строительной смеси в рабочем объеме смесителя на основе статистического анализа результатов определения значения выбранного исследуемого показателя. В качестве такого признака в научных и производственных исследованиях могут использоваться как прямые показатели, например содержание контрольного компонента, пигмента, активной добавки или химического модификатора [5], так и косвенные функциональные показатели, такие как насыпная плотность, водоудерживающая способность, прочность, подвижность, влажность или другие характеристики.

В качестве рабочей гипотезы было принято предположение о том, что при наличии неоднородности смеси значения исследуемого показателя для проб, отобранных из различных частей смесителя, будут систематически различаться, а выявленные различия могут быть статистически подтверждены. Соответственно, при достаточной однородности смешения различия между выборками, сформированными по результатам отбора проб из различных зон смесителя, не должны носить статистически значимого характера.

Экспериментальная часть исследования была выполнена в условиях производственного процесса изготовления сухой штукатурной смеси на гипсовом вяжущем по ГОСТ Р 58279 (далее — гипсовая смесь). Основная задача экспериментальной части заключалась в получении сопоставимых выборок значений контролируемого показателя из двух различных зон смесителя, условно обозначенных в таблице 2 как А и Б.

Гипсовые штукатурные смеси относятся к числу широко применяемых сухих строительных материалов, наносимых механизированным или ручным способом. Эксплуатационные и технологические свойства смесей формируются за счет совместного действия нескольких групп компонентов, включая гипсовое вяжущее, минеральные наполнители, минеральные добавки, а также модифицирующие компоненты, вводимые в соотношении, достигающем 1:100 000.

Нормируемыми показателями качества штукатурных смесей являются показатели качества сухих смесей, растворов смесей, растворов. Фактические значения показателей качества должны соответствовать требованиям стандарта, приведенным в таблице 1.

Таблица 1

Требования к значениям показателей штукатурных смесей по ГОСТ Р 58 279

Наименование показателя	Предельное значение показателя
Сухих штукатурных смесей	
Влажность, % по массе, не более	0,5
Наибольшая крупность зерен заполнителя, мм	Фактическое значение должно соответствовать значению, регламентированному в ТД изготовителя
Растворных штукатурных смесей	
Подвижность по расплыву конуса, мм:	
– предназначенных для ручного нанесения	160±20
– предназначенных для механизированного нанесения	170±20
Водоудерживающая способность, %, не менее	95
Начало схватывания, мин, не менее:	
– предназначенных для ручного нанесения	30
– предназначенных для механизированного нанесения	60
Растворов штукатурных смесей	
Предел прочности на растяжение при изгибе в возрасте 7 сут, МПа, не менее	1,0*
Предел прочности при сжатии в возрасте 7 сут, МПа, не менее	2,0**
Прочность сцепления с основанием в возрасте 7 сут, МПа, не менее	0,3
Стойкость к образованию усадочных трещин	Устойчива

Примечание: *Предел прочности на растяжение при изгибе для штукатурных смесей, у которых фактическая средняя плотность раствора не более 800 кг/м³, составляет не менее 0,7 МПа.

**Предел прочности при сжатии для штукатурных смесей, у которых фактическая средняя плотность раствора не более 800 кг/м³, составляет не менее 1,5 МПа.

Одним из ключевых показателей качества гипсовой штукатурной смеси является водоудерживающая способность, в значительной степени определяющая поведение растворной смеси при затворении и нанесении. Поскольку штукатурные смеси являются материалом, который наносится тонким слоем, процесс потери воды из штукатурного слоя достаточно интенсивен. Быстрое высыхание штукатурного слоя может привести к ряду негативных последствий — снижению пластичности раствора до окончания штукатурных работ из-за поглощения воды основанием, образованию трещин, недостаточной гидратации вяжущего и, как следствие, недостаточной прочности затвердевшего раствора.

Ввиду важности данного показателя, а также с учетом малых дозировок водоудерживающих добавок (в зависимости от рецептуры от 0,01 % до 0,5 % от массы смеси) в рамках настоящего исследования пространственная неоднородность оценивалась по величине показателя водоудерживающей способности смеси.

Методическая схема исследования основана на статистическом анализе экспериментальных данных, полученных в ходе производственного контроля выбранной гипсовой смеси. Для оценки однородности смешения в течение 6 месяцев выполнялся отбор проб в двух фиксированных зонах смесителя (А и Б). Далее для отобранных проб определялась водоудерживающая способность в соответствии со стандартизированной методикой ГОСТ Р 58276. Таким образом, для каждого месяца были сформированы две независимые малые выборки n и m (число испытаний < 30), соответствующие двум исследуемым зонам смесителя.

Для обеспечения корректности статистической интерпретации сравнение проводилось между выборками, сформированными в пределах одного и того же месяца. Показатели качества сухих строительных смесей в условиях реального производства могут изменяться под влиянием различных факторов, включая колебания характеристик исходных материалов, особенности загрузки компонентов, изменения режимов работы оборудования и общую вариабельность технологического процесса. В связи с этим объединение данных за длительный период в одну совокупность могло бы затруднить интерпретацию результатов и не позволило бы корректно выделить именно пространственные различия между исследуемыми частями смесителя. Раздельный анализ по месяцам позволяет рассматривать каждую пару выборок как данные, относящиеся к сопоставимым производственным условиям.

Обозначим через n и m объемы малых независимых выборок для зон смесителя А и Б, соответственно, n и m . По ним определены соответствующие выборочные средние $\bar{x}$ и $\bar{y}$ и выборочные дисперсии s^2_x и s^2_y . Генеральные дисперсии, хотя и неизвестны, но предполагаются одинаковыми. Заданный уровень значимости $\alpha = 0,05$.

Нулевая гипотеза H_0 : $M(X) = M(Y)$ — средние значения показателя в двух частях смесителя одинаковы.

Альтернативная гипотеза H_1 : $M(X) \neq M(Y)$ — средние значения показателя в двух частях смесителя статистически значимо различаются. В том случае, если различие статистически значимое, разница между средними значениями в двух точках отбора настолько велика относительно разброса данных, что ее маловероятно объяснить случайностью.

Для проверки гипотезы необходимо вычислить наблюдаемое значение критерия:

$$T_{\text{набл}} = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{(n-1)s^2_x + (m-1)s^2_y}{n+m}}} \cdot \sqrt{\frac{nm(n+m-2)}{n+m}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{набл}}$ — наблюдаемое значение критерия; $\bar{x}$ — выборочное среднее для выборки из зоны А смесителя; $\bar{y}$ — выборочное среднее для выборки из зоны Б смесителя; n, m — объем малых независимых выборок из точек А и Б смесителя, соответственно; s^2_x, s^2_y — выборочные дисперсии для зон А и Б смесителя, соответственно.

Затем, по таблице критических точек распределения Стьюдента, по заданному уровню значимости α , и числу степеней свободы $k = n + m - 2$ найдена критическая точка $t_{\text{двуст.кр}}(\alpha; k)$. Если при проверке условия $|T_{\text{набл}}| > t_{\text{двуст.кр}}(\alpha; k)$, то нулевую гипотезу отвергают. Наблюдаемое значение критерия вычисляется для каждого месяца по формуле 1. Результаты вычислений приведены в таблице 2.

Таблица 2

Статистические показатели за исследуемый период

Месяц	Зона выборки	Объем выборки, n и m	Водоудерживающая способность, %		$T_{\text{набл}}$	Критическая точка $t_{\text{двуст.кр}}$
			Выборочные средние n и m	Выборочные дисперсии s^2_x, s^2_y		
Сентябрь	А	11	95,81	0,217	8,22	2,12
	Б	7	97,81	0,318		
Октябрь	А	13	95,98	0,431	3,86	2,09
	Б	8	97,26	0,737		
Ноябрь	А	15	95,57	0,538	6,31	2,07
	Б	9	97,48	0,477		
Декабрь	А	23	96,32	0,591	7,56	2,02
	Б	22	98,04	0,572		
Январь	А	5	96,02	0,257	5,56	2,26
	Б	6	98,03	0,439		
Февраль	А	27	95,79	0,473	11,31	2,01
	Б	28	97,79	0,391		

В результате статистической обработки экспериментальных данных установлено, что в каждом исследуемом месяце выборочные средние контролируемого показателя различаются значимо. Несмотря на то, что все полученные результаты испытаний соответствуют требованиям ГОСТ и не дают оснований для отклонения партии или прямых показаний к изменению технологии либо рецептуры, полученный результат может свидетельствовать о наличии неучтенных конструктивных или технологических недостатков в производственном процессе.

В случае, если статистически значимых различий по отдельным месяцам не выявлено, это означает, что в рассматриваемый период средние значения исследуемого показателя в двух частях смесителя не различались на статистически подтвержденном уровне. Подобный результат может рассматриваться как косвенное свидетельство удовлетворительной равномерности распределения смеси по исследуемому параметру. Вместе с тем следует отметить, что отсутствие статистически значимых различий не доказывает абсолютную однородность сравниваемых зон, а лишь показывает, что имеющиеся экспериментальные данные не позволили подтвердить наличие систематической разницы между ними.

Заключение. В работе рассмотрен подход к оценке пространственной однородности сухой штукатурной смеси на гипсовом вяжущем на основе статистической обработки результатов определения водоудерживающей способности проб, отобранных из различных частей смесителя. Обосновано использование водоудерживающей способности в качестве технологически значимого показателя, чувствительного к возможной неравномерности распределения компонентов. Показано, что однородность смеси не может быть однозначно оценена только по единичным результатам испытаний и требует применения методов количественного анализа.

Применение статистических методов позволяет повысить объективность оценки качества смешения, расширить возможности интерпретации экспериментальных данных и создать более надежную основу для совершенствования технологических режимов производства сухих строительных смесей.

Список литературы

1. Фадин Ю.М., Шеметова О.М. Сухие строительные смеси и смесительное оборудование для их производства. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2020;5(12):145–150. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-145-150>
2. Hadi A, Roelpl R, Pang Y, Schott DL. DEM Modelling of Segregation in Granular Materials: A Review. *KONA Powder and Particle Journal*. 2024;41:78–107. <https://doi.org/10.14356/kona.2024017>
3. Bridgwater J. Mixing of Powders and Granular Materials by Mechanical Means—A Perspective. *Particuology*. 2012;10:397–427. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.06.002>
4. Ottino JM, Khakhar DV. Mixing and Segregation of Granular Materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2000;32:55–91. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.55>
5. Таршиш М.Ю., Королев Л.В., Черпицкий С.Н., Капранова А.Б. Система контроля качества сыпучей смеси в барабанном устройстве непрерывного действия. Умные композиты в строительстве. *Тамбов*. 2020;1(1):56–64. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/VIN1_2020 (дата обращения: 01.04.2026).

Об авторах:

Елена Михайловна Гетьманова, магистрант кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), e_getmanova03@mail.ru

Шляхова Елена Альбертовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), shlyahovae@list.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Elena M. Getmanova, Master's Degree Student of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), e_getmanova03@mail.ru

Elena A. Shlyakhova, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), shlyahovae@list.ru

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.