

УДК 691.555
EDN SZWUVZ[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2\(633\)-79-88](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2(633)-79-88)А.Н. ГУДКОВ¹¹АО «Тулаоргтехстрой», проспект Ленина, д. 108,
г. Тула, 300026, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ «ПРОЧНОСТЬ–ПЛОТНОСТЬ» ЛЕГКОЙ ШТУКАТУРКИ НА ПЕНОКЕРАМИЧЕСКИХ ГРАНУЛАХ «СПАДАР»

Аннотация

Введение. Общеизвестен тот факт, что чем выше плотность легкого бетона (раствора) в затвердевшем состоянии, тем выше его прочность. Так, согласно [1] при средней плотности бетона 700–1100 кг/м³ (D700–1100) прочность легкого бетона варьируется в диапазоне классов В3,5–В7,5, а при плотности 1200–1400 кг/м³ (D1200–1400) прочность соответствует классам от В3,5 до В25. Легкие минеральные штукатурки в общем виде можно отнести к легким мелкозернистым бетонам и следовательно они должны подчиняться тем же зависимостям – прочность–плотность, что и легкие бетоны (чем выше плотность, тем больше прочность штукатурного раствора). В данной работе было проведено исследование легкой штукатурки на основе белого портландцемента и минерального заполнителя – пенокерамических гранул «СПАДАР» на предмет влияния на прочность штукатурного раствора его плотности и расхода основных составляющих (цемента, пенокерамического заполнителя «СПАДАР», воды).

Цель. Изучить зависимость прочности на осевое сжатие легкой минеральной штукатурки на основе белого портландцемента и пенокерамических гранул «СПАДАР» от её плотности и расхода составляющих (цемента, пенокерамического заполнителя «СПАДАР», воды). Диапазон плотностей для определения прочностных показателей штукатурки был выбран следующих марок: D400, D500, D600, D700, D800.

Материалы и методы. Для проведения исследований были использованы образцы-кубы 7 x 7 x 7 см, изготовленные из легкой штукатурной смеси «СПАДАР» с плотностями в сухом состоянии 400, 500, 600, 700, 800 кг/м³ и твердевшие в нормальных условиях 28 суток. Плотность сухой штукатурки определялась по ГОСТ 5802–2024 «Растворы строительные. Методы испытаний». Прочность при сжатии штукатурного раствора определялась по ГОСТ 5802–2024 [3] на образцах-кубах 7 x 7 x 7 см. Зависимость прочности раствора от расхода его составляющих определялась математико-статистическим методом.

Результаты. В процессе работы экспериментально установлена зависимость прочности на осевое сжатие от плотности штукатурного раствора. При увеличении плотности раствора растет и его прочность. Математико-статистическим методом вычислена зависимость прочности раствора от расхода цемента и воды и плотности раствора. Так установлено, что при увеличении расхода цемента с 185 до 435 кг на 1 м³ растворной смеси, растет прочность раствора с 1,5 до 8,5 МПа.

При этом плотность раствора повышается с 400 до 800 кг/м³. Это справедливо при расходе пенокерамических гранул в диапазоне 0,7–0,85 м³/м³ раствора.

Выводы. На основе экспериментальных данных и математико-статистического расчета установлено, что при повышении плотности штукатурной смеси с 400 до 800 кг/м³ экспоненциально растет прочность исследуемого раствора на осевое сжатие с 1,5 МПа до 8,5 МПа, при этом происходит увеличение расхода вяжущего и воды. Расход пенокерамических гранул «СПАДАР» в диапазоне 0,7–0,85 м³/м³ раствора не оказывает существенного влияния на изменение прочностных показателей тестируемых составов. Данное исследование нашло дальнейшее практическое применение при разработке состава легкой штукатурки «СПАДАР СК 750» с повышенной плотностью и прочностью.

Ключевые слова: легкая минеральная штукатурка, пенокерамические гранулы, плотность, прочность, расход цемента функциональные добавки

Для цитирования: Гудков А.Н. Исследование зависимости «прочность–плотность» легкой штукатурки на пенокерамических гранулах «СПАДАР» // *Бетон и железобетон.* 2026. № 2 (633). С. 79–88. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2\(633\)-79-88](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2(633)-79-88). EDN SZWUVZ

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.12.2025

Поступила после рецензирования 28.01.2026

Принята к публикации 06.02.2026

A.N. GUDKOV¹

¹JSC Tulaorgtekhstroy, Lenin Avenue, 108, Tula, 300026, Russia

INVESTIGATION OF THE STRENGTH-DENSITY RELATIONSHIP OF LIGHT PLASTER ON "SPADAR" FOAM GRANULES

Abstract

Introduction. It is a well-known fact that the higher the density of lightweight concrete (mortar) in the solidified state, the higher its strength. Thus, according to [1], at an average concrete density of 700–1100 kg/m³ (D700–1100), the strength of light concrete varies in the range of classes B3.5–B7.5, and at a density of 1200–1400 kg/m³ (D1200–1400), the strength corresponds to classes B3.5 to B25. Light mineral plasters in general can be attributed to light fine-grained concretes and, therefore, they must obey the same strength-density relationships, component consumption as light concretes (the higher the density, the greater the strength of the plaster solution). In this work, a study was conducted of light plaster based on white Portland cement and a mineral filler – foam ceramic granules "SPADAR", for the effect on the strength of the plaster solution of its density and consumption of the main components (cement, foam ceramic filler "SPADAR", water).

Aim. To study the dependence of the axial compressive strength of light mineral plaster based on white Portland cement and foam-ceramic granules "SPADAR" on its density and consumption of components (cement, foam-ceramic filler "SPADAR", water). The range of densities for determining the strength parameters of plaster was selected by the following brands: D400, D500, D600, D700, D800.

Materials and methods. For the research, samples were used 7 x 7 x 7 cm cubes made of a light plaster mixture "SPADAR" with dry densities of 400, 500, 600, 700, 800 kg/m³ and hardened under normal conditions for 28 days. The density of dry plaster was determined by State Standard 5802–2024 "Construction solutions. Test methods". The compressive strength of the plaster mortar was determined according to State Standard 5802–2024 [3] on 7 x 7 x 7 cm cube samples. The dependence of the strength of the solution on the consumption of its

components was determined by the mathematical and statistical method.

Results. During the work, the dependence of the axial compressive strength on the density of the plaster mortar was experimentally established. As the density of the solution increases, so does its strength. The dependence of the strength of the solution on the consumption of cement and water and the density of the solution is calculated using a mathematical and statistical method. Thus, it was found that with an increase in cement consumption from 185 to 435 kg per 1 m³ of mortar mixture, the strength of the solution increases from 1.5 to 8.5 MPa. At the same time, the density of the solution increases from 400 to 800 kg/m³. This is true for the consumption of foam granules in the range of 0.7–0.85 m³/m³ of solution.

Conclusions. Based on experimental data and mathematical and statistical calculations, it was found that with an increase in the density of the plaster mixture from 400 to 800 kg/m³, the strength of the studied solution for axial compression increases exponentially from 1.5 MPa to 8.5 MPa, while the consumption of binder and water increases. The consumption of SPADAR foam granules in the range of 0.7–0.85 m³/m³ of solution does not significantly affect the change in the strength parameters of the tested compounds. This study has found further practical application in the development of the composition of light plaster "SPADAR SK 750" with increased density and durability.

Keywords: light mineral plaster, foam ceramic granules, density, strength, cement consumption, functional additives

For citation: Gudkov A.N. Investigation of the strength-density relationship of light plaster on "SPADAR" foam granules. *Concrete and Reinforced Concrete*, 2026, no. 2 (633), pp. 79–88. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2\(633\)-79-88](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-2(633)-79-88). EDN SZWUVZ

Author contribution statement

The author assumes responsibility for all aspects of the work on the article. Financing the study had no sponsorship.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Received 11.12.2025

Revised 28.01.2026

Accepted 06.02.2026

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Печатное и сетевое рецензируемое научно-техническое издание, в котором публикуются результаты теоретических и экспериментальных исследований по строительным материалам, конструкциям, сооружениям, основаниям и фундаментам при статических и динамических воздействиях.

«Вестник НИЦ «Строительство» (Print) включен в Перечень ВАК с 03.10.2019 г. по научным специальностям:

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);

2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);

2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки).

Журнал издается на платформе Elpub Национального консорциума российских библиотек (НЭИКОН). Журнал индексируется в академических базах данных и информационных системах: ROAD, CrossRef, Академия Google. Входит в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) на платформе eLIBRARY.ru.

Тираж печатного издания – 500 экземпляров.

Подробная информация на сайте vestnik.cstroy.ru

Подписной индекс ООО «Урал Пресс» – 36569.



***Приглашаем к сотрудничеству ученых,
аспирантов, исследователей!***

Адрес редакции: г. Москва, 2-я Институтская ул., дом 6, корпус 1, кабинет 400/2

Тел. редакции: +7(495)602-00-70 доб. 1022, 1023

Выпускающий редактор – Починина Наталья

e-mail: pochininane@cstroy.ru

Согласно ГОСТ 33083–2014, таблица 2 [2] легкий штукатурный раствор должен иметь плотность менее 1300 кг/м³, а теплоизоляционный – менее 500 кг/м³.

В данной работе изучалась зависимость прочности от плотности штукатурного раствора в диапазоне от 400 до 800 кг/м³.

Для сравнительного исследования были изначально изготовлены

5 составов легкой штукатурной смеси на пенокерамических гранулах «СПАДАР», фракции 0–2,5 мм

и насыпной плотности 240 кг/м³. В качестве вяжущего вещества применялся белый портландцемент М500 (Турция). Для регулирования технологических свойств растворной смеси и готового раствора использовался комплекс функциональных добавок, включающий в себя: пластификатор-водопонизитель; загустители-водоудерживающие агенты; гидрофобизаторы, редуцируемый полимерный порошок (винилацетат-акрилат).

Расход материалов для тестируемых составов штукатурной смеси представлен в таблице 1.

Таблица 1

Расход материалов в тестируемых составах легкой штукатурки

Table 1

The consumption of materials in the tested compositions of light plaster

Номер состава	Средняя плотность р-ра в сухом состоянии, кг/м³	расход материалов, кг				Плотность растворной смеси, кг/м³	В/Ц
		Белый цемент	Пенокерамическая гранула	Комплекс функциональных добавок	вода		
1	400	195	195 (0,8 м³)	5	155	550	0,79
2	500	200	195 (0,8 м³)	5	250	650	1,25
3	600	262	198 (0,82 м³)	5	285	750	1,08
4	700	325	200 (0,83 м³)	5	320	850	0,98
5	800	435	165(0,69 м³)	5	345	950	0,79

Пояснения к таблице 1. В составах 1–4 средний расход легкого пенокерамического заполнителя «СПАДАР» составил от 0,8 до 0,83 м³/м³ раствора, а регулирование плотности раствора осуществлялось увеличением расхода цемента и воды. В представленных в таблице 1 составах постепенно увеличивался расход цемента с 195 до 435 кг/м³ растворной смеси. При этом соотношение цемент: гранулы по массе увеличивалось с 1:1 (состав 1) до 2,64:1 (состав 5). Состав 5 при этом имеет наибольшую плотность раствора (таблица 1) и наименьший расход гранул, равный 165 кг или 0,69 м³ на 1 м³ раствора. Расход функциональных добавок одинаков во всех составах (5кг/м³ раствора). Водоцементное отношение колеблется в пределах 0,79–1,25 (таблица 1).

Методика проведения эксперимента

Для исследования плотности и прочности составов, представленных в таблице 1, были изготовлены 5 серий образцов-кубов 7 x 7 x 7 см по 6 штук в серии (рис. 1).

Образцы твердели 28 суток в нормальных условиях, после чего часть образцов, в количестве 3 штук испытывалась на осевое сжатие по ГОСТ 5802–2024, а часть образцов высушивалась до постоянной массы, после чего определялась средняя плотность раствора в сухом состоянии по ГОСТ 5802–2024.

Средства измерений. Весы электронные SK-2000D, зав. № 431205885. Свидетельство о поверке № С-ВЮ/10–01–2025/401672374 от 10.01.2025 г.

Испытательное оборудование. Гидравлический пресс ИП-1000, зав. № 675. Свидетельство о поверке № С-ВЮ/10–01–2025/401672374 от 10.01.2025 г.

Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Анализ полученных результатов. Как видно из таблицы 2 и графика на рис. 2 прочность раствора с увеличением его плотности растет по экспоненте (красная линия тренда на рис. 2), что согласуется с ранее высказанным предположением о прямой зависимости прочности легкой штукатурки от ее плотности.

В общем случае данную зависимость можно выразить в виде функции

$$y=f(x)=a^x,$$

где а – основание степени, х – показатель степени.

Так (рис. 2) у состава 1 при плотности 400 кг/м³ средняя прочность соответствует

1,5 МПа, у состава 2 при плотности 500 кг/м³ средняя прочность равна 2,0 МПа, состав 3 при средней плотности в 600 кг/м³ имеет прочность 4,0 МПа. Состав 5 при плотности в 800кг/м³ имеет уже прочность в 8,5 МПа. Полученные результаты коррелируются со значениями плотности и прочности для штукатурных смесей по ГОСТ 33083–2014, таблицы 1 и 2 [2], что подтверждает достоверность полученных при испытаниях результатов.

Полученный график зависимости прочность–плотность легкой штукатурной смеси на пенокерамических гранулах «СПАДАР» (рис. 2) возможно использовать для предварительной оценки прогнозируемой прочности штукатурки в зависимости от ее фактической плотности при проектировании составов штукатурных смесей на пенокерамических гранулах «СПАДАР».



Рис. 1. Фото изготовления образцов тестируемых составов легкой штукатурки
 Fig. 1. Photos of the production of samples of tested light plaster compositions

Таблица 2

Значения средней плотности и прочности на осевое сжатие исследуемых штукатурных составов 1–5
 Table 2
 The values of the average density and axial compressive strength of the studied plaster compositions are 1–5

Номер состава	Средняя плотность в сухом состоянии штукатурки, ρ , кг/м ³	Средняя прочность на осевое сжатие штукатурки, γ , МПа
1	400	1,5
2	500	2,0
3	600	4,0
4	700	5,0
5	800	8,5

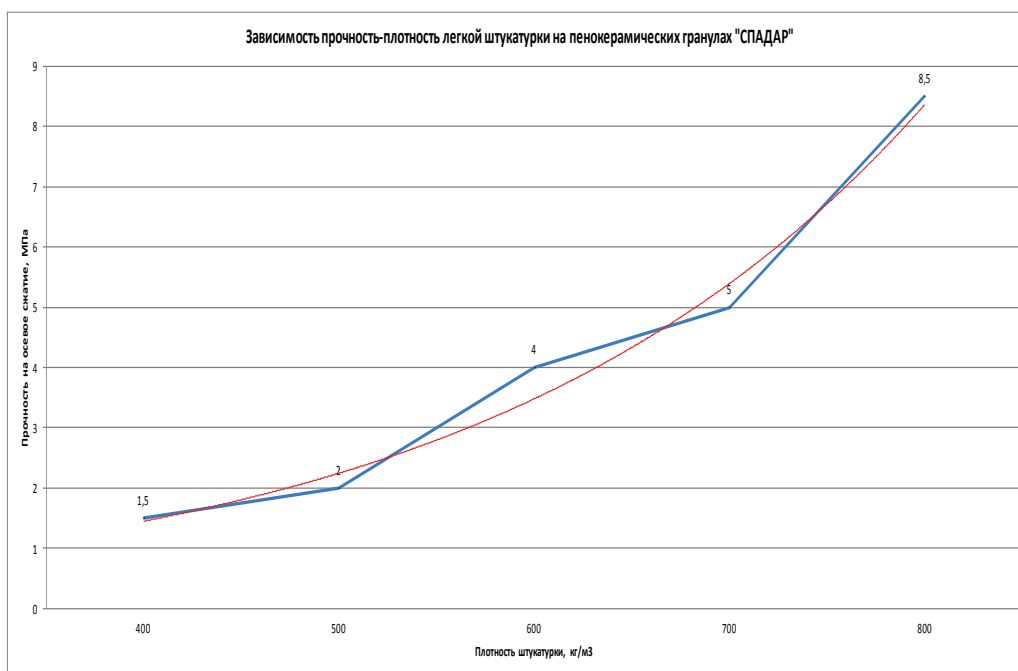


Рис. 2. График зависимости «прочность-плотность» легкой штукатурки на пенокерамических гранулах «СПАДАР»
 Fig. 2. Graph of the strength-density relationship of light plaster on SPADAR foam granules

Математическое моделирование зависимости прочности легкой штукатурки на пенокерамических гранулах «СПАДАР» от расхода составляющих и плотности с применением математико-статистических методов

Сущность планирования экспериментов и выбора состава многокомпонентной штукатурки с применением математико-статистических методов заключается в установлении математической зависимости между заданными свойствами композиции, расходом и свойствами составляющих материалов. Получаемая математическая зависимость используется для назначения и поиска оптимальных составов.

Далее в этой работе произведено математическое моделирование зависимости прочности легкой штукатурной смеси на пенокерамических гранулах «СПАДАР» на базе разработанных составов (таблица 1) от расхода составляющих и исходя из полученных экспериментально данных (таблица 2 и рис. 2).

Планирование экспериментов позволяет, используя минимальное число опытов, выбрать имен-

но те условия, которые оптимизируют выходные параметры.

С целью получения достоверных результатов на каждом этапе исследований необходимо проводить анализ нескольких образцов, полученных при идентичных условиях.

Поскольку ставится задача определения прочностных характеристик в сравнительно узком диапазоне изменения переменных, применяем для реализации линейный план для $k=3$.

Исходя из условий, что количество переменных факторов равно 3 (расход цемента, расход воды, расход пенокерамических гранул) и варьирование их происходит на двух уровнях, был реализован линейный план первого порядка.

Построение математических зависимостей производится на основе лабораторных экспериментов с последующим их уточнением в производственных условиях.

Значения интервалов варьирования переменных факторов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения интервалов варьирования переменных факторов

Table 3

Values of the variation intervals of the variables

Код	Значение кода	Значение факторов		
		X_1	X_2	X_3
Основной уровень	0	315	250	0,8
Интервал варьирования	ΔX_i	50	50	0,05
Верхний уровень	+	435	350	0,85
Нижний уровень	-	185	150	0,7

Здесь: X_1 – расход белого цемента (185–435) кг/м³
 X_2 – расход воды (150–350) л/ м³
 X_3 – расход пенокерамики (0,7–0,85) м³/м³

План проведения эксперимента представлен в таблице 4.

Для упрощения записей и последующих расчетов верхний уровень факторов обозначим (+), средний (0), нижний (-), что равносильно переводу факторов в кодовый масштаб.

Для расчета значения i -го фактора в кодовом масштабе используем уравнение (1):

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i} \quad (1),$$

где X_i – значение i -го фактора в натуральном масштабе;
 X_{i0} – основной уровень 1-го фактора;
 ΔX_i – интервал варьирования 1-го фактора.

Результаты исследования обрабатываем с использованием методов математической статистики, получая при этом алгебраическое уравнение (2), отображающее связь между прочностью легкой штукатурки и расходами составляющих

$$y_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения при использовании планов 1-го порядка вычисляются по формулам (3), (4), (5).

$$b_0 = \frac{\sum_1^{N_i} y_u}{N_i} \quad (3)$$

$$b_i = \frac{\sum_1^{N_i} x_{iu} y_u}{N_i} \quad (4)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_1^{N_i} x_{iu} x_{ju} y_u}{N_i} \quad (5)$$

где y_u – значение исследуемого свойства композиции в u -том опыте; x_{iu} – значение i -го фактора в u -том опыте; x_{ju} – значение j -го фактора в u -том опыте (ij); N_i – число опытов в плане, за исключением опытов в нулевых точках ($N_i = 8$).

Записываем вычисленные коэффициенты в таблицу 5.

Таблица 4

План проведения эксперимента

Table 4

The plan of the experiment

№ опыта	План эксперимента			Натуральные значения переменных на 1м ³			Натурные значения постоянных величин на 1,0 м ³	Плотность штукатурной смеси, кг/м ³	Прочность штукатурной смеси, МПа	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃				
				расход цемента, кг	расход воды, кг	расход пенокерамики, м ³	функциональные добавки, кг			
N _i	1	+	+	+	435	350	0,85	5,0	800	8,5
	2	-	+	+	195	350	0,85	5,0	600	4,0
	3	+	-	+	435	155	0,85	5,0	700	6,0
	4	-	-	+	195	155	0,85	5,0	400	2,5
	5	+	+	-	435	350	0,70	5,0	800	8,5
	6	-	+	-	195	350	0,70	5,0	570	3,8
	7	+	-	-	435	155	0,70	5,0	615	4,2
	8	-	-	-	195	155	0,70	5,0	375	2,5
n ₀	9	0	0	0	265	285	0,80	5,0	595	3,8
	10	0	0	+	265	285	0,85	5,0	605	4,1
	11	0	0	-	265	285	0,70	5,0	575	3,7
	12	0	+	0	265	350	0,80	5,0	650	5,0
	13	0	-	0	265	155	0,80	5,0	465	1,5
	14	+	0	0	435	285	0,80	5,0	765	9,5
	15	-	0	0	195	285	0,80	5,0	525	2,0

Таблица 5

Коэффициенты уравнения регрессии

Table 5

Coefficients of the regression equation

Параметр	Коэффициенты уравнений						
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃
Прочность, F _{сж} , МПа	5,0	4,0	2,4	2,12	2,26	-1,28	-1,8

Производим проверку отличия коэффициентов b_i от нуля и пригодности уравнения для описания исследуемой зависимости (проверка адекватности).

По результатам опытов в нулевых (или основных) точках определяем:

а) среднее арифметическое значение (6):

$$y_0 = \frac{\sum_1^{n_0} y_{0u}}{n_0} \quad (6)$$

где y_{0u} – значение исследуемого свойства композиции в нулевой точке;

n_0 – число опытов в нулевой точке.

б) дисперсию в нулевой точке (7):

$$S_y^2 = S_0^2 = \frac{\sum_1^{n_0} (y_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1} \quad (7)$$

в) среднее квадратическое отклонение, характеризующее ошибку опыта (8):

$$S_y = S_0 = \sqrt{S_0^2} = \frac{\sum_1^{n_0} (y_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1} \quad (8)$$

г) среднюю квадратическую ошибку в определении коэффициентов (9):

$$S\{b_i\} = \frac{S_y}{\sqrt{N_1}} \quad (9)$$

Результаты расчета параметров для проведения статистической проверки прочности заносим в таблицу 6.

Таблица 6

Результаты расчета параметров для проведения статистической проверки прочности

Table 6

The results of the calculation of the parameters for the statistical strength checks

Параметр	y_0	S_y	S_y	$S\{b_i\}$
Рсж, МПа	4,22	6,88	2,62	0,92

Далее определяем расчетное значение t_p – критерия Стьюдента – по формуле (10):

$$t_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}} \quad (10)$$

и сравниваем полученное значение t_p с табличным t_r при числе степеней свободы $f_y = 6$ с которым определялась S_y ; $f_y = n_0 - 1$ таблица 4.2.

Если $t_p < t_r$, то при обычно назначаемом уровне значимости $\alpha = 0,05$ коэффициент считают равным нулю, а соответствующий ему член уравнения отбрасывают.

Определяем расчетное значение t_p и устанавливаем значимость коэффициентов для определения прочности на осевое сжатие штукатурки в проектном возрасте Рсж 28.

Проверку производим, начиная с самого малого коэффициента с учетом формулы (10). При числе степеней свободы $f_y = 6$, $t_r = 2,45$, согласно таблице для определения критерия Стьюдента.

$t_p(b13) = 1,39$; $t_p(b13) < t_r$ – коэффициент не значим;

$t_p(b0) = 5,43$; $t_p(b0) > t_r$ – коэффициент значим;

$t_p(b1) = 4,35$; $t_p(b1) < t_r$ – коэффициент значим;

$t_p(b2) = 2,60$; $t_p(b2) < t_r$ – коэффициент значим;

$t_p(b3) = 2,3$; $t_p(b3) > t_r$ – коэффициент не значим;

$t_p(b12) = 2,46$; $t_p(b12) < t_r$ – коэффициент значим;

$t_p(b23) = 1,96$; $t_p(b23) < t_r$ – коэффициент не значим.

После определения коэффициентов уравнение регрессии имеет вид:

$$y = R_{сж} = 5,0 + 4,0 \times 1 + 2,4 \times 2 + 2,26 \times 1 \times 2$$

Производим проверку пригодности уточненного уравнения. Для вычисления дисперсии адекватности (или остаточной дисперсии).

Для облегчения расчетов строим вспомогательную таблицу 7.

Определяем дисперсию адекватности с помощью формулы (11).

$$S^2_{ад} = \frac{\sum_1^N (y_u - y_u^{\wedge})^2}{N - m} = 20,59 \quad (11)$$

где y_u – значение растекаемости б.с. в u -м опыте; y_u^{\wedge} – значение исследуемого свойства бетона в u -м опыте, вычисляемое по уточненному уравнению; m – число значимых коэффициентов = 4, включающих b_0 .

Определяем расчетное значение F_p – критерия Фишера по формуле (12)

$$F_p = S^2_{ад} / S^2_y = 20,59 / 6,88 = 2,99 \quad (12)$$

Сравниваем F_p с $F = 4,5$ для степеней свободы, с которыми определялись $S^2_{ад}$ (4) и S^2_y , т. е. $f_y = 6$.

$F_p = 2,99 < F = 4,5$ – следовательно уравнение прочности легкой штукатурки пригодно для описания зависимости в исследованных пределах изменения факторов.

Анализ полученных результатов

На основании полученных данных уравнение регрессии имеет вид

$$y = R_{сж} = 5,0 + 4,0 \times 1 + 2,4 \times 2 + 2,26 \times 1 \times 2,$$

т.е. определяющими факторами в повышении прочности легкой штукатурной смеси являются расход цемента (x_1) и расход воды (x_2). С увеличением расхода цемента при заданном водоцементном отношении растет и расход воды, кроме этого повышается плотность штукатурки.

Зависимость прочности легкой штукатурки от ее плотности, описанная полученной формулой регрессии, представлена на рис. 3.

Расчетный метод подтвердил экспериментальные данные экспоненциальной зависимости прочности легкой штукатурки от ее плотности.

Таблица 7

Вспомогательная таблица для вычисления дисперсии адекватности

Table 7

Auxiliary table for calculating the adequacy variance

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	\hat{y}	\bar{y}_3	$ \Delta $	$ \Delta ^2$
1	5,0	+	+	+	13,66	8,5	5,16	26,6
		4,0	2,4	2,26				
2	5,0	-	+	-	1,14	4,0	2,86	8,18
		-4,0	2,4	-2,26				
3	5,0	+	-	-	8,86	6,0	2,86	8,18
		4,0	-2,4	2,26				
№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_2x_3	\hat{y}	\bar{y}_3	$ \Delta $	$ \Delta ^2$
4	5,0	-	-	+	0,86	2,5	1,74	3,03
		-4,0	-2,4	2,26				
5	5,0	+	+	+	13,66	8,5	5,16	26,6
		4,0	2,4	2,26				
6	5,0	-	+	-	1,14	3,8	2,66	7,08
		-4,0	2,4	-2,26				
7	5,0	+	-	-	4,34	4,2	0,14	0,02
		4,0	-2,4	-2,26				
8	5,0	-	-	+	0,86	2,5	1,64	2,69
		-4,0	-2,4	2,26				
b_t	5,0				-	-	-	82,38



Рис. 3. График зависимости «прочность–плотность» легкой штукатурки на пенокерамических гранулах «СПАДАР», описанная формулой регрессии
 Fig. 3. The graph of the strength-density relationship of light plaster on SPADAR foam granules, described by the regression formula

Выводы

На основании данных проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В ходе проведенной работы экспериментально-расчетными методами была установлена зависимость прочности легкой штукатурки от ее плотности.

Прочность легкой штукатурки на пеночероамических гранулах «СПАДАР» имеет экспоненциальную зависимость от ее плотности, т.е. чем выше плотность штукатурки, тем более ее прочность. Данная зависимость отображена на рис. 2 и рис. 3.

2. Определяющими факторами в повышении прочности легкой штукатурной смеси являются расход цемента (x_1) и расход воды (x_2). Это описано уравнением регрессии $y = R_{сж} = 5,0 + 4,0 \times x_1 + 2,4 \times x_2 + 2,26 \times x_1 \times x_2$.

3. Полученные экспериментально-расчетные данные легли в основу проектирования состава легкой штукатурной смеси повышенной прочности «СПАДАР СК 750».

Благодарности

Автор выражает благодарность компании ООО «СПАДАР» за предоставленные для проведения данной работы образцы пеночероамических гранул «СПАДАР» и белого цемента для проведения экспериментальной работы.

Список литературы

1. Рекомендации по подбору составов легких бетонов (к ГОСТ 27006–86) Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР. 1986. 96 с.
2. ГОСТ 33083–2014. Смеси сухие строительные на цементном вяжущем для штукатурных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
3. ГОСТ 5802–2024. Растворы строительные. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ, 2025.
4. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976. 390 с.
5. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии. Киев.: Высшая школа, 1976. 181 с.
6. СП 82–101–98. Приготовление и применение растворов строительных. Москва: Госстрой России, 1999.
7. Баженов Ю.М. Технология бетона. Москва: Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
8. Баженов Ю.М., Коровяков В.Ф., Денисов Г.А. Технология сухих строительных смесей. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2011. 112 с.

9. Корнеев В.И., Зозуля П.В., Медведева И.Н., Богоявленская Г.А., Нуждина Н.И. Рецептурный справочник по сухим строительным смесям. Санкт-Петербург: РИА «Квинтет», 2010. 318 с.
10. Корнеев В.И., Зозуля П.В. Сухие строительные смеси. Состав, свойства: учебное пособие. Москва: РИФ «Стройматериалы», 2010. 320 с.

References

1. Recommendations on the selection of lightweight concrete compositions (to State Standard 27006–86). Gosstroy of the USSR. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR. 1986. 96 p.
2. State Standard 33083–2014. Dry building plaster cement binder mixes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ., 2019. (In Russian).
3. State Standard 5802–2024. Mortars. Test methods. Moscow: Standartinform Publ., 2025. (In Russian).
4. Zedginidze, I.G. Experimental planning for the study of multicomponent systems, Moscow: Nauka Publ., 1976, 390 p.
5. Bondar A.G., Statyukha G.A. Planning an experiment in chemical technology. Kiev: Vysshaya shkola, 1976. 181 p.
6. SP 82–101–98. Manufacturing and usage of solutions in construction industry. Moscow: Gosstroy of Russia, 1999. (In Russian).
7. Bazhenov Yu.M. Technology of concrete. Moscow: ASV Publ., 2002. 500 p. (In Russian).
8. Bazhenov Yu.M., Korovyakov V.F., Denisov G.A. Technology of dry building mixes. Moscow: ASV Publ., 2011. 112 p. (In Russian).
9. Korneev V.I., Zozulya P.V., Medvedeva I.N., Bogoyavlenskaya G.A., Nuzhdina N.I. Compounding guide to dry building mixes. St. Petersburg: RIA "Quintet", 2010. 318 p. (In Russian).
10. Korneev V.I., Zozulya P.V. Dry building mixes. Composition, properties: Textbook. Moscow: RIF «Stroymaterialy», 2010. 320 p. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Алексей Николаевич Гудков, руководитель лаборатории строительных материалов и технологий проектно-технологического центра, АО «Тулаоргтехстрой», Тула
e-mail: alekseygudkov2016@yandex.ru

Alexey N. Gudkov, Head of the Laboratory of Building Materials and Technologies of the Design and Technology Center, JSC Tulaorgtekhstroy, Tula
e-mail: alekseygudkov2016@yandex.ru