



УДК: 69.059.2

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.10

EDN: IEDEGY

Экспериментальная оценка и моделирование параметров строительных процессов с учетом использования средств защиты

Руденко А.А.¹

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Отсутствие достаточного количества статистических и экспериментальных данных по реализации производственных процессов, выполняемых в средствах индивидуальной защиты, не позволяет эффективно планировать и нормировать строительно-монтажные работы.

Цель исследования – выявить в ходе экспериментальных исследований численные зависимости эффективности труда от факторов производственной среды и параметров строительных процессов.

Задачи исследования: ранжирование наиболее значимых факторов влияющих на производительность работ с учетом температуры производственной среды, продолжительности, вида работ и применения средств индивидуальной защиты; регрессионный анализ и разработка математической модели, учитывающий влияния значимых факторов на эффективность процессов.

На основании проведенных исследований установлено, что основными факторами, влияющими на результирующий показатель Y (производительность труда) являются продолжительность выполнения работ, варианты использования средств индивидуальной защиты работников, вид выполняемых работ, температурные условия производственной среды.

Выводы. 1. Наиболее существенное снижение производительности труда наблюдалось при использовании полного комплекта средств индивидуальной защиты рабочих. 2. Наиболее оптимальный температурный режим производственной среды 13-19 °С, а временной интервал 90-120 мин работы.

Ключевые слова: производительность, эксперимент, эксперты, регрессионная модель, средства защиты

Для цитирования: Руденко А.А. Экспериментальная оценка и моделирование параметров строительных процессов с учетом использования средств индивидуальной защиты // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 153-167, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.10, EDN: IEDEGY

Experimental evaluation and modeling of construction process parameters taking into account the use of protective equipment

Rudenko A.A.¹

¹Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The lack of a sufficient amount of statistical and experimental data on the implementation of production processes carried out using personal protective equipment does not allow for effective planning and standardization of construction and installation work.

The aim of the study is to identify, through experimental research, numerical dependencies between labor efficiency and factors of the production environment and parameters of construction processes.

The objectives of the study are: to rank the most significant factors influencing work productivity, taking into account the temperature of the production environment, the duration, the type of work, and the use of personal protective equipment; to conduct regression analysis and develop a mathematical model that takes into account the influence of significant factors on the process efficiency.

Based on the conducted studies, it has been established that the main factors influencing the resulting indicator Y (work productivity) are the duration of work, the options for using personal protective equipment for workers, the type of work performed, and the temperature conditions of the production environment.

Conclusions. 1. The most significant decline in labor productivity was observed when using a full set of workers' personal protective equipment. 2. The most optimal temperature range for the work environment is 13–19 °C, and the time interval is 90–120 minutes of work.

Keywords: productivity, experiment, experts, regression model, protective equipment

For citation: Rudenko A.A. Experimental evaluation and modeling of construction process parameters taking into account the use of protective equipment//News of KSUAE, 2026, № 2 (76), p. 153-167, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.10, EDN: IEDEGY

1. Введение

Вопросы технического и тарифного нормирования производственных процессов в строительстве проработаны и исследованы достаточно подробно. Однако нормативное регулирование строительных работ, реализуемых в средствах индивидуальной защиты (СИЗ) практически отсутствует. Это связано с тем обстоятельством, что стандартно строительно-монтажные работы (СМР) выполняются при отсутствии загрязнения рабочей среды, то есть без СИЗ. Считается [1, 11, 19], что работы в СИЗ, в основном выполняются при аварийных работах в процессе ликвидации чрезвычайных ситуаций, что не является единственным условием их применения. При повреждении объектов жизнеобеспечения, опасных производственных, критически важных, их восстановление необходимо даже при загрязнении территории выше допустимых значений, то есть в СИЗ.

Вопросы безопасных условий труда рассматриваются авторами, в том числе и в [1], однако в данном исследовании оценивается безопасность труда при производстве земляных и штукатурных работ, а кроме того, за счет реализации коллективной защиты, в виде мероприятий пылеудаления. То есть очистки общей производственной среды, а не индивидуально для каждого рабочего в виде применения СИЗ. При этом недостаточно проработаны вопросы эффективности и надежности работ. Профессор Гусаков А.А., являющийся одним из основоположников теории надежности СМР [2] подробно исследовал эти вопросы, однако нормирование и надежность работ, выполняемых в СИЗ, им не рассматривались. Решением этой проблемы должны быть результаты экспертной оценки факторов, влияющих на эффективность выполнения строительно-монтажных работ (СМР) [3,4]. Это позволит в последующем экспериментально и статистически исследовать степень влияния факторов на результирующий показатель. [5,6]

Учеными исследовались факторы СМР [7], однако объектом исследования были процессы капитального ремонта, реализуемые без средств защиты. Вопросы и последствия несоблюдения требований по использованию СИЗ в процессе строительства, в том числе оценкой последствий и факторов, рассматривались в работе [8]. Однако эффективности и производительности труда при этом не учитывались.

Олейник П. П. детально рассматривал [9] закономерности и тенденции реализации организационных моделей строительного производства, но при их реализации в обычных условиях производственной среды. Были исследования в том числе процессы восстановления поврежденных объектов [10, 11] после взрывного воздействия. Однако возможность выполнения СМР в СИЗ в работах рассматривалась

лишь гипотетически, как исключительный вариант, без количественной оценки и анализа указанного.

При этом, вопросы расчета и оценки повреждения наземных и подземных объектов, степени их повреждения исследовались [11], но без проработки вопросов восстановления или ремонта объектов в СИЗ. Указанное доказывает необходимость нормирования основных, базовых видов СМР, что в последующем может быть реализовано за счет инструментария математического моделирования позволит сформировать основные нормативы по базовым видам СМР. [12]

Специалисты предлагали варианты ремонтазданий после их технического обследования.[13] Так, например, специалисты исследующие проблемы эффективности ремонтно-восстановительных работ [14] отмечали, что повреждения объектов капитального строительства в условиях чрезвычайных ситуаций требуют применения специальных методов технического обследования объектов, специальных видов СМР и учета специфики повреждений.

При этом, как отмечают специалисты [15,16,17] реализуемые в настоящее время способы восстановления и алгоритмы оценки и восстановления не учитывают локальный резко-динамической характер приложения нагрузки, а также остаточный характер последствий взрыва.

Завьялов И.В. в своей работе [17], рассматривал процесс ремонта разрушающихся объектов, но при этом процесс повреждения зданий был распределен во времени, а сам характер восстановления часто был связан только с восстановлением отделочных и декоративных свойств конструкций.

Гвоздев Е.В. и Жуков И.С. в своих работах [18,19] рассматривали особый характер воздействия техногенных аварий на людей и объекты производственного и гражданского назначения, что представлено в описательном варианте и без детализации вопросов конструктивного и восстановительного характера.

Существующие подходы объективно регламентируют процессы ремонта объектов в нормальных условиях производственной среды. Однако для критически важных и опасных производственных объектов требуется восстановительный ремонт даже в условиях различных видов загрязнений.[19, 20]

Целью исследования является выявление в ходе экспериментальных исследований численных зависимостей производительности работ от факторов производственной среды и параметров строительных процессов.

Задачи исследования- ранжирование наиболее значимых факторов влияющих на производительность работ с учетом температуры, продолжительности, вида работ и применения средств индивидуальной защиты; регрессионный анализ и разработка математической модели, учитывающий влияния значимых факторов на эффективность процессов.

2. Материалы и методы

Решение поставленных задач осуществлялось с использованием комплексной методики, объединяющей:

1. Экспертно-аналитическое исследование для выявления и ранжирования факторов, влияющих на продолжительность восстановительного ремонта. Метод экспертных оценок показал валидность [20] результатов за счет привлечения к исследованию 11 компетентных специалистов в сфере проектирования, организации ремонта объектов и опытом работы не менее 5-ти лет.

2. Регрессионный анализ для построения математической модели, описывающей зависимость продолжительности работ от значений ключевых факторов

Этапы исследования: формирование общей группировки факторов, которые могут влиять на результирующий показатель «Выр», то есть выработку продукции за единицу времени; выявление и ранжирование наиболее значимых факторов; регрессионный анализ; разработка уравнения регрессии и интерпретацией его элементов; разработка концепции и основных элементов методологии восстановительного ремонта. Факторы были объединены в пять групп: психофизиологические и эргономические, технико-технологические, санитарно-гигиенические и средовые факторы, организационно-логистические и пространственно-бытовые (табл. 1).

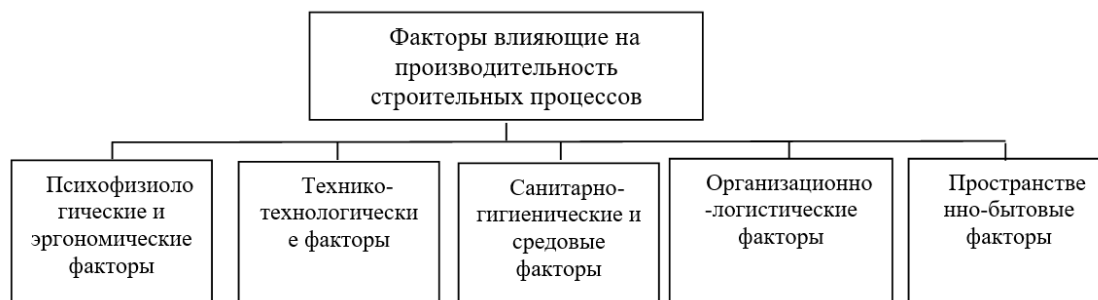


Рис. 1. Группы факторов воздействия на производительность работ (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Groups of factors affecting work productivity (illustration by the authors)

Следующим шагом была оценка факторов экспертами по шкале от 1 до 23 баллов, где 1 – фактор с наименьшим влиянием; 23, соответственно, с наибольшим (табл. 1).

На основе полученных данных в исследовании планируется разработать *линейное уравнение множественной регрессии* (3), следующего вида:

$$T_{\text{восст}} = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6, \quad (1)$$

В основе оценивания параметров данной модели лежит метод наименьших квадратов (МНК) [4]. Суть этого подхода заключается в минимизации отклонений фактических значений переменной $T_{\text{восст}}$ от расчетных величин.

Расчет коэффициентов линейной регрессии планируется выполнить с применением матричных операций и встроенных функций в среде Microsoft Excel. На основе полученных коэффициентов будет составлено уравнение множественной регрессии.

3. Результаты и обсуждения

В таблице 1 представлены результаты экспертной оценки 23 факторов выполненной 11 специалистами с получением суммы рангов (Σ ранг.) и веса факторов.

Таблица 1

Факторы, влияющие на производительность

№	Наименование факторов риска	Эксперты											Σ ранг.	Вес факт.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
1	Наличие запаса материалов	9	6	8	5	1	11	9	5	7	2	7	70	0,023
2	Уровень механизации	8	13	22	17	11	13	12	21	19	15	15	166	0,055
3	Продолжительность выполнения работ	18	15	21	16	15	23	16	22	13	18	17	194	0,064
4	Стесненные условия работ	13	17	11	14	13	9	21	11	14	9	23	155	0,051
5	Шум и вибрация	5	5	15	3	8	3	11	8	23	14	1	96	0,032
6	Использование средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения	21	22	17	20	22	18	19	17	15	23	18	212	0,070
7	Санитарно-бытовые условия	2	3	3	6	2	7	13	4	12	1	10	63	0,021
8	Сменность и режим труда (перерывы)	3	1	5	13	3	5	7	7	11	4	8	67	0,022
9	Степень контроля качества работ	10	7	14	1	5	14	15	3	1	5	2	77	0,025
10	Использование или отсутствие легких СИЗ	22	23	19	21	23	19	20	18	17	22	20	224	0,074

Окончание таблицы 1

11	Качество техн.документации	14	16	10	9	9	12	8	6	3	8	16	111	0,037
12	Освещенность	12	2	9	12	18	8	3	23	10	17	11	125	0,041
13	Вид выполняемых работ	19	20	16	23	17	22	14	15	20	16	22	204	0,067
14	Психологическое состояние и мотивация персонала	6	4	1	4	4	1	6	1	5	6	3	41	0,014
15	Сложность геометрии и конфигурация объекта	4	11	12	10	14	20	17	10	21	7	6	132	0,043
16	Квалификация и опыт	16	14	4	8	7	2	4	9	6	11	12	93	0,031
17	Удаленность объекта и логистика	15	18	7	11	12	15	10	12	2	19	14	135	0,044
18	Совместимость материалов и инструмента (эргономика процесса)	17	8	20	15	16	6	23	19	8	10	13	155	0,051
19	Температурные условия при выполнении работ	23	19	23	22	19	21	22	20	18	21	21	229	0,075
20	Качество материалов	7	9	2	2	10	10	1	13	9	12	9	84	0,028
21	Доступность и надежность энергоснабжения	11	12	6	18	20	4	5	2	22	3	4	107	0,035
22	Использование полного комплекта СИЗ от опасных воздействий	20	21	18	19	21	17	18	16	16	20	19	205	0,067
23	Загрязненность окружающей среды	1	10	13	7	6	16	2	14	4	13	5	91	0,030

На основании проведенных исследований установлено, что основными факторами, влияющими на результирующий показатель Y (производительность процессов) влияют такие факторы как продолжительность выполнения работ (x_1 , $\Sigma p=194$), использование СИЗ органов дыхания и зрения (x_2 , $\Sigma p=212$), использование или отсутствие легких СИЗ (x_3 , $\Sigma p=224$), вид выполняемых работ (x_4 , $\Sigma p=204$), температурные условия при выполнении работ (x_5 , $\Sigma=229$), использование полного комплекта СИЗ от воздействий (x_6 , $\Sigma p=205$).

В результате исследования среди 23 наиболее весомых факторов методом экспертных оценок было выделено 6 факторов. Далее данные факторы были статистически оценены на 10 объектах, с присвоением каждому фактору оценочного статистического балла.[21]

Результаты бальной оценки факторов сведены в таблицу, в которой указаны возможные состояния в соответствии с оценочным баллом (табл. 2).

Таблица 2

Ранжирование факторов

№	Наименование фактора	Расшифровка понятия	Оценочный балл
1	Продолжительность выполнения работ	Работы ведутся более 12 часов подряд (сверхурочное) или в ночное время. Сбой циркадных ритмов, физическое истощение работников	1
		Работы ведутся в конце смены или длятся более 8 часов. Снижение концентрации, усталость	2
		Рабочая смена длится в течение 6-8 часов, выполняются в ее начале. Работник не устал, темп выполнения высокий.	3

Окончание таблицы 2

2	Использование СИЗ органов дыхания и зрения	Использование изолирующих дыхательных аппаратов(противогазы и тп). Давление на лицо, тяжесть, ограниченный обзор, сопротивление дыханию из-за этого требуется частый отдых	1
		Использование полумасок или очков закрытого типа, которые могут запотевать, или респираторов с небольшим сопротивлением на воздухе. Требуются периодические паузы для поправки СИЗ	2
		Работы ведутся в условиях чистой атмосферы. Используются только защитные очки(не влияют на обзор)Движения не скованы	3
3	Использование или отсутствие легких СИЗ	Работа в стесненных условиях, необходимость полного комплекта СИЗ	1
		Использование стандартах СИЗ (очков, масок, перчаток), что снижает удобства, но не приносит сильный дискомфорт	2
		Отсутствие необходимости в легких СИЗ, или то, что не мешает выполнению работ	3
4	Вид выполняемых работ	Специальные работы, требующие точность, нестандартные решения. Работа в условиях повышенной опасности	1
		Монтажные работы, не требующие уникальность	2
		Простые монотонные действия с высокой долей автоматизации (например, простой демонтаж)	3
5	Температурные условия при выполнении работ	Температура ниже комфортной для выполнения	1
		Повышение температуры выше комфортных	2
		Комфортные температурные условия для выполнения работ (обычно 13-18°C)	3
6	Использование полного комплекта СИЗ от опасных воздействий	Работа выполняется в полном комплекте СИЗ, который сильно снижает подвижность и замедляет выполнение работ	1
		Использование защитного костюма, ограничивающего движение, но не снижающего темп выполнения работ	2
		Полный комплект СИЗ не требуется (обычная спец одежда)	3

На основании данной информации, при помощи метода наименьших квадратов, были выделены коэффициенты по каждому из факторов для дальнейшего формирования уравнения множественной регрессии. Найденные коэффициенты сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Коэффициенты уравнения регрессии

a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆
-0,198	0,066	-0,042	0,208	0,056	0,045	0,037

После чего было составлено уравнение множественной регрессии

$$y_x = 0,066x_1 - 0,042x_2 + 0,208x_3 + 0,056x_4 + 0,045x_5 + 0,037x_6 - 0,198, \quad (2)$$

и проведена его оценка значимости.

Общая сумма квадратов отклонений (TSS - total sum of squares):

$$\sum_{i=1}^m (T_{\text{восст } i} - \bar{T})^2 = 0,444, \quad (3)$$

Объясненная регрессией сумма квадратов (RSS): $\sum_{i=1}^m (\hat{T}_{\text{восст } i} - \bar{T})^2 = 0,442$

(4)

Остаточная сумма квадратов (ESS - error sum of squares):

$$\sum_{i=1}^m (\hat{T}_{\text{восст } i} - T_i)^2 = 0,0016, \quad (5)$$

Проверка выполнения соотношения $TSS = RSS + ESS$ подтвердила корректность расчетов.

Коэффициент детерминации R^2 , рассчитан по формуле (6):

$$R^2 = \frac{RSS}{TSS} = \frac{TSS - ESS}{TSS} = 1 - \frac{ESS}{TSS} = 0,98, \quad (6)$$

Его значение свидетельствует о высокой прогнозной способности построенной модели: 98% вариации продолжительности восстановительного ремонта объясняется включенными в модель факторами.

Для проверки статистической значимости уравнения регрессии использован F-критерий Фишера. Выдвинута нулевая гипотеза о равенстве нулю всех коэффициентов регрессии (7):

$$H_0: b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = b_5 = b_6 = 0 \quad (7)$$

Фактическое значение F- критерия рассчитано по формуле (8):

$$F_R = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m} = \frac{0,996^2}{1-0,996^2} \cdot \frac{10-6-1}{6} = 15,22, \quad (8)$$

Критическое значение F-критерия при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и степенях свободы $k_1 = 6$, $k_2 = 3$ составляет $F_{\text{крит}} = 2,92$.

Поскольку $F_{\text{расч}} = 15,22 > F_{\text{крит}} = 2,92$, нулевая гипотеза отклоняется, что при доверительной вероятности 95% подтверждает статистическую значимость построенного уравнения регрессии и позволяет использовать разработанную модель в практических целях.

Значение коэффициента детерминации 0,98 доказывает высокую значимость модели, а значит полученное уравнение (2) является достаточно точным для прогноза показателей качества ремонтно-восстановительных работ.

Проверка значимости уравнения при помощи F-теста (F-критерия Фишера) [14, 16], показала адекватную зависимость переменной от факторов. Выдвигаем нулевую гипотезу о том, что все коэффициенты регрессии равны нулю (9):

$$H_0: b_1 = b_2 = b_3 = b_4 = b_5 = b_6 = 0 \quad (9)$$

Находим фактическое значение F-критерия Фишера (10), принимая число независимых переменных $m = 6$, количество наблюдений $n = 10$.

$$F_R = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m} = 15,22 \quad (10)$$

F-критерия Фишера для уровня значимости $\alpha = 0,05$ [14] и соответствующих степеней свободы $k_1 = m = 6$, $k_2 = n - m - 1 = 3$, будет $F_{\text{крит}} = 2,92$.

Сравнив F_R и $F_{\text{крит}}$, получаем:

$$F_R = 15,22 > F_{\text{крит}} = 2,92$$

Исходя из данного неравенства следует, что нулевую гипотезу следует отклонить, а значит регрессионная модель достоверна при уровне надежности 98%.

$$y_x = 0,066x_1 - 0,042x_2 + 0,208x_3 + 0,056x_4 + 0,045x_5 + 0,037x_6 - 0,198, \quad (11)$$

С целью экспериментальной оценки влияния факторов производственной среды и использование средств защиты при выполнении разных видов работ проведены экспериментальные исследования, что было обусловлено:

1. Отсутствием экспериментальных данных и зависимостей для проведения ремонтно-восстановительных работ в средствах индивидуальной или коллективной защиты; [22]

2. Высокой вероятностью сохранения опасных уровней загрязнения местности в районе поврежденных объектов с радиоактивными веществами, отравляющими веществами, химически опасными веществами в течении длительного времени.

Таблица 4

Перечень основных производственных операций эксперимента

№ п/п	Наименование операции, единицы измерения	Нормативный документ
1	Разборка кирпичных стен, 1 м ³	ГЭСН 46-04-001-04
2	Монтажные работы. Установка лестничных маршей, шт	ГЭСН 07-01-047-03
3	Структурное укрепление деформационных швов и трещин железобетонных конструкций скобами. 100 п.м.	ГЭСНр 53-01-030-01

Оценка производственно-временных закономерностей при выполнении приведенных в табл. 4 СМР, отражающих величину изменения норматива времени на выполнение единицы объема СМР по виду, в зависимости от вариантов использования СИЗ, а именно:

А) Работа в **обычных** условиях производственной среды: костюм рабочий, защитная каска, строительные перчатки тканевые;

Б) Работа в условиях **вредной** производственной среды: применение комплекта

А) + частично СИЗ (респиратор с клапаном типа «3М 8122 FFP2» и очки защитные типа «PANORAMA super»);

В) Работа в условиях **опасной** производственной среды: комбинезон защитный типа «БТР 500HS»; противогаз ГП-5; перчатки специальные каучуковые типа «Manipula Цетра CG-947 (L-F-04)», бахилы пластиковые специальные типа «ЭД 221».

3. Выявить производственно-временные закономерности технологического процесса и характер изменения коэффициента условий труда (Кут) отражающего величину изменения времени на выполнение единицы объема по виду строительных работ в зависимости от вида СМР и вариантов использования СИЗ.[23,24]

Из априорных, исходных предпосылок принимается: 1. Категория рабочих – основные рабочие; 2. Виды исследуемых СМР, представленные в табл. 4. Указанные исходные предпосылки позволяют вывести отдельные факторы из разряда исследуемых, и в качестве исследуемых факторов, влияющих на интенсивность процесса, принимаются: x_1 – температура воздуха рабочей среды (Т); x_2 – время прошедшее от начала работы (t).

Два фактора в модели (12) должны быть для конкретного случая исследованы в пределах времени $X_2 = t(\text{мин})$ 30-180 и температуры воздуха $X_1 = T(^{\circ}\text{C})$ от 5 до 25, с построением двухфакторной функции (модели):

$$N_t = f\{T, t\}, \quad (12)$$

по которой найти пути минимизации времени N_t на выполнение СМР, при конкретных условиях среды и варианта использования СИЗ.

1. Разборка стен из мелкокоразмерных элементов производилась в соответствии с ГЭСН 46-04-001-04. Фотофиксация работ по разборке стен из мелкокоразмерных элементов представлена на рис. 2.

Результаты 6-ти опытов были сведены в табл. 5, где отражена производительность работ итогом за 3 часа, в зависимости от температуры внешней среды и использования СИЗ.



Рис. 2. Фотофиксация работ по разборке стен из мелкокоразмерных элементов поэтапно 1-й ряд – в начале работы, 2-й – в процессе, 3-й – в конце работ в различных условиях производственной среды: а) в обычной; б) в вредной; в) опасной (иллюстрации автора)

Fig. 2. Photo recording of the dismantling of walls made of small-sized elements, stage by stage: 1st row – at the beginning of the work, 2nd row – during the process, 3rd row – at the end of the work, in various work environment conditions: a) normal; b) hazardous; c) dangerous (illustrations by the author)

Анализ данных табл. 5, позволяет отметить следующее:

1. Оптимальный температурный режим[25,26, 27] для выполнения работ 13-19 $^{\circ}\text{C}$. При использовании защитных очков до 13 $^{\circ}\text{C}$ выработка снижалась на 8%, а при

температурах выше 19 °С снижение составляло 4%. Использование респиратора приводило к снижению выработки на 8% при температуре до 13 °С, 19 °С снижение составило до 12%. В комплекте СИЗ лучший результат был при температуре 5-12 °С, с увеличением температуры объем разборки уменьшился на 4% при 13-19°С и на 21% при 20-26°С.

2. Оценка производительности в зависимости от используемых СИЗ. При использовании защитных очков производительность менялась незначительно, в пределах 1%. При применении респиратора производительность статистически значимо не изменяется. При использовании респиратора производительность уменьшалась примерно на 14%. Для комплекта СИЗ производительность снижалась на 32% относительно периода работы в защитных очках.

3. Сравнение производительности в СИЗ в температурном диапазоне 13-19 °С. Выработка при использовании очков и очков + респиратор уменьшалась на 6%, а при использовании комплекта СИЗ на более 21%. При использовании комплекта СИЗ производительность снижалась примерно на 20%.

2. Монтажные работы по установке лестничных маршей (ГЭСН 07-01-047-03) были следующим видом исследуемых работ. Фотофиксация работ по установке лестничных маршей представлена на рис.3.

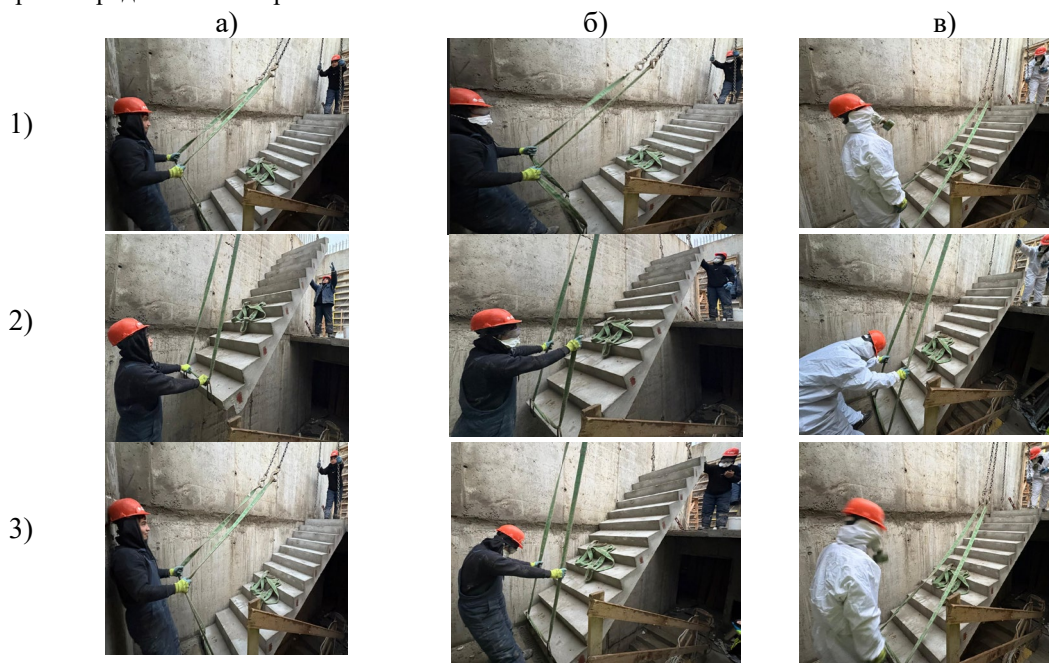


Рис. 3. Фотофиксация работ по установке лестничных маршей поэтапно 1-й ряд – в начале работы, 2-й – в процессе, 3-й – в конце работ в различных условиях производственной среды: а) в обычной; б) в вредной; в) опасной (иллюстрации автора)

Fig. 3. Photo-recording of the installation of stair flights, stage by stage: 1st row – at the beginning of the work, 2nd row – during the process, 3rd row – at the end of the work, in various work environment conditions: a) normal; b) hazardous; c) dangerous (illustrations by the author)

Результаты 6-ти опытов по установке лестничных маршей, были сведены в табл. 5, где отражена производительность работ итогом за 3 часа, в зависимости от температуры внешней среды и использования СИЗ. Анализ данных табл. 5, позволяет отметить следующее:

1. Оценка производительности в зависимости от используемых СИЗ. При использовании защитных очков производительность значимо не изменялась. При применении респиратора производительность без значительных изменений, однако в интервале 150-180 минут был спад на 20% относительно пиковой производительности в интервале от 120 до 150 минут. Для полного комплекта СИЗ производительность относительно стабильна. Выработка при использовании комплекта СИЗ на 25% ниже. В интервале 30-60 и 90-120 минут заметны спады выработки в среднем на 20% относительно производительности до и после них.

2. Сравнение производительности в различных СИЗ при одном температурном режиме (рис.6-8). При оптимальной температуре 13-19 °С выработка при использовании очков и очков + респиратор уменьшается на 3%, при ношении полного комплекта СИЗ снижается на более 31%. В общем видна тенденция снижения производительности на более 30% при использовании комплекта СИЗ.

3. Структурное укрепление деформационных швов и трещин железобетонных конструкций скобамивыполнялось в соответствии с ГЭСН 53-01-030-01.

Фотофиксация работ по структурному укреплению трещин представлена на рис.4.

Состав работ: 1. Вскрытие швов механизированным способом. 2. Заделка шва ремонтным составом. 3. Разметка и сверление шпуров с обеспыливанием и промывкой водой. 4. Установка пакеров в шпуры. 5. Демонтаж пакеров путем обламывания вручную при помощи молотка.



Рис. 4. Фотофиксация работ по структурному укреплению трещин в ж/б конструкциях поэтапно: 1-й ряд – в начале работы, 2-й – в процессе, 3-й – в конце работ в различных условиях производственной среды: а) в обычной; б) в вредной; в) опасной (иллюстрации автора)

Fig. 4. Photo recording of structural reinforcement of cracks in reinforced concrete structures, stage by stage: 1st row – at the beginning of the work, 2nd row – during the process, 3rd row – at the end of the work, in various work environment conditions: a) normal; b) hazardous; c) dangerous (illustrations by the author)

Результаты 6-ти опытов по структурному укреплению деформационных швов, были сведены в табл. 5, где отражена производительность работ итогом за 3 часа, в зависимости от температуры внешней среды и использования СИЗ.

Анализ данных табл. 5, позволяет отметить следующее:

1. Оптимальный температурный режим для выполнения работ 13-19°C. При использовании защитных очков в диапазоне до 13°C выработка снижалась на 6 %, при температурах выше 19°C выработка снижалась в пределах 5%. При использовании респиратора снижение производительности было в пределах 4% при температуре до 13°C., и при температурах более 19°C. Снижение было до 7%. В комплекте СИЗ холод давал лучший результат при температуре 5-12 °С, с увеличением температуры объем разборки уменьшился на 11% при 13-19°C и 22% при 20-26°C.

2. Оценка производительности в зависимости от используемых СИЗ. При использовании защитных очков производительность не изменялась. Использование респиратора приводило к снижению производительности от 5 до 5%. . При работе в

комплект СИЗ производительность снижалась на 15-22 %, после 120 мин работ.

Сводные данные производительности труда по видам СМР за период в 3 часа (180 мин), в зависимости от температуры производственной среды и применения СИЗ

Таблица 5

Сводные данные производительности труда по видам СМР за период 180 мин, в зависимости от температуры производственной среды и применения СИЗ

№	Вид СМР	Диапазон температурных значений, °С								
		5-12	13-19	20-26	5-12	13-19	20-26	5-12	13-19	20-26
1	Разборка стен из мелкоразм. элементов, м³	0,67	0,78	0,65	0,59	0,75	0,55	0,45	0,45	0,36
		-14,1%	100%	-16,7%	-24,4%	-3,8%	-29,5%	-42,3%	-42,3%	-53,8%
2	Установка лестничных маршей, шт.	3,79	4,15	4,01	3,63	4,03	3,49	2,84	2,85	2,38
		-8,7%	100%	-3,4%	-12,5%	-2,9%	-15,9%	-31,6%	-31,3%	-42,7%
3	Структурное укрепление трещин ж/б конструкций скобами, п.м.	4,13	4,48	4,31	3,88	4,23	3,72	3,69	3,53	2,9
		-7,8%	100,0%	-3,8%	-13,4%	-5,6%	-17,0%	-17,6%	-21,2%	-35,3%
		Без СИЗ			Очки, респиратор			Полный комплект СИЗ		

3. Сравнение производительности в различных СИЗ при одном температурном режиме. Оптимальным температурным режимом является 13-19 °С. При использовании очков и очков + респиратор выработка уменьшалась примерно на 3%, а в случае применения полного комплекта СИЗ снижение было более 33%.

Построение уравнения регрессии выполнялось на основании экспериментальных данных, с последующим определением параметров модели и при необходимости построением графика линии регрессии. При этом, использовалась настройка “анализ данных” в информационной среде Excel.[28, 29,30]

Для проверки степени соответствия модели экспериментальным данным использовался коэффициент детерминации (во всех случаях он был больше 0,9). По построенной модели можно прогнозировать объем выполненных работ в зависимости от времени работ и температурного режима, для различных условий работы. Итоговая регрессионная модель имеет вид:

$$Y = a_0 + a_1 t + a_2 T^2 t + \varepsilon, \quad (15)$$

где t - время работы (от 0,5 до 3,0 часа);

T - температурный фактор, принимает значения -1; 0; +1 (от +5 до +25 °С);

a - коэффициенты регрессии;

ε - случайная ошибка.

Альтернативная регрессионная модель (мультипликативная модель):

$$Y = b(T)t^E, \quad (16)$$

Линеаризуется переходом к логарифму

$$\ln Y = a_0(T) + \ln t + \varepsilon, \quad (17)$$

где $a(z) = \ln b(T)$ и $\varepsilon = \ln E$

В настоящее время, отсутствует нормативная база, исследования других авторов по техническому нормированию СМР связанных с разборкой стен из мелкоразмерных элементов, монтажом лестничных маршей и укреплению деформационных швов, так как ошибочно считается что СМР будут выполняться без СИЗ, которые будут применены только в исключительных, разовых случаях, что является ошибочным. Так как для отдельных объектов (жизнеобеспечения, обеспечивающих устойчивость функционирования других элементов инфраструктуры, критически важных, защитных сооружений гражданской обороны, опасных производственных) восстановление и ремонт потребуется даже с учетом наличия заражения местности.

Таблица 6

Сводные данные регрессионной модели по каждому виду СМР

№ п/п	Коэффициент детерминации	a_0	a_1	a_2	Падение скорости в %
При разборке стен из мелкоразмерных элементов					
1	0,996625	0,030704	0,004106	-0,00054	-13,1514
2	0,988779	0,007741	0,004261	-0,00115	-26,9889
3	0,954034	0,015333	0,002391	-0,0002	-8,36470
При монтаже лестничных маршей					
1	0,99096	-0,04933	0,023149	-0,00114	-4,924618774
2	0,992363	0,040704	0,02218	-0,00227	-10,23444545
3	0,968852	0,072259	0,015058	-0,00059	-3,918183026
При структурном укреплении деформационных швов и трещин бетонных скобами					
1	0,992646	-0,08026	0,025193	-0,00136	-5,398324
2	0,994249	-0,04259	0,023377	-0,00207	-8,854857
3	0,958526	-0,00389	0,019577	-0,00127	-6,487204

Таблица 7

Сводные данные по комплексной регрессионной модели обобщенно для 3-х СМР

№ п/п	Коэффициент детерминации	a_0	a_1	a_2	Падение скорости в %
1	0,991389	-0,06619	0,030654	-0,00651	-21,23703
2	0,978125	0,033333	0,025546	-0,00292	-11,43036
3	0,905043	0,137407	0,018549	-0,00165	-8,895358

4. Заключение

Полученные результаты исследования позволяют отметить следующее:

1. В процессе исследования был предложен показатель ($P_{\text{раб}}$), который позволяет оценить параметры СМР с учетом средств индивидуальной защиты.

2. Определены факторы, влияющие на скорость выполняемых работ, влияющих на данный показатель ($P_{\text{раб}}$).

3. На основании полученной совокупности оценок влияния факторов оценки качества ремонтно-восстановительных работ было разработано уравнение множественной регрессии:

$$y_x = 0,066x_1 - 0,042x_2 + 0,208x_3 + 0,056x_4 + 0,045x_5 + 0,037x_6 - 0,198$$

4. В качестве общих выводов по экспериментальным данным представляется отметить следующее:

- для лёгких СИЗ или без СИЗ оптимальная температура – 13-19 °С. Для полного комплекта СИЗ - чаще всего 5-12 °С (комбинезон защищает от холода, но вызывает перегрев при более высоких температурах);

- без СИЗ / лёгкие СИЗ: производительность стабильна все 180 минут, иногда даже растёт к концу. Полный комплект СИЗ: заметное утомление обычно после 90-120 минут, оптимальный рабочий интервал - первые 90-120 минут (рекомендуется перерыв после 120 мин).

Практическая значимость данного исследования заключается в возможности прогнозирования ремонтно-восстановительных работ при их выполнении в СИЗ. Научная новизна заключается в определении зависимостей производительности труда и нормы выработки производственных процессов от времени, температуры окружающей среды, с учетом СИЗ и вида работ.

Научная новизна полученных результатов заключается в установлении в процессе экспериментальных исследований, регрессионно-математической зависимости и модели влияния факторов на производительность труда при реализации базовых ремонтных работ в условиях допустимых уровней и техногенного загрязнения.

Полученные результаты позволяют более точно оценивать влияние различных факторов на производительность работ, что в свою очередь может помочь объективнее

оценивать продолжительность выполнения работ в опасных или специфических условиях производственной среды.

Благодарности

Исследования проведены при выполнении в 2026 г. НИР СПбГАСУ «Разработка и моделирование параметров строительных процессов при модернизации опасных производственных объектов с учетом технических и экологических рисков».

Список литературы/References

1. Азаров В. Н., Бурлаченко О. В., Сысоева Е. В., Бурлаченко А. О. Модель выбора эффективных решений для повышения безопасности труда и экологической безопасности строительства в городских условиях // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 11. С. 1707–1717. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1707-1717.
Azarov V. N., Burlachenko O. V., Sysoeva E. V., Burlachenko A. O. Model of Choosing Effective Solutions for Improving Occupational Safety and Environmental Safety of Construction in Urban Conditions // Bulletin of MGSU. 2025. Vol. 20. Issue 11. P. 1707–1717. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.11.1707-1717.
2. Гусаков А. А. Организационно-технологическая надежность строительного производства. М. : Стройиздат, 1985. 134 с.
Gusakov, A. A. Organizational and Technological Reliability of Construction Production. Moscow: Stroyizdat, 1985. 134 p.
3. Данелян Т. Я. Формальные методы экспертных оценок // Экономика, Статистика и Информатика. 2015. № 1. С. 183–187.
Danelyan T. Ya. Formal Methods of Expert Assessments // Economics, Statistics and Informatics. 2015. No. 1. P. 183–187.
4. Джалилов Ш. А. Метод расчета параметров множественной линейной регрессии // Достижения науки и образования. 2020. № 3 (57). С. 24–27.
Jalilov Sh. A. The method of calculating the parameters of multiple linear regression // Achievements of Science and Education. 2020. No. 3 (57). P. 24–27.
5. Ерофеев А. В., Морковин А. А., Горохов Т. И. Построение и проверка адекватности уравнения регрессии прочности на растяжение при изгибе от соотношения компонентов композитного материала // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 2 (100). С. 30–38. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-2-30-38.
Erofeev A. V., Morkovin A. A., Gorokhov T. I. Development and verification of the adequacy of the regression equation for the tensile strength in bending from the ratio of the composite material components // Architecture, Construction, Transport. 2022. No. 2 (100). P. 30–38. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-2-30-38.
6. Крянев А. В., Семенов С. С. К вопросу о качестве и надежности экспертных оценок при определении технического уровня сложных систем // Надежность. 2013. № 4 (47). С. 90–109.
Kryanev A. V., Semenov S. S. On the Quality and Reliability of Expert Assessments in Determining the Technical Level of Complex Systems // Reliability. 2013. No. 4 (47). P. 90–109.
7. Лapidус А. А., Тельпиз И. Ф. Факторы, влияющие на параметры капитального ремонта // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 189–192.
Lapidus A. A., Telpiz I. F. Factors Affecting the Parameters of Capital Repairs // News of Tula State University. Technical Sciences. 2023. No. 4. P. 189–192.
8. Al-Bayati A. J., Renner A. T., Listello M. P., Mohamed M. PPE non-compliance among construction workers: An assessment of contributing factors utilizing fuzzy theory // Journal of Safety Research. 2023. Vol. 85. P. 242–253. DOI: 10.1016/j.jsr.2023.02.008.
9. Олейник П. П. Основные тенденции развития организации строительного производства // Строительное производство. 2022. № 2. С. 21–25.
Oleynik P. P. Main Trends in the Development of Construction Production Organization // Construction Production. 2022. No. 2. P. 21–25.
10. Руденко А. А. Организационно-технологические и конструктивные решения по

- восстановлению, ремонту, усилению и замене поврежденных элементов зданий. Курск : Университетская книга, 2025. 74 с.
- Rudenko A. A. Organizational, technological, and structural solutions for the restoration, repair, reinforcement, and replacement of damaged building elements. Kursk: University Book, 2025. 74 p.
11. Бирюков А. Н., Бирюков Ю. А., Руденко А. А. Техничко-экономические и организационные аспекты восстановления объектов военной инфраструктуры: монография. Санкт-Петербург: ВИ(ИТ) ВА МТО, 2022. – 284 с.
Biryukov A. N., Biryukov Yu. A., Rudenko A. A. Techno-economic and organizational aspects of the restoration of military infrastructure facilities: monograph. Saint Petersburg: VI(IT) VA MTO, 2022. – 284 p.
 12. Носков С. И., Глухов Н. И., Кириллова Т. К., Попов Е. С. Математическая модель динамики дорожного строительства в Российской Федерации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2022. № 4 (42). С. 95–99. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-42-4-95-99.
Noskov S. I., Glukhov N. I., Kirillova T. K., Popov E. S. Mathematical Model of Road Construction Dynamics in the Russian Federation // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea Region. 2022. No. 4 (42). P. 95–99. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-42-4-95-99.
 13. Римшин В.И., Швецов В.В., Семенов С.Г. Экспертная оценка технического состояния поврежденных зданий после ЧС // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2016. – № 4, с.28-33. 5
Rimshin V.I., Shvetsov V.V., Semenov S.G. Expert assessment of the technical condition of damaged buildings after an emergency // Academic Bulletin of the UralNIIProekt RAASN. - 2016. - No. 4, P. 28-33.
 14. Кабанцев О.В., Симаков О.А. Восстановление каменной кладки после динамических воздействий // International journal for computational civil and structural engineering. – 2023. – Т. 19, № 4. С. 46-48. 6
Kabantsev O.V., Simakov O.A. Restoration of stone masonry after dynamic impacts // International journal for computational civil and structural engineering. – 2023. – Vol. 19, No. 4. P. 46-48. 6
 15. Мальганов А.И., Плевков В.С. Восстановление и усиление ограждающих строительных конструкций. – Томск, 2002. 392 с. 8.
Malganov A.I., Plevkov V.S. Restoration and strengthening of enclosing building structures. – Tomsk, 2002. 392 p.
 16. Меслемани Х., Коянкин А.А., Усманов К.П. Поврежденное железобетонное здание: виды и аспекты модернизации и восстановления // Перспективы науки. 2021. № 6(141). С. 69-74. 9
Mesleman H., Koyankin A. A., Usmanov K. P. Damaged reinforced concrete building: types and aspects of modernization and restoration // Prospects of Science. 2021. No. 6 (141). P. 69-74.
 17. Завьялов И. В. Процесс ремонта разрушающихся зданий и построек // Обществознание и социальная психология. 2022. № 10(40). С. 162-165.
Zavyalov I. V. The process of repairing crumbling buildings and structures // Social Science. 2022. No. 10(40). P. 162-165.
 18. Гвоздев Е.В. Развитие методологии управления риском на взрывопожароопасных объектах предприятий //Безопасность труда в промышленности. 2023. No 8. С. 61–69. DOI: 10.24000/04092961202386169. 12
Gvozdev, E.V. Development of Risk Management Methodology at Explosive and Fire-Hazardous Enterprises // Occupational Safety in Industry. 2023. No. 8. P. 61–69. DOI: 10.24000/04092961202386169
 19. Жуков И. С., Лисанов М. В., Самусева Е. А. Критерии допустимого социального риска при авариях на опасных производственных объектах//Безопасность труда в промышленности. 2020. № 5. С. 79–86. DOI:10.24000/0409-2961-2020-5-79-86. 13
ZhukovI. S., LisanovM. V., Samuseva E. A. Criteria for Acceptable Social Risk in Accidents at Dangerous Production Facilities//Occupational Safety in Industry. 2020.

- No. 5. P. 79–86. DOI:10.24000/0409-2961-2020-5-79-86.
20. Han S., Dong L., Weng Y., Xiang J. Heat exposure and productivity loss among construction workers: A meta-analysis // BMC Public Health. 2024. Vol. 24. P. 3252. DOI: 10.1186/s12889-024-207-x.
21. Hosny A., Nik-Bakht M., Moselhi O. Workspace planning in construction: non-deterministic factors // Automation in Construction. 2020. Vol. 116. P. 103146.
22. Brisbane B. R., Radcliffe C. R., Jones M. L. H., Stirling L., Coltman C. E. Does the fit of personal protective equipment affect functional performance? A systematic review across occupational domains // PLoS ONE. 2022. Vol. 17. No. 11. P. e0278174. DOI: 10.1371/journal.pone.0278174.
23. Cheng M.-Y., Cao M.-T., Mendrofa A. Y. J. Dynamic feature selection for accurately predicting construction productivity using symbiotic organisms search-optimized least square support vector machine // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 35. P. 101973. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101973.
24. Al-Bayati A. J., Renner A. T., Listello M. P., Mohamed M. PPE non-compliance among construction workers: An assessment of contributing factors utilizing fuzzy theory // Journal of Safety Research. 2023. Vol. 85. P. 242–253. DOI: 10.1016/j.jsr.2023.02.008.
25. Han S., Dong L., Weng Y., Xiang J. Heat exposure and productivity loss among construction workers: A meta-analysis // BMC Public Health. 2024. Vol. 24. P. 3252. DOI: 10.1186/s12889-024-20744
26. Gurmu A. T., Ongkowitzo C. S. Predicting construction labor productivity based on implementation levels of human resource management practices // Journal of Construction Engineering and Management. 2020. Vol. 146. No. 3. P. 04019115. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001775.
27. Soytu N. Y., Aleynikova M. A., Novozhilova A. V. Investigation of the Technical Condition of Buildings and Structures in the Conditions of Dangerous Geological Processes // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 151. P. 234–240.
28. Wang K. et al. Investigating the role of artificial intelligence technologies in the construction industry using a Delphi-ANP-TOPSIS hybrid MCDM concept under a fuzzy environment // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 15. P. 11848.
29. Rolstadas, A. Planning and control of concurrent engineering projects / A. Rolstadas // International Journal of Production Economics. –1995. –Vol. 38. No. 1. – P. 3–13.
30. Ramalho, F.D., Silva, I.S., Ekel, P.Y., Martins, C.A.P. da S., Bernardes, P., Libório, M.P. Multimethod to prioritize projects evaluated in different formats / F. D. Ramalho, I. S. Silva, P. Y. Ekel, C. A. P. da S. Martins, P. Bernardes, M. P. Libório // MethodsX.2021.Vol.8. No.4.P.101371. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101371>.

Информация об авторе

Руденко Александр Алексеевич, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.
E-mail: rudenkoa.a@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2996-9785

Information about the authors

Alexander A. Rudenko, Doctor of Economics, Candidate of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation.
E-mail: rudenkoa.a@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2996-9785

Дата поступления: 02.04.2026

Дата принятия: 29.09.2026