

УДК 69.05:004.82

А. С. Белоусов^а, В. А. Пшеничкина^б, А. А. Чураков^б

^а *Строительная компания «Дом Янте»*

^б *Волгоградский государственный технический университет*

ДИНАМИЧЕСКАЯ МНОГОФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ ВЕРИФИКАЦИИ КОМПЕТЕНЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПОДРЯДЧИКОВ В СЕГМЕНТЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Рассматривается проблема информационной асимметрии на рынке индивидуального жилищного строительства. Предложена динамическая многофакторная модель верификации, интегрирующая квалификационные характеристики, опыт работ, фотоверификацию, качество материалов и отзывы заказчиков в единую оценочную функцию с адаптивными весами. Весовые коэффициенты определяются комбинированным методом АНР — энтропией Шеннона. Введен коэффициент доверия $T(s)$ с рекуррентным обновлением на основе цифрового следа подрядчика. Работоспособность модели подтверждена вычислительным экспериментом на синтетических данных (1000 итераций Монте-Карло). Описана архитектура SaaS-платформы, реализующей модель в виде экосистемы управления качеством.

Ключевые слова: индивидуальное жилищное строительство, верификация компетенций подрядчика, многофакторная оценка, метод анализа иерархий, энтропийное взвешивание, цифровой мониторинг строительства, SaaS-платформа.

Введение

Рынок индивидуального жилищного строительства (ИЖС) в России характеризуется выраженной информационной асимметрией: финансовый ущерб граждан от недобросовестных подрядчиков превышает 150 млрд руб. в год [1]. Заказчик лишен инструментов объективной оценки компетенций исполнителя, подрядчик — механизмов подтверждения квалификации, а страховые компании и банки не располагают верифицированными данными о строительных рисках.

Существующие цифровые платформы (Procore, Autodesk Construction Cloud, «Стройконтроль», «Навигатор») ориентированы на крупное коммерческое строительство либо реализуют лишь документооборот без алгоритмической оценки компетенций [2]. При наличии рейтинговых механизмов они носят статический характер и не учитывают динамику строительного процесса.

Международный опыт демонстрирует, что устойчивые системы контроля качества в малоэтажном строительстве формируются через репутационные механизмы. Шведские системы GVK, Säker Vatten и Träguiden реализуют верификацию компетенций через накопленный «цифровой след» подрядчика и публичный реестр специалистов эффективнее административного принуждения.

Цель исследования — разработка динамической многофакторной модели оценки компетенций строительных подрядчиков, адаптированной к условиям ИЖС: неполноте данных, высокой вариативности источников и отсутствию централизованного реестра исполнителей.

Материалы и методы

Методологическую основу составляют: метод анализа иерархий (АНР) [3] для структурированного определения весовых коэффициентов;

энтропийное взвешивание Шеннона [4] для объективной корректировки весов по информативности факторов; экспоненциальное сглаживание для непрерывного обновления рейтинга; итерационная множественная импутация пропущенных данных (MICE) [5] для устойчивости модели при неполноте информации. Каждый метод адаптирован к специфике ИЖС, где классические предпосылки — нормальность распределения, полнота выборки, независимость экспертов — систематически не выполняются.

Нормативную основу контрольных точек составляют СП 55-101—2000, СП 70.13330 и СП 22.13330. Межэкспертная согласованность весов оценивается коэффициентом Криппендорфа α_K [6]; привлечены семь экспертов технического надзора с опытом не менее пяти лет (включая специалистов, работавших в России и Швеции), $\alpha_K = 0,74$ — удовлетворительный уровень для прикладных задач оценки.

В условиях ИЖС классические предпосылки АНР нарушены, поэтому введены адаптации: 1) усеченное среднее (10 %) при агрегации экспертных оценок; 2) взвешивание экспертов по $T(s)$; 3) бутстрап-корректировка ($B = 1000$) при $CI / RI > 0,10$. Энтропия Шеннона адаптируется к разнородным факторам через сигмоидную нормализацию.

Результаты

Структура модели

Интегральный рейтинг подрядчика определяется как

$$R(t) = W(t)^T \cdot V(t),$$

где $V(t) = [K, E, F, M, C]$ — вектор нормализованных факторов, где K — квалификационные характеристики, E — опыт выполнения работ, F — фотоверификация, M — подтвержденность материалов, C — верифицированные отзывы заказчиков; $W(t)$ — вектор весов, зависящий от этапа строительства и структуры доступных данных. Ключевое отличие от существующих платформ: динамическая адаптация весов сохраняет работоспособность модели при пропуске до 30 % значений (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Матрица динамических весов $W(t)$ по этапам строительства

Этап	wK	wE	wF	wM	wC
Проектирование	0,35	0,25	0,05	0,20	0,15
Фундамент	0,20	0,30	0,35	0,10	0,05
Каркас/стены	0,15	0,25	0,30	0,20	0,10
Кровля	0,15	0,20	0,35	0,20	0,10
Инженерные системы	0,25	0,20	0,25	0,20	0,10
Отделка	0,10	0,20	0,25	0,25	0,20

Примечание. $\sum w_i = 1$. Значения уточнены экспертным методом ($N_e = 7$, α -Криппендорфа = 0,74); подлежат корректировке на пилотных данных.

Комбинированный метод определения весов

Весовые коэффициенты определяются как нормализованное произведение экспертного и объективного весов:

$$w_i = (a_i \cdot \beta_i) / \sum_j (a_j \cdot \beta_j),$$

где a_i — экспертный вес (АНР с робастными адаптациями); β_i — объективный энтропийный вес:

$$\beta_i = 1 - H_i / H_{\max}, H_i = -\sum p(v_{ij}) \cdot \ln p(v_{ij}).$$

Высокая энтропия фактора автоматически снижает его итоговый вес. При мультиколлинеарности ($VIF > 5$) применяется метод главных компонент (РСА).

Динамическое обновление рейтинга и коэффициент доверия

Обновление реализуется через экспоненциальное сглаживание с адаптивным коэффициентом:

$$R_n = \eta \cdot r_n + (1 - \eta)R_{n-1}, \eta = \eta_{\max} / (1 + \exp(-0,1(n - n_0))),$$

где $\eta_{\max} = 0,3$; $n_0 = 10$.

Конструкция обеспечивает быструю адаптацию на начальном этапе и нарастающую инерцию по мере накопления данных.

Коэффициент доверия к источнику $T(s) \in [0; 1]$ определяется так:

$$T(s) = \gamma \cdot T_{\text{hist}}(s) + (1 - \gamma)T_{\chi \text{ crt}}(s),$$

где $T_{\chi \text{ crt}}(s)$ — сертификационный коэффициент (0,3 / 0,7 / 1,0 по уровню верификации источника); $\gamma = 0,6$.

Механизм обновления исторического коэффициента:

$$T_{\text{hist}}(t + 1) = \lambda \cdot T_{\text{hist}}(t) + (1 - \lambda)\delta_t,$$

где $\lambda = 0,85$ — коэффициент «памяти» источника (при $\lambda \geq 0,85$ отклонение $T(s)$ не превышает 6 % на горизонте $n = 20$); δ_t — бинарный индикатор подтверждения данных; $T_{\text{hist}}(0) = 0,5$ (нейтральное начальное значение).

Нормализация и обработка пропусков

Нормализация факторов осуществляется сигмоидной функцией:

$$v_{i_norm} = 1 / (1 + \exp(-k(v_i - v_0))),$$

где $k = 2$ (нормальное распределение) или $k = 4$ (высокая вариативность); v_0 — медиана пилотной выборки.

Сигмоида обеспечивает эффект насыщения при экстремальных значениях и устойчивость к выбросам. Для восстановления пропущенных значений (до 30 %) применяется MICE [5], сохраняющий корреляционную структуру данных в отличие от медианного заполнения.

Модуль компьютерного зрения

Фактор F формируется по методологии «проект — эталон — факт»: загруженный фотоотчет сопоставляется с цифровым эталоном на основе проектной документации. Задача декомпозируется на детекцию строительных узлов и классификацию этапа работ: обе решаются сверточными нейронными сетями. По данным смежных задач мониторинга [7, 8], достижимая точность составляет 0,87...0,93 (mAP@50).

Целевой режим — human-in-the-loop: алгоритм выявляет отклонения и формирует предварительное заключение, инженер технического надзора лишь подтверждает или отклоняет автоматический вывод. Репутация напрямую трансформируется в скорость прохождения контроля: подрядчики с высоким рейтингом получают ускоренное прохождение контрольной точки,

новые исполнители всегда проходят экспертную верификацию, что создает рыночный стимул к накоплению цифрового следа.

Вычислительный эксперимент

Для подтверждения работоспособности до сбора реальных данных проведено имитационное моделирование на синтетических данных (табл. 2). Сформированы два архетипа: «Надежный» (высокая квалификация, регулярная фотофиксация, положительные отзывы) и «Новый» (неполный профиль, 25 % пропущенных значений, нейтральные отзывы). Отслеживается динамика рейтингов на протяжении 20 контрольных событий.

Параметры генерации: значения $V(t)$ — нормальные распределения, откалиброванные по экспертному опросу.

«Надежный»: $K \sim N(0,85; 0,05^2)$, $E \sim N(0,80; 0,07^2)$, $F \sim N(0,88; 0,04^2)$, $M \sim N(0,82; 0,06^2)$, $C \sim N(0,79; 0,08^2)$.

«Новый»: $K \sim N(0,55; 0,10^2)$, $E \sim N(0,50; 0,12^2)$, $F \sim N(0,60; 0,09^2)$, $M \sim N(0,58; 0,10^2)$, $C \sim N(0,52; 0,11^2)$.

Пропуски — механизм MCAR (5 % и 25 % соответственно); восстановление через MICE.

Т а б л и ц а 2

Результаты вычислительного эксперимента: динамика $R(t)$

n	Этап	$R(t)$ «Надежный»	$R(t)$ «Новый»	$T(s)$ «Надежный»	$T(s)$ «Новый»
1	Проектирование	0,832	0,553	0,570	0,500
5	Фундамент	0,847	0,561	0,648	0,521
10	Каркас/стены	0,851	0,574	0,710	0,533
15	Кровля	0,856	0,588	0,749	0,540
20	Отделка	0,859	0,597	0,774	0,548

Примечание. Значения $R(t)$ — медианы по 1000 итерациям Монте-Карло; ДИ 95 %: для «Надежного» $\pm 0,012$, для «Нового» $\pm 0,021$.

Разделение рейтингов устойчиво с первого события: $\Delta R = 0,279$ при $n = 1$, $\Delta R = 0,262$ при $n = 20$ (незначительное сближение — следствие постепенного роста T_{hist} у «Нового»). Ширина ДИ для «Нового» вдвое превышает таковую для «Надежного», что соответствует ожидаемому поведению MICE при высокой доле пропусков.

Анализ чувствительности проведен методом однофакторного варьирования с шагом $\Delta = 0,05$: $\lambda \in [0,75; 0,95]$ при фиксированном $\gamma = 0,6$, затем $\gamma \in [0,4; 0,8]$ при фиксированном $\lambda = 0,85$. Для каждой комбинации выполнено 1000 итераций Монте-Карло; фиксировалось максимальное отклонение $T(s)$ на горизонте $n = 20$ относительно базового сценария ($\lambda = 0,85$, $\gamma = 0,6$). Максимальное отклонение не превышает 9,2 % при варьировании λ и 8,7 % при варьировании γ — параметрическая устойчивость модели подтверждена.

На этапах фундамента и кровли доминирует F (фотоверификация, $wF = 0,35$), обеспечивая наибольший разрыв между архетипами. На этапе проектирования решающую роль играет K (квалификационные характеристики, $wK = 0,35$). На финальном этапе вклад факторов выравнивается, наибольшее значение приобретают M ($wM = 0,25$) и C ($wC = 0,20$).

Данные сравнительного анализа приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Сравнительный анализ цифровых платформ строительного мониторинга

Критерий	Procore/ACC	«Стройконтроль»	«Навигатор»	Предлагаемое решение
Модель оценки компетенций	Нет	Нет	Нет	Да (динамическая многофакторная)
Учет временной динамики	Нет	Нет	Частично (BIM)	Да (адаптивные веса)
Интеграция разнородных данных	Частично	Частично	Частично	Да (K, E, F, M, C)
Алгоритмическая верификация фото	Нет	Нет	Нет	Да (CV, human-in-the-loop)
Учет достоверности источников	Нет	Нет	Нет	Да (коэффициент $T(s)$)
Применимость к ИЖС	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая

Примечание. Данные основаны на анализе открытой документации платформ [2].

Сравнение с альтернативными методическими подходами

Для количественной оценки преимуществ предложенной модели проведено имитационное сравнение с четырьмя альтернативами: статической линейной моделью (SLM), АНР-моделью без динамики (АНР-static), моделью без учета достоверности источников (No-Trust) и моделью с медианной импутацией пропусков (Median-Impute). Эксперимент выполнен в условиях, характерных для ИЖС: 30 % случайных пропусков (MCAR) и 15 % недостоверных источников ($T(s) = 0,5$ вместо 0,8). Оценки получены по 1000 итерациям Монте-Карло [9] (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Сравнение моделей при 30 % пропусков + 15 % недостоверных источников

Модель	ρ (Спирмена)	RMSE	τ (Кендалла)
SLM	0,55	0,21	0,52
АНР-static	0,57	0,20	0,54
No-Trust	0,68	0,14	0,65
Median-Impute	0,67	0,15	0,63
Proposed	0,81	0,09	0,79

Примечание. Все различия между моделью Proposed и альтернативами статистически значимы при $p < 0,01$ (критерий Уилкоксона для зависимых выборок, $n = 1000$ итераций Монте-Карло).

Предлагаемая модель превосходит ближайшую альтернативу (No-Trust) на 0,13 по ρ и на 0,14 по τ , что подтверждает вклад механизма доверия $T(s)$ и MICE-импутации. Статические модели (SLM, АНР-static) непригодны для ранжирования подрядчиков в условиях ИЖС ($\tau \leq 0,54$). Ограничение: результаты получены на синтетических данных и требуют эмпирической валидации на реальных объектах.

Обсуждение

Предложенная модель расширяет концепцию комплексной оценки качества СМР [10—12] за счет трех принципиальных отличий.

Во-первых, совместная формализация АНР, энтропии Шеннона, экспоненциального сглаживания и МІСЕ в единой динамической системе составляет самостоятельный научный результат; адаптации к специфике ИЖС (неполноте данных, вариативности источников, отсутствию реестра) не представлены в существующих решениях.

Во-вторых, коэффициент $T(s)$ принципиально отличается от бинарных схем «верифицирован / не верифицирован» в существующих платформах. Рекуррентная формула $T_{\text{hist}}(t)$ формирует репутационный профиль источника без централизованного регулятора.

В-третьих, применение МІСЕ вместо медианного заполнения сохраняет корреляционную структуру данных, критически важную для корректной взвешенной агрегации. Сигмоидная нормализация исключает искажение общей оценки за счет экстремальных показателей отдельного объекта.

Методика Кабанова и Аль-Рубайе [10] оценивает строительную организацию в целом: предлагаемый подход позволяет дифференцировать компетенции внутри компании по видам работ и этапам. Применение комбинированного метода АНР: энтропия согласуется с широким кругом работ по многокритериальной оценке в строительстве [13], тогда как использование имитационного моделирования Монте-Карло для верификации модели опирается на апробированные подходы к анализу строительных рисков [9]. Перспективы развития платформы связаны с интеграцией цифровых технологий управления качеством [14] и применением методов бережливого строительства [15]. Сравнение с GVK и S aker Vatten демонстрирует концептуальное единство: предложенная модель реализует принцип рыночной репутационной верификации в российском контексте, замещая ассоциации-регуляторы формализованным математическим аппаратом. Ограничение работы: синтетическая природа данных эксперимента; пилотная валидация на реальных данных платформы является следующим необходимым шагом.

При полном развертывании система формирует замкнутую репутационную экосистему: подрядчик получает доступ к заказам с эскроу-финансированием через накопленный рейтинг; заказчик снижает риск через прозрачный выбор исполнителя; банк раскрывает эскроу поэтапно по данным мониторинга; страховая компания дифференцирует тариф; инженер технического надзора получает цифровые инструменты и публичный статус. Каждый участник мотивирован собственной экономической выгодой.

Заключение

Предложена динамическая многофакторная модель верификации компетенций строительных подрядчиков, интегрирующая пять групп факторов (K, E, F, M, C) в единую оценочную функцию с весами, адаптируемыми к этапу строительства и структуре доступных данных.

Введенный коэффициент $T(s)$ реализует непрерывную шкалу верификации источников без зависимости от централизованного регулятора. Работоспособность подтверждена имитационным моделированием ($N_e = 7$, α -Кришпендорфа = 0,74, 1000 итераций Монте-Карло).

Практическая значимость определяется тремя взаимосвязанными эффектами: создается рыночный репутационный механизм, функционально эквивалентный шведским GVK и S aker Vatten; модуль компьютерного зрения (human-in-the-loop, точность 0,87...0,93 mAP@50) снижает нагрузку на эксперта; платформа формирует инфраструктуру доверия для всех участников рынка ИЖС одновременно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brkic J., Olt P., Radujkovic M. Risks caused by information asymmetry in construction projects: a systematic literature review // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 13. Art. no. 9979. DOI: 10.3390/su15139979.
2. Ghansah F. A., Edwards D. J. Digital technologies for quality assurance in the construction industry: current trend and future research directions towards Industry 4.0 // Buildings. 2024. Vol. 14. Iss. 3. Art. no. 844. DOI: 10.3390/buildings14030844.
3. Madzik P., Falat L. State-of-the-art on analytic hierarchy process in the last 40 years: literature review based on Latent Dirichlet Allocation topic modelling // PLOS ONE. 2022. Vol. 17. Iss. 5. Art. no. e0268777. DOI: 10.1371/journal.pone.0268777.
4. Mukhametzyanov I. Z. Specific character of objective methods for determining weights of criteria in MCDM problems: entropy-based methods and CRITIC // International Journal of Information Technology & Decision Making. 2022. Vol. 21. Iss. 6. Pp. 1915—1949. DOI: 10.1142/S0219622022500285.
5. Multiple imputation for missing data in epidemiological and clinical research: potential and pitfalls / J. A. C. Sterne et al. // BMJ. 2009. Vol. 338. Art. no. b2393. DOI: 10.1136/bmj.b2393.
6. Hayes A. F., Krippendorff K. Answering the call for a standard reliability measure for coding data // Communication Methods and Measures. 2007. Vol. 1. Iss. 1. Pp. 77—89. DOI: 10.1080/19312450709336664.
7. Advancing construction site workforce safety monitoring through BIM and computer vision integration / A. S. Kulinar et al. // Automation in Construction. 2024. Vol. 158. Art. no. 105227. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105227.
8. Chua W. P., Cheah C. C. Deep-learning-based automated inspection system // Sensors. 2024. Vol. 24. Iss. 3. Art. no. 854. DOI: 10.3390/s24030854.
9. Czemplik A. Project risk in the context of construction schedules: combined Monte Carlo Simulation and Time at Risk (TaR) approach // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 3. Art. no. 1044. DOI: 10.3390/app12031044.
10. Кабанов В. Н., Аль-Рубайе С. Д. Методика определения качества строительной организации // Изв. вузов. Инвестиции. Стр.-во. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 4. С. 602—611. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-4-602-611.
11. Villalba P., S anchez-Garrido A. J., Yepes V. A review of multi-criteria decision-making methods for building assessment, selection, and retrofit // Journal of Civil Engineering and Management. 2024. Vol. 30. Iss. 5. Pp. 465—480. DOI: 10.3846/jcem.2024.21621.
12. Qiao Y., Wang J., Wang Y. Sustainability evaluation of green building construction based on a combination method of weighting and improved matter-element extension // AIMS Mathematics. 2024. Vol. 9. Iss. 9. Pp. 24418—24442. DOI: 10.3934/math.20241190.
13. Regional social relationships evaluation using the AHP and entropy weight method / C. Zhang et al. // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 9. Art. no. 5321. DOI: 10.3390/su14095321.
14. Digital transformation in residential construction: a review of emerging technologies for quality management / F. A. Ghansah et al. // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 76. Art. no. 107246. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107246.
15. Wuni I. Y., Shen G. Q. P. Fuzzy modelling of the effects of lean construction factors on project performance outcomes // Journal of Construction Engineering and Management. 2023. Vol. 149. Iss. 1. Art. no. 04022143. DOI: 10.1061/JCEMD4.COENG-11702.

  Белouсов А. С., Пшеничкина В. А., Чураков А. А., 2026

Поступила в редакцию
05.05.2026

Ссылка для цитирования:

Белоусов А. С., Пшеничкина В. А., Чураков А. А. Динамическая многофакторная модель верификации компетенций строительных подрядчиков в сегменте индивидуального жилищного строительства // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 3(104). С. 161—168. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_161.

Об авторах:

Белоусов Александр Сергеевич — руководитель, строительная компания «Дом Янте». Российская Федерация, 400001, г. Волгоград, ул. Калинина, 4; domjante@mail.ru

Пшеничкина Валерия Александровна — д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительных конструкций и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; skoins@mail.ru

Чураков Алексей Александрович — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; alexei.churakov@yandex.ru

Alexander S. Belousov^a, Valeriya A. Pshenichkina^b, Alexey A. Churakov^b

^a *Domjante construction company*

^b *Volgograd State Technical University*

**DYNAMIC MULTI-FACTOR MODEL
FOR VERIFICATION OF CONSTRUCTION CONTRACTORS' COMPETENCIES
IN THE INDIVIDUAL HOUSING SECTOR**

The paper addresses information asymmetry in the individual housing construction market. A dynamic multi-factor verification model is proposed integrating qualification, experience, photo-verification, material quality and customer feedback into a unified scoring function with adaptive weights determined by the combined AHP — Shannon entropy method. A formalised source-trust coefficient $T(s)$ with recurrent updating is introduced. Model validity is confirmed by a computational experiment on synthetic data (1000 Monte Carlo iterations). The SaaS platform architecture is described.

Key words: individual housing construction, contractor competency verification, multi-factor assessment, analytic hierarchy process, entropy weighting, digital construction monitoring, SaaS platform.

For citation:

Belousov A. S., Pshenichkina V. A., Churakov A. A. [Dynamic multi-factor model for verification of construction contractors' competencies in the individual housing sector]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 3, pp. 161—168. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_161.

About authors:

Alexander S. Belousov — CEO, Domjante construction company. 4, Kalinina st., Volgograd, Russian Federation; domjante@mail.ru

Valeriya A. Pshenichkina — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; skoins@mail.ru

Alexey A. Churakov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; alexei.churakov@yandex.ru