

## АНОТАЦІЯ

**Данілов С. Ю. Моделі та методи мультиагентного розподілу трудових ресурсів в середовищі будівельних девелоперських проєктів в умовах невизначеності. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». - Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2026.

Дисертаційне дослідження присвячене науково-методичному обґрунтуванню, розробленню та практичній перевірці моделей і методів мультиагентного управління трудовими ресурсами в умовах будівельних девелоперських проєктів за невизначених умов. Робота спрямована на створення інтелектуальної системи управління персоналом — як підсистеми організації будівництва в девелоперському проєкті — компоненти, здатної до адаптації, самонавчання та оптимізації взаємодії агентів з урахуванням динамічних змін внутрішнього та зовнішнього середовища. Реалізація поставленої мети передбачає формування методичного інструментарію, що забезпечує цифрову інтегрованість, гнучкість та підвищення ефективності організаційно-трудова процесів у будівельному девелопменті на принципах інноваційності та сталого розвитку.

*Нагальність проведення дослідження* обумовлюється потребою модернізації систем управління трудовими ресурсами в будівельній галузі з урахуванням принципів цифрової економіки та сучасних практик будівельного девелопменту. У контексті переходу до інтелектуалізованих девелоперських процесів зростає значення мультиагентних моделей, що забезпечують ефективну координацію розподілу праці між учасниками проєктів, знижуючи рівень невизначеності та підвищуючи продуктивність. Для будівельних підприємств актуальним стає впровадження ІТ-інструментів управління персоналом у цифрові платформи BIM, ERP та PLM, що формують нову організаційну архітектуру праці. Цифровий працівник

виступає активним агентом інформаційної взаємодії, носієм даних та аналітичним учасником управлінських рішень. У таких системах зростає роль цифрового лідерства, алгоритмізації процесів і розвитку когнітивної гнучкості персоналу. Це створює умови для адаптації підприємств до вимог енергоефективного, екологічного та технологічно інтегрованого будівництва. Поєднання мультиагентних моделей із концепцією цифрового працівника формує підґрунтя для переходу від ієрархічного до децентралізованого управління. Такий підхід підвищує конкурентоспроможність і стійкість девелоперських структур у цифровому середовищі.

*У першому розділі* дисертації представлено результати концептуально-теоретичних досліджень, спрямованих на формування наукових основ розробки моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проєктів за умов невизначеності. Проведено системний аналіз розвитку підходів до управління персоналом у будівництві, що здійснювався під впливом цифрової трансформації та динаміки сучасних ІТ-систем. Висвітлено роль інтеграції інноваційних та цифрових технологій у HR-менеджмент будівельних компаній як чинника підвищення продуктивності, адаптивності та стабільності проєктних команд. Розроблено теоретичні засади концепції «цифрового працівника девелоперського проєкту», що виступає активним агентом мультиагентної взаємодії та забезпечує узгодженість процесів планування, координації та прийняття рішень у BIM- і ERP-середовищах. Систематизовано типи невизначеності, притаманні будівельним девелоперським проєктам, визначено їх вплив на поведінкові стратегії агентів та організаційні моделі розподілу трудових ресурсів. Обґрунтовано необхідність трансформації ієрархічних структур управління персоналом у гнучкі, мережеві форми, орієнтовані на цифрову взаємодію та самоорганізацію. Висвітлено ключові принципи цифрового лідерства, розвитку інноваційного потенціалу та адаптивності як основи стійкості мультиагентних систем управління трудовими ресурсами. Показано, що застосування мультиагентних моделей у

поєднанні з цифровими технологіями створює умови для ефективної координації дій учасників проєктів, підвищення продуктивності команд та забезпечення стратегічної стійкості девелоперських структур у цифровому середовищі.

*Другий розділ* дисертаційної роботи присвячено формуванню методичного базису дослідження моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проєктів за умов невизначеності. Методичний базис розроблено із застосуванням комплексу універсальних та спеціальних методів, що забезпечують системність та гнучкість дослідження. До універсальних методів віднесено системний, структурно-функціональний, порівняльний та економіко-математичний аналіз, моделювання і експертні оцінки. Спеціальні методи охоплюють мережеве моделювання, мультиагентне програмування, цифрову симуляцію, а також інструменти адміністративного менеджменту, що дозволяють формалізувати управлінські процеси девелоперського циклу. Інтеграція цих методів забезпечує створення єдиної аналітичної платформи, яка поєднує цифрові технології, управлінські рішення та механізми стратегічної адаптації. У межах розділу обґрунтовано методика оцінювання інноваційної спроможності підприємств-учасників будівельних девелоперських проєктів як ключового чинника їх здатності до управлінських змін. Розроблено інтеграційну модель механізмів нарощування інноваційного потенціалу, що включає технологічні, кадрові, інформаційні, організаційні, фінансові та культурні складові. Значна увага приділена формуванню моделей реактивної адаптації агентів, які імітують поведінку трудових ресурсів у змінних умовах, з урахуванням параметрів нечіткої логіки, сценарного аналізу та ймовірнісних залежностей. На основі цих положень сформовано архітектуру агентної взаємодії, що забезпечує гнучкість і самонавчання системи. Досліджено конфігурацію операційної діяльності девелоперських структур як багаторівневу динамічну систему, яка інтегрує логістичні, фінансові, інформаційно-аналітичні та технологічні

модулі. Такий підхід дозволяє розглядати операційне середовище як мережу взаємодіючих підсистем із різним рівнем автономності та когерентності. Формалізація зв'язків і потоків між модулями здійснена за допомогою топологічних і метричних методів, що дозволяють моделювати структуру у вигляді графа  $G=(H,B)$  з оцінкою інтегрованості через коефіцієнт структурної когерентності. Особливу увагу приділено часовій динаміці конфігурації, де зміни операційної структури моделюються через концепт стратегічно залежної реконфігурації, описаної диференціальними моделями перерозподілу ресурсів. Це створює підґрунтя для прогнозування адаптацій до ринкових, технологічних та фінансових змін. Досліджено взаємозв'язки між конфігурацією операційної діяльності підприємства та його стратегічними орієнтирами, що дозволило визначити оптимальні сценарії ресурсного розподілу. У результаті другий розділ методично обґрунтував побудову інтегрованої мультиагентної моделі, орієнтованої на цифрову трансформацію управління трудовими ресурсами у будівельному девелопменті.

*Третій розділ* дисертаційної роботи узагальнює результати розробки моделей і методів мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проєктів, зосереджуючи увагу на інтеграції інтелектуальних технологій у процес прийняття управлінських рішень. У роботі доведено, що за умов динамічного та невизначеного зовнішнього середовища найбільш ефективним є застосування гібридних підходів, які поєднують мультиагентне моделювання, нечітку логіку, ймовірнісний аналіз і сценарне управління. Інтегрована модель дозволяє моделювати взаємодію автономних агентів — працівників, підрозділів та цифрових систем — з урахуванням їхніх індивідуальних цілей, мотивацій та обмежень. Штучний інтелект у системі виконує роль аналітичного ядра, забезпечуючи адаптивне навчання агентів, прогнозування сценаріїв розвитку подій та оптимізацію стратегічних управлінських рішень.

Особлива увага приділена формуванню інтегрованої функції ефективності, яка об'єднує оцінку ризиків, мотиваційні чинники та ймовірності сценаріїв. Це забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю управлінської системи, підвищуючи стійкість будівельних девелоперських проєктів до змін зовнішнього середовища. Розділ демонструє можливості використання моделі для прогнозування ресурсного забезпечення, планування робочих потоків та прийняття оптимальних рішень у цифрових середовищах BIM, ERP та PLM. Показано, що інтеграція мультиагентних моделей із інтелектуальними алгоритмами підвищує продуктивність, адаптивність і інноваційну спроможність команд. Аналіз результатів підтвердив практичну придатність запропонованої моделі для управління трудовими ресурсами на всіх етапах будівельного девелопменту. Крім того, обґрунтовано її ефективність для підтримки стратегічного планування, оптимізації ресурсних потоків і підвищення конкурентоспроможності підприємств у цифровому середовищі. Таким чином, третій розділ дисертації завершує логіку дослідження, демонструючи інтеграційний потенціал мультиагентних методів і штучного інтелекту в управлінні трудовими ресурсами будівельних проєктів.

*Інноваційною сутністю* представленого дослідження, що вирізняє його значення для науки, є розробка науково-методичного підґрунтя та аналітичного інструментарію для мультиагентного розподілу трудових ресурсів у середовищі будівельних девелоперських проєктів за умов невизначеності. Значного удосконалення набуло науково-методичне забезпечення побудови інтелектуалізованої системи управління трудовими ресурсами, здатної до адаптації, самоорганізації та самонавчання у динамічному цифровому середовищі. Розвинено концепцію «цифрового працівника девелоперського проєкту» як активного агента мультиагентної взаємодії у BIM- та ERP-системах. Вдосконалено методичний апарат оцінювання інноваційної спроможності підприємств-учасників девелоперських проєктів та запропоновано інтеграційну модель нарощування

інноваційного потенціалу, яка поєднує технологічні, кадрові та організаційні чинники, забезпечуючи підвищення ефективності та стійкості управлінських рішень.

*Наукова новизна* роботи полягає у створенні науково-методичного підґрунтя та аналітичного інструментарію, що вдосконалює адміністрування трудових ресурсів у будівельних девелоперських проєктах за умов неповної визначеності. Розвинено концепт «цифрового працівника» та інтелектуалізовану систему управління ресурсами з мультиагентною взаємодією, інтегровану з BIM- і ERP-системами. Удосконалено методику оцінювання інноваційного потенціалу та архітектуру агентної взаємодії, що забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю системи, підвищуючи адаптивність і стійкість проєктів у цифровому середовищі.

***Вперше:***

- сформульовано провідну концептуальну дефініцію дослідження — поняття «мультиагентне управління трудовими ресурсами в будівельній організації в умовах неповної визначеності». Дефініція охоплює процеси координації, розподілу та адаптивного використання трудових ресурсів із залученням цифрових агентів, здатних до самоорганізації та самонавчання. Дефініцію викладено таким чином: «Мультиагентне управління трудовими ресурсами в будівельній організації в умовах неповної визначеності — це система координації, розподілу та адаптивного використання трудових ресурсів із залученням цифрових агентів, які здатні до самоорганізації та самонавчання. Вона забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю організаційної системи, враховуючи ймовірнісні, сценарні та нечіткі чинники. Поняття формалізує мультиагентну взаємодію у середовищі девелоперських проєктів, підвищує стійкість і ефективність управління ресурсами та слугує науковою основою для розвитку цифрових моделей планування та управління трудовим потенціалом».

***Удосконалено:***

- *науково-методичні та аналітичні підходи формування моделі управління трудовими ресурсами в умовах невизначеності в будівельній організації, яка є виконавцем будівельного девелоперського проєкту. Модель регламентує дії будівельного підприємства за наступним алгоритмом: спершу здійснюється аналіз потреб у трудових ресурсах та прогнозування їхньої динаміки з урахуванням невизначеності, формуються цифрові профілі «працівників-агентів» із характеристиками компетенцій, продуктивності та адаптивності. Далі відбувається мультиагентне призначення завдань із урахуванням автономності агентів, командної взаємодії та ресурсного балансу, застосовуються методи нечіткої логіки, ймовірнісного та сценарного аналізу. У процесі виконання робіт здійснюється моніторинг та динамічна адаптація ресурсів, включно з реконфігурацією операційної діяльності, інтеграцією технологічних, кадрових та організаційних факторів і підтриманням цифрової когерентності структур. Оцінюється ефективність управління та ризику, забезпечується самоорганізація та самонавчання агентів для підвищення продуктивності та інноваційного потенціалу. Наприкінці проводиться зворотний зв'язок та постпроєктний аналіз, що дозволяє удосконалювати методологію розподілу ресурсів і підвищувати стійкість організації в цифровому середовищі;*

- *архітектуру агентної взаємодії, яка враховує нечіткість, ймовірності та сценарність поведінки трудових ресурсів. Вдосконалено модель стратегічно залежної реконфігурації операційної діяльності та цифрової когерентності організаційних структур для прогнозування змін ресурсного балансу; методико-прикладний апарат оцінювання інноваційного потенціалу підприємств-учасників проєктів через побудову та обґрунтування інтеграційної моделі нарощування інноваційного потенціалу, що поєднує технологічні, кадрові та організаційні чинники, підвищуючи адаптивність та ефективність управлінських рішень.*

### **Одержав подальший розвиток:**

- *підхід до використання концепту «цифрового працівника девелоперського проєкту» як активного агента мультиагентної взаємодії в BIM- та ERP-системах у процесі адміністрування будівельним проєктом. Це дозволяє забезпечити когерентність процесів планування, координації та прийняття рішень у комплексних девелоперських проєктах;*

- *методико-аналітичний підхід щодо виявлення та протидії відхиленням в інтегрованому стані трудових ресурсів компанії-виконавця девелоперського проєкту. Підхід дозволяє оцінювати стан управлінського та робочого персоналу у динамічній взаємодії агентів та прогнозувати вплив цих відхилень на ефективність виконання будівельного проєкту. Підхід визначає зміст і спрямування комплексу заходів будівельного підприємства з адміністрування трудовими ресурсами, включаючи моніторинг завантаження працівників, коригування розподілу робочих потоків та своєчасну адаптацію стратегій агентів. До складу заходів включено механізми раннього попередження відхилень і забезпечення узгодженості дій між усіма підсистемами організаційної структури щодо персоналу. Враховано сценарну ймовірнісну оцінку ризиків, що виникають у процесі координації робочих і управлінських ресурсів. Інтеграція цих підходів підвищує адаптивність, самонавчання та стійкість системи управління трудовими ресурсами в умовах невизначеності. Реалізація запропонованих заходів забезпечує баланс між автономністю агентів та цілісністю операційної діяльності компанії;*

- *науково-методичний підхід до протидії ризикам у мультиагентному розподілі трудових ресурсів будівельних девелоперських проєктів через комплексну оцінку ефективності та потенційних ризиків управління ресурсами. Застосування інтегрованої функції ефективності дозволяє балансувати автономність агентів і цілісність системи, підвищуючи стабільність операцій. Використовується прогнозування ризиків, пов'язаних із нестачею або надлишком трудових ресурсів, що дає змогу своєчасно коригувати розподіл агентів. Аналіз сценаріїв різних умов проєкту підвищує*

його стійкість і адаптивність, інтегруючи технологічні, кадрові та організаційні чинники та посилюючи здатність системи до самонавчання і самоорганізації в умовах невизначеності;

- гібридний підхід у моделюванні процесів організації будівництва та адміністрування циклом девелоперського проєкту, що об'єднує мультиагентне моделювання, нечітку логіку, ймовірнісний та сценарний аналіз. Створено інтегровану функцію ефективності управління, яка забезпечує баланс між автономністю агентів і цілісністю системи, підвищуючи стійкість та адаптивність девелоперських проєктів у цифровому середовищі.

Результати наукового дослідження знайшли своє застосування в діяльності будівельних та девелоперських компаній ТОВ «Архітектурно-будівельні новації», ТОВ «Фомальгаут-Полімін» та ТОВ «Українська академія інвестицій в науку і будівництво». Запропоновані моделі мультиагентного розподілу трудових ресурсів дозволили оптимізувати завантаження персоналу, прогнозувати сценарії змін у виробничому середовищі та підвищувати продуктивність праці в умовах невизначеності. Окремі результати роботи інтегровані в освітній процес КНУБА під час підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Результати, представлені в роботі, були апробовані при виконанні науково-дослідних робіт в КНУБА (№0124U005196) та Академії будівництва України (№7АБ/МОБ-11.23, секція «Менеджмент інновацій та організація будівництва»).

**Ключові слова:** організація будівництва, мультиагентне моделювання, розподіл трудових ресурсів, будівельні девелоперські проєкти, цифрова інтеграція, адаптивність, агентна взаємодія, цифровий працівник, управління невизначеністю, ВІМ-системи, ERP-системи.

## ABSTRACT

**Danilov S.Yu. Models and methods of multi-agent distribution of labor resources in the environment of construction development projects under conditions of uncertainty.** - *Qualification scientific work in the form of a manuscript.*

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 19 "Architecture and Construction" in the specialty 192 "Construction and Civil Engineering". - Kyiv National University of Construction and Architecture. - Kyiv, 2025.

The dissertation research is devoted to the scientific and methodological substantiation, development and practical verification of models and methods of multi-agent labor resource management in construction development projects under uncertain conditions. The work is aimed at creating an intelligent personnel management system - as a subsystem of construction organization in a development project - a component capable of adaptation, self-learning and optimization of agent interaction taking into account dynamic changes in the internal and external environment. The implementation of the set goal involves the formation of methodological tools that ensure digital integration, flexibility and increased efficiency of organizational and labor processes in construction development on the principles of innovation and sustainable development.

*The urgency of conducting the research* is due to the need to modernize labor resource management systems in the construction industry taking into account the principles of the digital economy and modern practices of construction development. In the context of the transition to intellectualized development processes, the importance of multi-agent models is increasing, ensuring effective coordination of the division of labor between project participants, reducing the level of uncertainty and increasing productivity. For construction companies, the implementation of IT personnel management tools in digital BIM, ERP and PLM platforms, which form a new organizational architecture of work, is becoming relevant. The digital worker acts as an active agent of information interaction, a

data carrier and an analytical participant in management decisions. In such systems, the role of digital leadership, algorithmization of processes and the development of cognitive flexibility of personnel is increasing. This creates conditions for adapting enterprises to the requirements of energy-efficient, environmentally friendly and technologically integrated construction.. This approach increases the competitiveness and sustainability of development structures in the digital environment.

*The first section* of the dissertation presents the results of conceptual and theoretical research aimed at forming the scientific foundations for the development of models and methods for multi-agent distribution of labor resources in the environment of construction development projects under conditions of uncertainty. A systematic analysis of the development of approaches to personnel management in construction, which was carried out under the influence of digital transformation and the dynamics of modern IT systems, was conducted. The role of integrating innovative and digital technologies in the HR management of construction companies as a factor in increasing the productivity, adaptability and stability of project teams was highlighted. The theoretical foundations of the concept of a “digital employee of a development project” were developed, which acts as an active agent of multi-agent interaction and ensures the consistency of planning, coordination and decision-making processes in BIM and ERP environments. The types of uncertainty inherent in construction development projects were systematized, their impact on the behavioral strategies of agents and organizational models of labor resource distribution were determined. The need to transform hierarchical personnel management structures into flexible, networked forms focused on digital interaction and self-organization is substantiated. The key principles of digital leadership, development of innovative potential and adaptability as the basis for the sustainability of multi-agent labor management systems are highlighted. It is shown that the use of multi-agent models in combination with digital technologies creates conditions for effective coordination

of project participants' actions, increasing team productivity and ensuring strategic sustainability of development structures in the digital environment.

*The second section* of the dissertation is devoted to the formation of a methodological basis for the study of models and methods of multi-agent distribution of labor resources in the environment of construction development projects under conditions of uncertainty. The methodological basis was developed using a complex of universal and special methods that ensure the systematicity and flexibility of the study. Universal methods include systemic, structural-functional, comparative and economic-mathematical analysis, modeling and expert assessments. Special methods include network modeling, multi-agent programming, digital simulation, as well as administrative management tools that allow formalizing the management processes of the development cycle. The integration of these methods ensures the creation of a single analytical platform that combines digital technologies, management solutions and mechanisms of strategic adaptation. The section substantiates the methodology for assessing the innovative capacity of enterprises participating in construction development projects as a key factor in their ability to make managerial changes. An integration model of mechanisms for increasing innovative potential has been developed, which includes technological, personnel, information, organizational, financial and cultural components. Considerable attention has been paid to the formation of models of reactive adaptation of agents that simulate the behavior of labor resources in changing conditions, taking into account the parameters of fuzzy logic, scenario analysis and probabilistic dependencies. Based on these provisions, an architecture of agent interaction has been formed, which ensures flexibility and self-learning of the system. The configuration of the operational activities of development structures has been studied as a multi-level dynamic system that integrates logistical, financial, information-analytical and technological modules. This approach allows us to consider the operational environment as a network of interacting subsystems with different levels of autonomy and coherence. The formalization of connections and flows between modules has been carried out

using topological and metric methods, which allow us to model the structure in the form of a graph  $G=(H,B)$  with an assessment of integration through the structural coherence coefficient. Particular attention is paid to the temporal dynamics of the configuration, where changes in the operational structure are modeled through the concept of strategically dependent reconfiguration, described by differential models of resource redistribution. This creates a basis for predicting adaptations to market, technological and financial changes. The interrelationships between the configuration of the enterprise's operational activities and its strategic guidelines are investigated, which allowed us to determine optimal resource allocation scenarios. As a result, the second section methodically substantiated the construction of an integrated multi-agent model focused on the digital transformation of labor resource management in construction development.

*The third, final, section* of the dissertation summarizes the results of the development of models and methods for multi-agent labor resource allocation in the environment of construction development projects, focusing on the integration of intelligent technologies into the process of making managerial decisions. The work proves that in a dynamic and uncertain external environment, the most effective is the use of hybrid approaches that combine multi-agent modeling, fuzzy logic, probabilistic analysis and scenario management. The integrated model allows you to model the interaction of autonomous agents - employees, departments and digital systems - taking into account their individual goals, motivations and limitations. Artificial intelligence in the system plays the role of an analytical core, providing adaptive training of agents, forecasting scenarios of events and optimizing strategic managerial decisions.

Special attention is paid to the formation of an integrated efficiency function that combines risk assessment, motivational factors and scenario probabilities. This provides a balance between agent autonomy and the integrity of the management system, increasing the resilience of construction development projects to changes in the external environment. The section demonstrates the possibilities of using the model for forecasting resource provision, planning workflows and making optimal

decisions in digital environments BIM, ERP and PLM. It is shown that the integration of multi-agent models with intelligent algorithms increases the productivity, adaptability and innovative capacity of teams. The analysis of the results confirmed the practical suitability of the proposed model for managing labor resources at all stages of construction development. In addition, its effectiveness for supporting strategic planning, optimizing resource flows and increasing the competitiveness of enterprises in the digital environment is substantiated. Thus, the third section of the dissertation completes the logic of the study, demonstrating the integration potential of multi-agent methods and artificial intelligence in managing labor resources of construction projects.

*The innovative essence of the presented research*, which distinguishes its significance for science, is the development of a scientific and methodological basis and analytical tools for multi-agent distribution of labor resources in the environment of construction development projects under conditions of uncertainty. The scientific and methodological support for building an intellectualized labor resource management system capable of adaptation, self-organization and self-learning in a dynamic digital environment has been significantly improved. The concept of a “digital employee of a development project” has been developed as an active agent of multi-agent interaction in BIM and ERP systems. The methodological apparatus for assessing the innovative capacity of enterprises participating in development projects has been improved and an integration model for increasing innovative potential has been proposed, which combines technological, personnel and organizational factors, ensuring increased efficiency and sustainability of management decisions.

*The scientific novelty* of the work lies in the creation of a scientific and methodological basis and analytical tools that improve the administration of labor resources in construction development projects under conditions of incomplete certainty. The concept of a "digital worker" and an intellectualized resource management system with multi-agent interaction, integrated with BIM and ERP systems, have been developed. The methodology for assessing innovative potential

and the architecture of agent interaction have been improved, which ensures a balance between agent autonomy and system integrity, increasing the adaptability and sustainability of projects in a digital environment.

***For the first time:***

- the leading conceptual definition of the study is formulated - the concept of "multi-agent management of labor resources in a construction organization under conditions of incomplete certainty". The definition covers the processes of coordination, distribution and adaptive use of labor resources with the involvement of digital agents capable of self-organization and self-learning. The definition is stated as follows: "Multi-agent management of labor resources in a construction organization under conditions of incomplete certainty is a system of coordination, distribution and adaptive use of labor resources with the involvement of digital agents capable of self-organization and self-learning. It provides a balance between the autonomy of agents and the integrity of the organizational system, taking into account probabilistic, scenario and fuzzy factors. The concept formalizes multi-agent interaction in the environment of development projects, increases the stability and efficiency of resource management and serves as a scientific basis for the development of digital models of planning and management of labor potential".

***Improved:***

- scientific, methodological and analytical approaches to the formation of a model of labor resource management under conditions of uncertainty in a construction organization that is the executor of a construction development project. The model regulates the actions of a construction enterprise according to the following algorithm: first, an analysis of labor resource needs and forecasting their dynamics is carried out, taking into account uncertainty, digital profiles of "agent workers" are formed with the characteristics of competencies, productivity and adaptability. Next, multi-agent task assignment takes place, taking into account the autonomy of agents, team interaction and resource balance, fuzzy logic, probabilistic and scenario analysis methods are used. In the process of performing work, monitoring and dynamic adaptation of resources is carried out, including the

reconfiguration of operational activities, the integration of technological, personnel and organizational factors and maintaining the digital coherence of structures. Management efficiency and risks are assessed, self-organization and self-learning of agents are ensured to increase productivity and innovative potential. At the end, feedback and post-project analysis are carried out, which allows improving the resource allocation methodology and increasing the organization's resilience in the digital environment;

- the architecture of agent interaction, which takes into account the fuzziness, probabilities and scenario behavior of labor resources. The model of strategically dependent reconfiguration of operational activities and digital coherence of organizational structures for predicting changes in the resource balance has been improved; methodological and applied apparatus for assessing the innovative potential of enterprises participating in projects through the construction and substantiation of an integration model of increasing innovative potential, which combines technological, personnel and organizational factors, increasing the adaptability and effectiveness of management decisions.

***Further development has been made:***

- an approach to using the concept of a "digital employee of a development project" as an active agent of multi-agent interaction in BIM and ERP systems in the process of administering a construction project. This allows to ensure coherence of planning, coordination and decision-making processes in complex development projects;

- methodological and analytical approach to identifying and counteracting deviations in the integrated state of labor resources of the company-executor of the development project. The approach allows to assess the state of managerial and working personnel in the dynamic interaction of agents and to predict the impact of these deviations on the efficiency of the construction project. The approach determines the content and direction of the complex of measures of the construction enterprise for the administration of labor resources, including monitoring of employee workload, adjustment of the distribution of work flows

and timely adaptation of agent strategies. The measures include mechanisms for early warning of deviations and ensuring consistency of actions between all subsystems of the organizational structure regarding personnel. Scenario-probabilistic risk assessment of the coordination of labor and management resources increases the adaptability, self-learning, and stability of their management system in conditions of uncertainty, ensuring a balance between the autonomy of agents and the integrity of the company's operational activities;

- a scientific and methodological approach to countering risks in the multi-agent distribution of labor resources of construction development projects through a comprehensive assessment of the efficiency and potential risks of resource management. The use of an integrated efficiency function allows balancing the autonomy of agents and the integrity of the system, increasing the stability of operations. Forecasting of risks associated with a shortage or excess of labor resources is used, which allows for timely adjustment of the distribution of agents. In addition, the analysis of scenarios of various project conditions ensures its increased stability and adaptability. This approach integrates technological, personnel and organizational factors, strengthening the system's ability to self-learn and self-organize in conditions of uncertainty;

- a hybrid approach to modeling the processes of organizing construction and administering the development project cycle, which combines multi-agent modeling, fuzzy logic, probabilistic and scenario analysis. An integrated management efficiency function has been created, which provides a balance between agent autonomy and system integrity, increasing the stability and adaptability of development projects in a digital environment.

The results of the scientific research have found their application in the activities of construction and development companies LLC "Architectural and construction innovations", LLC "Fomalhaut-Polimin" and LLC "Ukrainian Academy of Investments in Science and Construction": the proposed models of multi-agent distribution of labor resources allowed to optimize personnel

workload, predict scenarios of changes in the production environment and increase labor productivity in conditions of uncertainty. Some r

**Keywords:** construction organization, multi-agent modeling, labor distribution, construction development projects, digital integration, adaptability, agent interaction, digital worker, uncertainty management, BIM-systems, ERP systems.