

УДК 69.05

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ
РОЗРАХУНКУ ТРИВАЛОСТІ БУДІВНИЦТВА**

Алтухова Д.В., аспірант,
Київський національний університет будівництва і архітектури
altuhova.daria@gmail.com

Анотація. Дотримання календарного графіку проведення робіт має прямий вплив на тривалість будівництва та його вартість. Вдосконалення методичних принципів календарного планування дозволить вирішити проблеми перевищення термінів будівництва. Метою дослідження є розробка адекватного методу визначення тривалості будівництва при його стохастичному характері. Було розроблено принципи визначення коефіцієнта чутливості; структурну модель процесу будівництва об'єкта; математичну модель для визначення тривалості будівництва з урахуванням чутливості робіт до різних чинників, за яких виникає відхилення від запланованого графіка робіт.

Ключові слова: строк будівництва, календарне планування, коефіцієнт чутливості.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
РАСЧЕТА ДЛИТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

Алтухова Д.В., аспірант,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры
altuhova.daria@gmail.com

Аннотация. Соблюдение календарного графика проведения работ имеет прямое влияние на длительность строительства и его стоимость. Совершенствование методических принципов календарного планирования позволит решить проблемы превышения сроков строительства. Целью исследования является разработка адекватного метода определения продолжительности строительства при его стохастичном характере. Разработаны принципы определения коэффициента чувствительности; структурная модель процесса строительства объекта; математическая модель для определения продолжительности строительства с учетом чувствительности работ к разным факторам, из-за которых возникает отклонение от запланированного графика работ.

Ключевые слова: срок строительства, календарное планирование, коэффициент чувствительности.

**MATHEMATICAL MODEL
CALCULATING THE DURATION OF CONSTRUCTION**

Altukhova D., postgraduate student,
Kiyv National University of Construction and Architecture
altuhova.daria@gmail.com

Abstract. Improvement of the methodological principles of scheduling allows to solve the

problems of exceeding the terms of construction. Compliance to the calendar plan of works has a direct impact on the construction's duration and its cost. The aim of the research is developing of an adequate method of determining the duration of construction with considering its stochastic character for increasing the reliability of scheduling. The following items were developed in the research: the principles for determining the sensitivity coefficient of works, taking into account possible disruption of the schedule planned at standards; structural model of the object construction process; mathematical model for determining the duration of construction, with considering the sensitivity of the work to various factors, which are the cause of deflections from the planned terms. The practical application of developments will ensure a high accuracy of determining the total duration of construction, its separate stages and installation works. It will allow to synchronize planned and actual construction parameters.

Keywords: duration of construction, scheduling, coefficient of sensitivity.

Постановка проблеми та її зв'язок з науковими завданнями. Вдосконалення методичних принципів календарного планування дозволить вирішити ряд проблем в області будівництва, до яких відносяться: неправильний розподіл коштів і нереальні терміни виконання робіт часте перевищення термінів будівництва і витрат на нього; простої робітників і техніки; низька продуктивність; невисока якість виробленої продукції [1].

Собівартість будівництва залежить від правильної організації виробництва робіт. Причинами перевищення термінів будівництва може бути: недолік ресурсів, недостатня кваліфікація і визначені без всебічного дослідження терміни виконання будівельно-монтажних робіт [2].

Несвоєчасність завершення будівельних проектів обумовлена подіями, які можна об'єднати в одну групу «ризиків несвоєчасного виконання робіт» [3].

Врахування стохастичного характеру будівельного виробництва дозволить підвищити надійність календарних планів [4]. Імовірнісний характер будівельного виробництва полягає в тому, що воно функціонує в умовах схильного до змін середовища (плинність кадрів, перебої в постачанні, випадкові поломки машин і механізмів, зміна погоди тощо) [3].

Визначення оптимальної тривалості возведення об'єктів при імовірнісному характері будівництва є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій у науковій літературі. Визначення тривалості будівництва об'єктів за усередненими показниками може бути проведено згідно нормативним документам [5].

Однак, зазначені норми мають ряд недоліків, до яких відносяться: показники норм не оптимізовані за вартістю і часу, а тому відображають середньостатистичні жорсткі умови виробництва робіт і не мінімізують всю сукупність витрат; при встановленні норми враховуються в основному організаційно-технологічні показники, тоді як, в умовах ринкових відносин, вагоме значення мають договірні ціни і економічні стимули; норми тривалості будівництва не пов'язані з рівнем матеріально-технічної бази будівництва, чисельністю, спеціальністю і кваліфікацією персоналу.

Найбільш важливим є дотримання графіку проведення будівельно-монтажних робіт, оскільки ступінь готовності фронту робіт (забезпечена тільки при дотриманні графіка) відображає організаційно-технологічну ув'язку різномірних будівельних процесів (матеріальних ресурсів, персоналу, техніки тощо) в реальному часі, надає прямий вплив на тривалість будівництва та його вартість [6, 7].

Практика планування базується на розрахунку тривалостей робіт, виходячи з їх трудомісткості (машиноємкості) і прийнятої кількості робочих (машин). У той же час на тривалість робіт впливають різні дестабілізуючі чинники, які призводять до зриву запланованих термінів виконання робіт. Зрив термінів окремих робіт призводить до того, що календарний план втрачає свій сенс. Потрібно його коригування, зміна строків виконання робіт, завантаження машин і механізмів, використання робочої сили [8-10].

Постановка завдання. Метою роботи є побудова структурної моделі процесу будівництва об'єкта, розробка адекватної математичної моделі для визначення тривалості будівництва при його імовірнісним характері, враховуючи сенситивність будівельно-монтажних робіт до різних зовнішніх і внутрішніх чинників, які викликають відхилення від запланованого графіка робіт.

Виклад основного матеріалу дослідження з новим обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Однозначно можна стверджувати, що стабільність у виконанні робіт (відсутність зривів календарного графіка) буде вищою там, де менше вплив чинників ризику. Якщо фактична тривалість проведення будівельно-монтажних робіт (БМР) збігається з запланованими величинами, то вартість будівництва буде менше, ніж при наявності зривів календарного графіка. Зазначимо також, що будівельні норми не малися на увазі фахівцями як догма. У різних стандартах можна знайти рекомендації щодо перевищення норм, як припущення щодо перевиконання плану.

В умовах ринкових відносин, приватної власності на засоби виробництва, будівельні організації, з об'єктивних і суб'єктивних причин, мають різні можливості. Усереднення норм і їх рекомендації по будівельній галузі були виправдані в умовах державної власності на засоби виробництва і приблизно рівного оснащення будівельних організацій (документацією, будівельною технікою, кадровим потенціалом тощо).

В тих будівельних організаціях, де створені умови для перевищення норм, класичне планування (методи розрахунку) тривалості проведення робіт буде гальмувати будівництво (можна і швидше будувати), в інших, де, з різних причин, немає умов (можливостей) виконати БМР зі швидкістю, що задається при використанні загальнобудівельних норм, там будуть постійні зриви графіка роботи, авральні заходи, постійне коригування графіка, зростання вартості будівництва.

Нормативні документи (ДСТУ Б А.3.1-22:2013) враховують за допомогою коефіцієнтів конкретні умови зведення об'єкта: ущільненість забудови, складні інженерно-технічні умови, сейсмонезбезпечні умови, конструктивні особливості будинку, але не враховують сприйнятливості БМР до впливу чинників невизначеності.

Під сенситивністю розуміється сприйнятливість БМР до чинників невизначеності (ризиків), які можуть бути виявлені шляхом дослідження впливу різних чинників на хід і тривалість проведення процесу будівництва.

Рівень впливу чинників на виконання БМР позначимо як коефіцієнт сенситивності K_c , який дорівнює відношенню тривалості виконання робіт, що визначається з урахуванням впливу чинників невизначеності в умовах конкретної забудови, до тривалості виконання тих же будівельно-монтажних робіт, що визначається за будівельними нормами. Коефіцієнт сенситивності розраховується за формулою:

$$K_c = \frac{T_z}{T_n}, \quad (1)$$

де T_z – термін виконання будівельно-монтажних робіт, визначений з урахуванням умов здійснення конкретної забудови і потенціалу будівельної організації;

T_n – термін виконання будівельно-монтажних робіт, визначений за будівельними нормами.

Використання коефіцієнту сенситивності дозволить підвищити точність визначення тривалості проведення БМР (об'єктивність календарного планування), враховуючи конкретні умови будівництва, а саме, можливості будівельної організації-підрядника, організацій-постачальників сировини і матеріалів, зовнішні умови, логістику, різні чинники невизначеності тощо. Отримання оптимальної (найбільш ймовірної) тривалості проведення робіт при плануванні, зменшить зриви календарного графіка, дозволить враховувати вплив ризиків і вживати заходів щодо їх подолання, підвищити конкурентоспроможність

організації, поліпшити якість планування на етапі підготовки будівництва.

Визначенням рівня впливу внутрішніх та зовнішніх чинників на виконання БМР в будівельній організації займаються уповноважені особи, які планують будівельний процес. Це мають бути спеціалісти в області планування, у яких є відповідний досвід та повна інформація щодо об'єктів будівництва. Це може бути, наприклад, начальник відділу капітального будівництва, начальник відділу підготовки виробництва, менеджер проекту, головний інженер, спеціалісти проектно-кошторисного відділу, спеціалісти проекту організації будівництва.

Величина коефіцієнту сенситивності K_c може бути оцінена за принципом, що показаний в табл. 1, виходячи з ймовірності відхилень термінів виконання будівельно-монтажних робіт, які проводяться при різних місцевих умовах, від календарного графіка, складеного шляхом обчислення тривалості робіт за будівельними нормами.

Таблиця 1 – Визначення коефіцієнту сенситивності

№п/п	Оцінка можливості зриву календарного графіка	Коефіцієнт сенситивності
1	Кількість ресурсів, техніки, чисельність, спеціальність і кваліфікація персоналу – недостатні; збої в термінах виконання робіт імовірні	>1
2	Кількість ресурсів, техніки, чисельність, спеціальність і кваліфікація персоналу – не сприяє ефективній роботі, але грамотне управління, вжиття заходів (матеріальне стимулювання, переведення додаткових ресурсів на об'єкт тощо) дозволяє виконати роботи вчасно	1
3	Кількість ресурсів, техніки, чисельність, спеціальність і кваліфікація персоналу – достатня для виконання будівельно-монтажних робіт з високою продуктивністю і якістю, найбільш ймовірно виконання робіт з випередженням графіка	<1

Передбачається, що в умовах реальних будівельних організацій величина $K_c = 0,7-1,3$. $K_c > 1,3$ малоімовірна, тому що в будівельних нормативах норми досить високі, а якщо потрібно $K_c < 0,7$, то такі будівельні організації не будуть конкурентоспроможними.

На рис. 1 наведена структурна модель процесу будівництва об'єкта. Аналіз структурної моделі процесу будівництва об'єкта проведено з застосуванням різних методів системного підходу, в результаті якого визначена структура системи, характер взаємодії елементів і знайдено її наочне уявлення.

На тривалість і вартість будівництва житлових будинків, завантаження ресурсів, перш за все, впливає послідовність проведення робіт, обумовлена технологією будівельних процесів.

Типовий вид залежності швидкості виконання робіт V та вартості будівництва C від кількості ресурсів u наведено на рис. 2 (u_{opt} – оптимальна кількість ресурсів за критерієм мінімальної вартості будівництва).

Спочатку із зростанням кількості ресурсів середня швидкість виконання робіт підвищується прямо пропорційно, а потім темп підвищення починає падати у зв'язку з конфліктом просторів. Вартість будівництва має оптимальні величини. За малої кількості ресурсів робота рухається повільно, тривалість будівництва – велика, спостерігається нестача ресурсів, великі втрати на кредитування робіт (банківський відсоток), втрати на

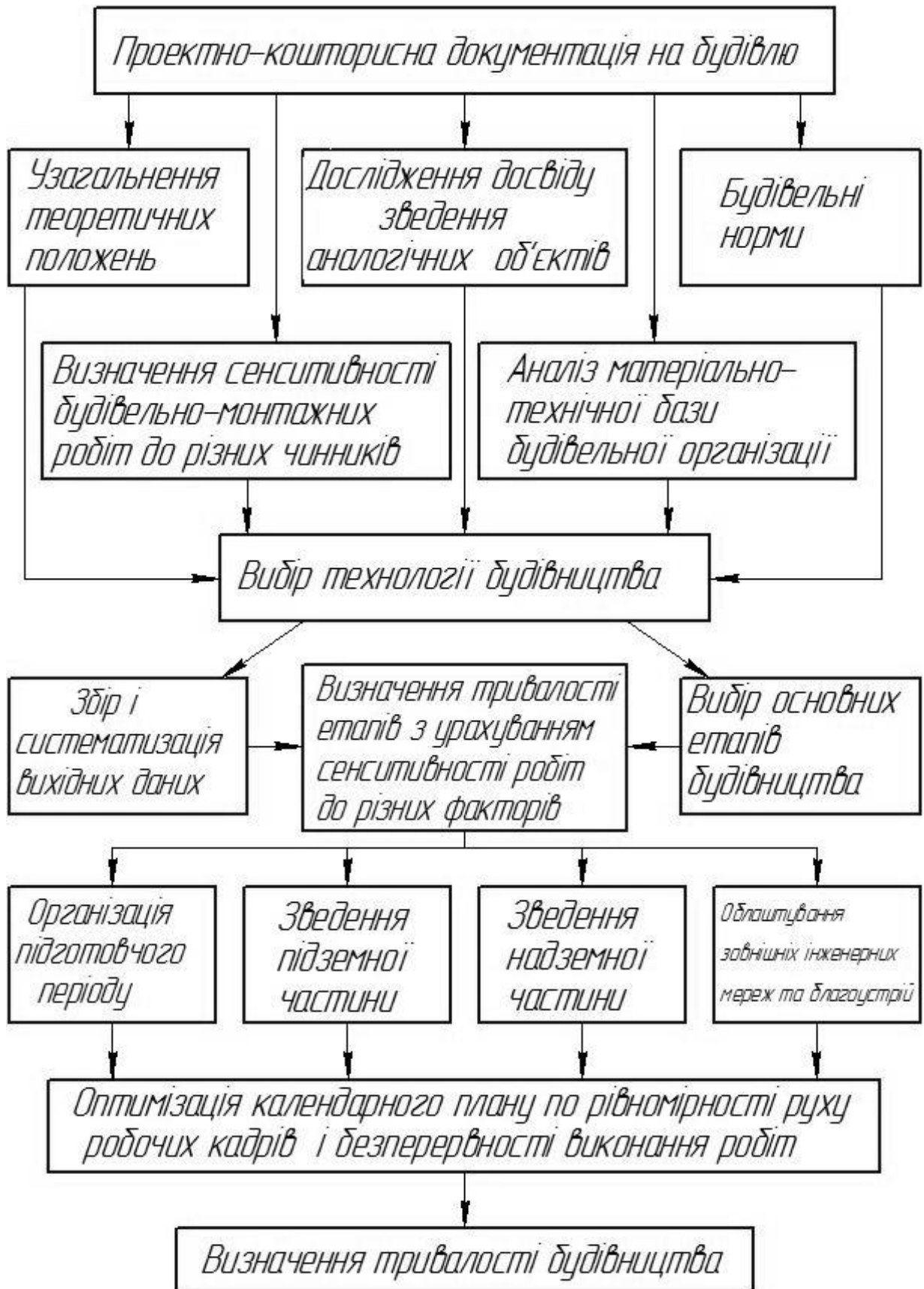


Рис. 1. Структурна модель процесу будівництва об'єкта

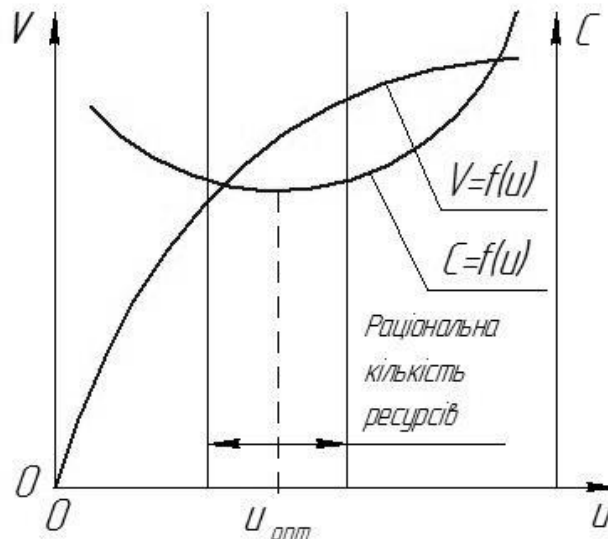


Рис. 2. Залежність швидкості виконання робіт V та вартості будівництва C від кількості ресурсів u

інфляції, втрати на незавершене будівництво. Якщо ресурсів багато, то частина з них буде простоювати, при проведенні паралельних робіт буде спостерігатися зниження продуктивності праці у зв'язку зі стиснутістю, продуктивність праці падає, вартість будівництва зростає.

Проведемо розробку математичної моделі для визначення тривалості будівництва при його імовірнісним характері, з урахуванням сенситивності будівельно-монтажних робіт до різних зовнішніх і внутрішніх чинників.

Оптимальна тривалість будівництва $T_{опт}$, при якій буде мінімальна собівартість (але продуктивність – висока), визначається по залежності:

$$T_{\min} < T_{опт} < T_{\max} , \quad (2)$$

де T_{\max} – максимальна тривалість проекту, обумовлена залученням незначних (мінімальних) ресурсів (техніка, персонал, фінанси тощо) при великих витратах на незавершене будівництво;

T_{\min} – мінімальна тривалість проекту, обумовлена залученням максимальних ресурсів (техніка, персонал, фінанси тощо) при неефективному їх використанні.

Управління роботами завжди присутнє, але запропонований розрахунок дозволяє зменшити ризик зриву термінів здачі об'єкта, так як закладається резерв на випадок ймовірних збоїв (наприклад, поломка техніки, брак матеріалів, крадіжка, хвороби персоналу тощо), при прискоренні роботи там, де для цього створені відповідні умови.

Сумарна тривалість робіт (в робочих днях), з урахуванням паралельно виконуваних робіт, визначається за формулою:

$$\begin{aligned} & \sum_1^i \frac{Q_i \cdot K_{npi} \cdot K_{ni}}{n_{i \max} \cdot 3_{i \max}} + \sum_1^j \left(\frac{W_j \cdot K_{npj} \cdot K_{nj}}{P_{zj} \cdot 3_{j \max}} + \frac{T_{nj} \cdot K_{nj}}{3_{jp \max}} \right) + \sum T_o < \\ & < \sum_1^i \frac{Q_i \cdot K_{ci} \cdot K_{ni} \cdot K_{npi}}{n_{iopt} \cdot 3_{iopt}} + \sum_1^j \left(\frac{W_j \cdot K_{npj} \cdot K_{nj} \cdot K_{cuj}}{P_{zj} \cdot 3_{jopt}} + \frac{T_{nj} \cdot K_{cnj} \cdot K_{nj}}{3_{jpopt}} \right) + \sum T_o < \quad (3) \\ & < \sum_1^i \frac{Q_i}{n_{imin} \cdot 3_{imin}} + \sum_1^j \left(\frac{W_j}{P_{zj} \cdot 3_{jmin}} + \frac{T_{nj}}{3_{jmin}} \right) + \sum T_o \end{aligned}$$

де Q_i – трудомісткість робіт, при яких задіяний тільки персонал; обчислена за будівельними нормативами, люд.-дні;

K_{ci} ; K_{cej} ; K_{cnj} – коефіцієнти сенситивності, відповідно, при проведенні робіт із задіяним персоналом, при виконання робіт з застосуванням комплекту машин, при виконанні підготовчих робіт;

$n_{i\min}$; n_{iopt} ; n_{imax} – кількість робітників: мінімально можлива, оптимальна, максимально можлива, які будуть виконувати роботу Q_i ;

$Z_{i\min}$; Z_{iopt} ; Z_{imax} ; $Z_{j\min}$; Z_{jopt} ; Z_{jmax} ; $Z_{jp\min}$; Z_{jpmax} ; Z_{jropt} – кількість змін у добі (мінімальне, оптимальне, максимально можливе по техніці безпеки);

K_{ni} ; K_{nj} – коефіцієнти паралельності проведення робіт (без обліку зниження продуктивності праці у зв'язку зі стисненістю);

W_j – об'єм робіт, виконуваний при застосуванні комплекту машин;

P_{zj} – змінна продуктивність комплекту машин;

T_{nj} – тривалість підготовки машин до виконання робіт (монтаж, опробування);

T_o – втрати часу на технологічні обмеження (тверднення бетону, висихання фарби тощо);

K_{npi} ; K_{npj} – коефіцієнт, що враховується при проведенні паралельних робіт, що враховує зниження продуктивності праці у зв'язку зі стисненістю.

Коефіцієнти паралельності проведення робіт розраховуємо наступним чином. Якщо, наприклад, проводиться паралельно дві роботи, то для першої роботи $K_{n1} = 1$. Для другої роботи величина K_n залежить від того, яка частина часу проведення цієї роботи вже врахована в розрахунку часу проведення першої роботи. При повному суміщенні робіт $K_{n2} = 0$; при неповному суміщенні: $0 < K_{n2} < 1$. З урахуванням залежностей (2) і (3), визначимо оптимальну тривалість будівництва:

$$T_{opt} = \sum_1^i \frac{Q_i \cdot K_{ci} \cdot K_{ni} \cdot K_{npi}}{n_{iopt} \cdot Z_{iopt}} + \sum_1^j \left(\frac{W_j \cdot K_{npj} \cdot K_{nj} \cdot K_{cej}}{P_{zj} \cdot Z_{jopt}} + \frac{T_{nj} \cdot K_{cnj} \cdot K_{nj}}{Z_{jropt}} \right) + \sum T_o \quad (4)$$

Необхідно прагнути до рівномірного використання ресурсів. При цьому сумарна кількість одночасно використовуваних ресурсів в ідеальному випадку повинна дорівнювати загальній кількості ресурсів.

Застосування на практиці розроблених рекомендацій дозволить забезпечити високу точність визначення загальної тривалості будівництва житлових будинків в цілому, тривалості етапів будівельно-монтажних робіт і їх поєднання між собою в часі, що, в свою чергу, дозволить синхронізувати планові, запроєктовані та фактичні параметри будівництва.

Висновки, зроблені в результаті дослідження і перспективи подальших досліджень.

При виконанні дослідження було розроблено:

1. Принципи визначення коефіцієнта сенситивності з урахуванням можливого зриву календарного плану, запланованого за нормативами.
2. Структурну модель процесу будівництва об'єкта.
3. Математичну модель для визначення тривалості будівництва. Модель враховує імовірнісний характер будівництва, можливості будівельної організації і місцеві умови.

У подальших дослідженнях планується уточнення застосовуваних в математичній моделі коефіцієнтів, при плануванні будівель різного конструктивного виконання.

Література

1. Netscher P. Successful Construction Project Management: The Practical Guide / P. Netscher. PO Box 2119, Subiaco, 6904, Australia. – 2014. – 256 p.
2. Алтухова Д.В. Системний підхід до безперервного вдосконалення календарного планування будівництва / Д.В. Алтухова // Будівельне виробництво: міжвідомчий науково-технічний збірник. – № 62/1, 2017. – С. 108-112.
3. Алтухова Д.В. Календарне планування з урахуванням стохастичного характеру будівельного виробництва / Д.В. Алтухова // Матеріали V Міжнародної науково-методичної конференції «Математичні методи, моделі та інформаційні технології в економіці». – Чернівці, 2017. – С. 15-16.
4. Млодецкий В.Р. Вероятностные параметры работ в составе календарного плана / В.Р. Млодецкий, А.А. Мартыш // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – № 9. – 2012. – С. 15-20.
5. Визначення тривалості будівництва об'єктів: ДСТУ Б А.3.1-22:2013. – Офіц. вид. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 34 с.
6. Лапидус А.А. Формирование организационно-технологического потенциала производства кровельных конструкций жилых многоэтажных зданий / А.А. Лапидус, А.Н. Макаров // Вестник Московского государственного технического университета. – № 8. – 2015. – С. 150-160.
7. Григорьев В.А. Разработка укрупненных моделей нормирования продолжительности строительства полносборных жилых зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08 / Григорьев Владимир Александрович. – М., 2015. – 184 с.
8. Кузьмич П.М. Расчет календарных планов с вероятностными временными параметрами работ / П.М. Кузьмич, Л.П. Махнист, Н.В. Михайлова // Вестник Брестского государственного технического университета. – № 1. – 2013. – С. 139-142.
9. Машевська М. Побудова моделі оцінювання параметрів теплового комфорту на основі нечіткої логіки / М. Машевська, П. Ткаченко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2010. – № 686. – С. 91-96. <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/8270>
10. Шатрова І.А. Оптимізація тривалості робіт житлового будівництва: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08 / Шатрова Інна Анатоліївна. – Київ, 2006. – 173 с.

Стаття надійшла 18.10.2017