

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 658.512.62:69-049.6

О. О. МАРТИШ<sup>1\*</sup>, О. П. МАРТИШ<sup>2</sup>, Ф. І. ПАВЛОВ<sup>3</sup>,  
Н. С. РИНКЕВИЧ<sup>4</sup>, І. О. МИХАЙЛОВА<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра планування і організації виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (095) 905 86 75, ел. пошта martysh@yahoo.com, ORCID 0000-0002-8864-2555

<sup>2</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 76, ел. пошта tsp@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-6126-1920

<sup>3</sup> Кафедра планування і організації виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38(056) 756 33 66, ел. пошта pavloved@ukr.net, ORCID 0000-0002-4442-9277

<sup>4</sup> Кафедра планування і організації виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38(056) 756 33 66, ел. пошта starnarysharm@gmail.com, ORCID 0000-0002-1229-6051

<sup>5</sup> Кафедра планування і організації виробництва, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38(056) 756 33 66, ел. пошта innakorchnomnaya@gmail.com, ORCID 0000-0002-3647-3972

### ПІДВИЩЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ КАЛЕНДАРНИХ ПЛАНІВ БУДІВНИЦТВА

**Мета.** Визначення раціонального рівня організаційно-технологічної надійності часових параметрів календарного плану. **Методика.** Розглянуто чинники, які впливають на час виконання будівельно-монтажних робіт в складі календарного плану. Використано підхід, згідно з яким час завершення певного обсягу робіт є похідним від продуктивності виконавця і інтенсивності виконання робіт. Тривалість робіт є не детермінованим значенням, а діапазоном (проміжком) можливих значень, які можна описувати за допомогою нормального розподілу,  $\beta$ -розподілу і  $\alpha$ -розподілу. **Результати.** Встановлено взаємозв'язок між виробітком виконавців і надійністю виконання робіт в планові строки. Визначено раціональний рівень організаційно-технологічної надійності календарного плану будівництва на етапі моделювання його часових параметрів. **Наукова новизна.** Удосконалено метод розрахунку будівельного потоку з урахуванням ймовірності термінів виконання робіт, що дозволяє кількісно оцінити динаміку наростання невизначеності в термінах виконання робіт в складі об'єктного будівельного потоку. Новий підхід планування часових параметрів дозволяє контролювати зміни надійності в процесі виконання плану. Отримані результати формують базу для подальшого розрахунку інтенсивностей відмов і раціонального режиму управління. **Практична значимість.** Розрахунок часових параметрів будівельних потоків з урахуванням дестабілізуючого впливу випадкових факторів зовнішнього і внутрішнього середовища дозволяє наблизити спроектовані на їх основі календарні плани будівництва об'єктів до реальних умов, які мають місце на етапі реалізації цих планів.

*Ключові слова:* календарне планування, організаційно-технологічна надійність, інтенсивність робіт, виробіток, витрати часу

#### Вступ

Організаційно-технологічна надійність будівництва, визначає здатність будівельної організації досягати поставлених цілей при заданих вхідних параметрах. Такими параметрами є: кількісний і кваліфікаційний рівні робітників, технічні характеристики машин і механізмів, якість будівельних матеріалів, своєчасність їх поставки на будівельний майданчик тощо. Організаційно-технологічна надійність будівель-

ного виробництва розглядається як критерій надійності кінцевих результатів.

При розробці календарного плану існує протиріччя між ймовірнісною природою реальних процесів і детермінованими методами їх опису. Коли розрахунки мають прогнозуючий характер, то необхідно включати в розрахунок вірогідну складову, що визначає ймовірність звершення певної події в майбутньому. Це особливо стосується побудови календарних планів, через те, що прогнозування показників трива-

лості виробничих процесів може здійснюватися тільки з певним рівнем ймовірності. Планування – це завжди узгодження об'єктивних протиріч між сьогоднішнім баченням процесу будівництва і його майбутньою реалізацією. Будівництво споруди – це безліч окремих робіт, що виконуються одна за одною. Порушення строків виконання однієї з них, викликає ланцюжкову реакцію затримок. Виконання окремих робіт, як правило, доручається підрядним організаціям. Час початку їх діяльності визначається заздалегідь, зазвичай це конкретна дата. Коли підрядник не може почати виконувати свої обов'язки через неготовність фронту робіт, що викликана порушенням строків попередніх робіт, це може стати причиною економічних втрат і юридичних проблем.

Оскільки надійність закладених у календарний план параметрів є важливою проблемою в будівництві, актуальним є дослідження шляхів її підвищення. Потрібно звернути поглиблену увагу на визначення часових параметрів будівельних процесів у складі календарного плану. Необхідно дослідити, який закон розподілу найбільш точно характеризує діапазон можливих значень часу виконання робіт, а також вплив стабільності виробітку на цей діапазон і на надійність завершення робіт в строки.

Дослідження організаційно-технологічної надійності почалися в другій половині 20 століття. Основні поняття організаційної надійності були визначені ще в 1974 році [1], після чого об'єктами досліджень були календарне планування і поточний метод ведення будівельних робіт [2]. За першими дослідниками проблемою надійності займалися багато вчених, вирішуючи різні задачі і ставлячи перед собою нові проблеми для вирішення.

Проблема організаційно-технологічної надійності будівництва не вирішена і продовжує бути предметом досліджень сучасних вчених. При цьому вона розглядається з різних боків в залежності від підходу автора досліджень.

В роботі [3] описується використання інструментів теорії ймовірності і методу експертних оцінок для визначення і порівняння організаційної надійності механізованих та ручних робіт. Визначаються фактори, що впливають на продуктивність робітників, зазначені навіть такі дрібниці, як зменшення продуктивності в післяобідні години. Однак залишається про-

блема урахування непередбачуваних затримок на стадії розробки плану робіт.

Жоден з існуючих методів планування не забезпечує автоматичного уникнення ризику зриву строків будівництва. Втім в країнах заходу широко застосовувана система «The Last Planner», яка наслідуює переваги методу критичного шляху (CPM – Critical path method) [4]. Така система спрощує розробку графіку робіт, але не вирішує проблему взаємозв'язку між планами різного масштабу – оперативними, середньої тривалості та довгостроковими. Інший підхід до аналізу відхилень при реалізації календарних планів – так зване аналітичне дерево помилок (fault tree analysis) [5]. Це дерево представляє собою блок-схему, яка сприяє виявленню факторів, які викликають відхилення від запланованих строків у будівництві. Однак цей підхід, як зазначається в роботі, досить громіздкий.

В роботі [6] пропонується розробка паралельних графіків для виробництва робіт на будівельному майданчику і для збірки елементів поза майданчиком. Показано, що такий підхід в деяких випадках скорочує час будівництва на 30 %. Однак, така система, хоч і сприяє зменшенню часу виконання робіт, не завжди може бути використана. Наприклад, при будівництві монолітної споруди не має місця для збірних елементів.

Покращеним варіантом методу критичного шляху (CPM – Critical path method) деякі дослідники вважають «систему управління на основі місцезнаходження» (LBMS – location-based management system) [7, 8]. Ця система робить акцент на використанні ресурсів і дозволяє організувати роботу без зайвих перерв для виконавців. До цієї ніші досліджень також можна віднести так званий евристичний (тобто «не строгий») алгоритм формування і розрахунку проекту виробництва робіт, описаний в роботі [9]. Втім, зостається питання надійності виконання робіт в строки тим чи іншим виконавцем.

В роботі [10] як основний метод підвищення надійності при реалізації календарного плану пропонується поточний контроль виробництва робіт. Доводиться ефективність такого способу при використанні моделювання «Монте-Карло» при будівництві комплексу будівель. Ця методика й справді є ефективною, але має інше застосування – лише при будівництві черги декі-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

льких однотипних будівель, коли ресурси і механізми переходять з об'єкта на об'єкт.

В роботах [11, 12] описуються схожі підходи до вирішення проблеми низької надійності календарного плану. Пропонується використання резервів часу – буферів, які повинні нівелювати ризик затримок в виконанні окремих робіт календарного графіку. Величина буферу часу залежить від послідовності робіт, їх взаємозв'язку і критичності (більш важливі чи менш важливі роботи). Однак, було б добре мати можливість визначення таких буферів часу на підставі індивідуальних характеристик виконавців.

Питанню визначення тривалості будівельних процесів з урахуванням ймовірності присвячені дослідження в роботах [13] і [14].

Наразі аналіз публікацій дозволяє стверджувати доцільність досліджень у цьому напрямку.

### Мета

Метою досліджень є визначення раціонального рівня організаційно-технологічної надійності часових параметрів календарного плану.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

1. Проаналізувати, який із існуючих статистичних розподілів більш точно описує діапазон можливого часу завершення робіт.
2. Встановити взаємозв'язок між виробітком виконавців і надійністю виконання робіт в планові строки.
3. Визначити раціональний рівень організаційно-технологічної надійності часових параметрів календарного плану.

### Методика

У дослідженнях були використані статистичні дані часових параметрів виконання робіт та виробітку будівельних бригад компанії «Строитель-П» (Україна, м. Дніпро).

Для аналізу статистичних даних, визначення раціонального рівня надійності були використані такі інструменти:

– математична статистика при обробці даних варіаційних рядів показників виробничої діяльності;

– теорія матричного розрахунку часових параметрів будівельного потоку при розробці ме-

тодики розрахунку потоку з урахуванням імовірнісного характеру процесів, що протікають;

– теорія ймовірностей і надійності систем при встановленні виду розподілу і розрахунку рівня ризику;

– економічний аналіз ефективності інвестицій при обґрунтуванні критерію ефективності кінцевого результату реалізації календарного плану.

### Результати

Організаційно-технологічна надійність календарного плану – це ймовірність, з якою роботи згідно з цим планом будуть виконані до певного терміну. Оскільки календарний план складається з окремих робіт, то відповідно і кожна робота має свій очікуваний час закінчення.

Для того, щоб обчислити очікуваний час закінчення будь-якої роботи в складі календарного плану, потрібно знати характеристики виконавця цих робіт. Під час розробки календарного плану користуються наступними статистичними даними щодо роботи виконавців у попередніх проектах:

1) витрати часу на одиницю об'єму робіт (наприклад, кількість годин на кладку 1 м<sup>3</sup> стіни – год/м<sup>3</sup>), позначимо їх як  $t$ ;

2) виробіток (також можна використовувати терміни «продуктивність» чи «інтенсивність виконання робіт») – це об'єм робіт, що був виконаний за одиницю часу (наприклад об'єм цегляної кладки за зміну чи годину – м<sup>3</sup>/зміну чи м<sup>3</sup>/год), позначимо його як  $I$ .

Форма, у якій виконувався хронометраж робіт, залежить від підходу, яким керувалася людина, відповідальна за хронометраж, або від зручності спостереження. Наприклад, для дрібних розосереджених робіт зручніше заміряти кількість виконаної праці кожного дня в кінці зміни, а для монтування великих окремих конструкцій зручніше заміряти час, що витрачається на кожну.

Витрати часу і виробіток – це взаємо обернені величини. Знаючи одну із них, легко знайти іншу:

$$I = \frac{1}{t}; \quad t = \frac{1}{I}, \quad (1)$$

де  $I$  – виробіток за одиницю часу,  $t$  – витрати

часу на одиницю об'єму робіт.

Для повного аналізу роботи будь-якого виконавця потрібно знати такі його параметри роботи як мінімальний, максимальний та середній виробіток, мінімальний, максимальний та середній час, що витрачається на одиницю об'єму робіт, а також значення цих параметрів при конкретному рівні організаційно-технологічної надійності. Тому такий підхід базується на урахуванні ймовірнісної природи цих параметрів. У розрахунках використовується не єдине значення параметру, а діапазон можливих значень, з яких обирається таке, що відповідає бажаному рівню надійності.

Зазвичай статистичні дані робочого описуються за допомогою нормального розподілу,  $\alpha$ -розподілу чи  $\beta$ -розподілу. При опрацюванні масиву даних визначаються такі параметри, як математичне очікування параметру і середньоквадратичне відхилення.

Функції надійності для двох типів даних відрізняються. Як видно з рис. 1, функція виробітку спадаюча, це означає, що чим більша продуктивність очікується від робочого, тим менша ймовірність її забезпечення.

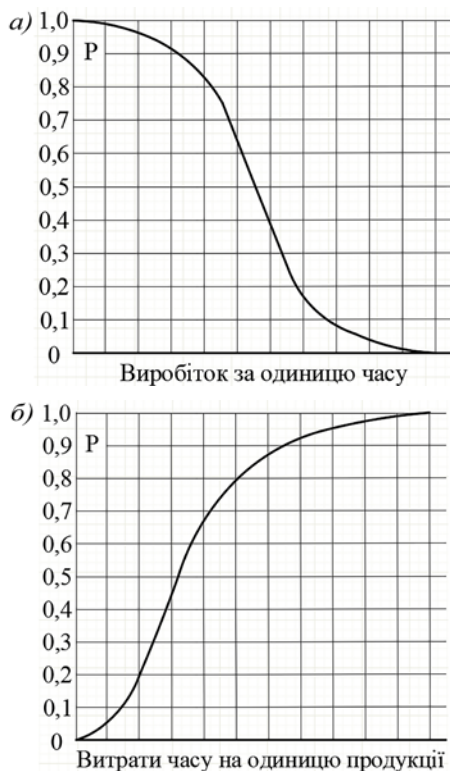


Рис. 1. Типові функції накопиченої ймовірності:  
 а – виробіток за одиницю часу; б – час, що витрачається на одиницю продукції

Невисокий виробіток робочий зможе забезпечити майже із 100 % ймовірністю. Але низький виробіток, закладений у календарний план, позначається на планових строках будівництва

Із рис. 1 видно, що функція часу, який витрачається на одиницю об'єму робіт, має зростаючий характер. Ймовірність виконання роботи за мінімальний термін часу прагне до нуля, але чим більше часу виділяється на виконання будівельного процесу, тим більша ймовірність, що робота буде виконана в запланований строк.

Однак, є ще одна цікава особливість цих статистичних даних. Порівняємо функції розподілу статистичних даних виробітку (рис. 2, а) і часу виконання робіт (рис. 2, б) середньо-статистичного муляра.

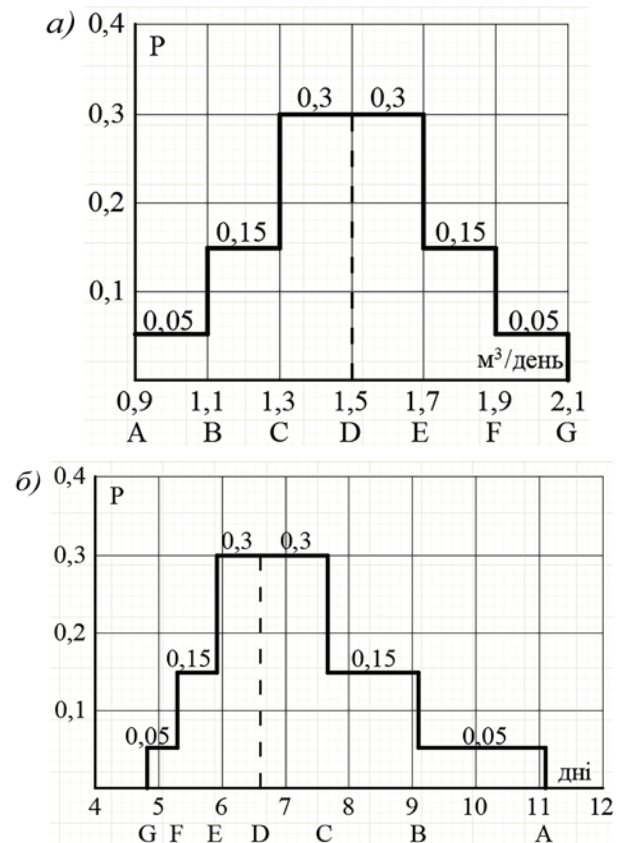


Рис. 2. Співвідношення між виробітком виконавця і часом виконання робіт:

а – симетричний розподіл виробітку (м³/змину);  
 б – асиметричний розподіл часу виконання заданого об'єму робіт (дні)

На графіку (рис. 2, б) видно явну асиметрію, яка, на перший погляд, не мала б тут бути. Але така асиметрія пояснюється за допомогою до-

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

поміжних точок А, В, С, D, E, F, G в кінцях інтервалів, на які було поділено весь масив даних. Логічно, що при перетворенні ці важливі точки будуть мати співвідношення на обох графіках.

Їх координати знаходяться перетворенням виробітку на витрати часу. Так, наприклад, для точки А, що відповідає виробітку муляра  $0,9 \text{ м}^3/\text{зміну}$ , витрати часу на об'єм робіт  $10 \text{ м}^3$  складатимуть 11,1 днів. Розраховувавши значення інших опорних точок таким чином:

точка А:  $10/0,9=11,1$  днів;

точка В:  $10/1,1=9,1$  днів;

точка С:  $10/1,3=7,7$  днів;

точка D:  $10/1,5=6,6$  днів;

точка E:  $10/1,7=5,9$  днів;

точка F:  $10/1,9=5,3$  днів;

точка G:  $10/2,1=4,8$  днів,

і позначивши їх на графіку, отримуємо асиметричний розподіл (рис. 2, б).

Всі точки на другому графіку йдуть у зворотному порядку, адже ці два графіки обернені один до одного. Наприклад, точка А позначає найнижчу зафіксовану продуктивність муляра, тому на графіку виробітку знаходиться ліворуч від інших точок. Така низька продуктивність відповідає найбільшим витратам часу, тому на графіку часу ця точка знаходиться праворуч.

Якщо відобразити симетричний розподіл виробітку робочого і витрати часу на одному графіку, отримуємо рис. 3.

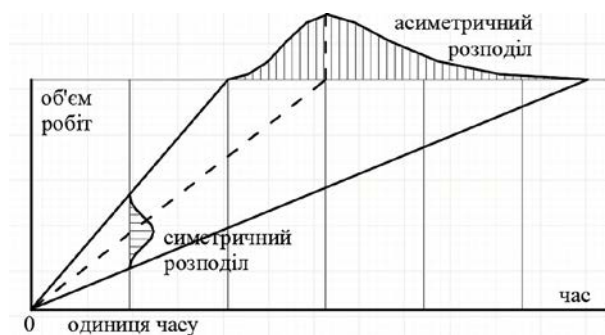


Рис 3. Геометрична інтерпретація взаємозв'язку симетричного і асиметричного розподілів виробітку й часу виконання робіт

Така особливість перетворення пояснюється кількома причинами:

- 1) масштабованістю величин;
- 2) вартістю одиниці часу в різних випадках (наприклад, 1 хвилина важить по-різному, коли йдеться про інтервал часу, що дорівнює 1 годи-

ні, і інтервал, що дорівнює робочій зміні. У другому випадку 1 хвилина має менше значення).

Для розрахунку значення асиметрії і опису законів розподілу часу завершення робіт були випробувані нормальний розподіл,  $\alpha$ -розподіл і  $\beta$ -розподіл. В результаті виявилось, що найбільш точно описує час виконання робіт  $\alpha$ -розподіл:

$$f(t) = \frac{\theta\alpha}{t^2\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{\theta}{t}-1\right)^2\right]. \quad (2)$$

У формулі (2)  $\alpha=\mu_1/\sigma_1$ . Це зворотна величина коефіцієнта варіації. У термінах задачі, що розв'язується, його називають «коефіцієнтом однорідності продуктивності праці виконавців». При розгляді умов виконання окремого трудового процесу даний показник може служити оцінкою рівня майстерності виконавців. Чим вище професійна майстерність виконавців, тим вужчий діапазон невизначеності в часі виконання роботи. Якщо при умові однакових  $\mu_1$  для двох ланок працівників А і В має місце нерівність  $(\mu_1)/(\sigma_1^A) > (\mu_1)/(\sigma_1^B)$ , то можна зробити висновок про те, що ланка А більш ефективно виконує трудовий процес.

Таким чином перевагою альфа-розподілу є те, що він враховує характерні фактори, властиві процесу виконання роботи: обсяг робіт, інтенсивність робіт (продуктивність), час закінчення робіт.

Встановлено взаємозв'язок між розкидом значень виробітку, величиною асиметрії і надійністю часових параметрів.

Величина асиметрії розподілу значень часу виконання робіт знайдена з геометричних утворень, використовуючи такі відомі вихідні дані, як продуктивність виконавця. В ході досліджень було виявлено, що асиметрія залежить від розкиду продуктивності. Якщо відношення максимального значення продуктивності до мінімального становить менше від 1,2, то асиметрія майже відсутня. Якщо ж розбіжність продуктивності становить більше, ніж 1,2, то асиметрія набуває великого значення.

Для більш глибокого аналізу динаміки наростання асиметрії в законі розподілу часу необхідно прийти від використання абсолютних значень в якості аргументів до відносних. Для цього звернемося до таких параметрів, як пев-

ний об'єм робіт  $V_K$ , максимальна інтенсивність робіт  $I_{MAX}$  і мінімальна інтенсивність  $I_{MIN}$ . Розрахуємо через них такі параметри: середній час виконання робіт ( $T_C$ ), що витрачається на заданий об'єм робіт  $V_K$  і час виконання робіт, що відповідає математичному очікуванню ( $T_\mu$ ):

$$t_\mu = \frac{V_K}{\frac{(I_{MAX} + I_{MIN})}{2}}, \quad (3)$$

$$t_c = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{V_K}{I_{MAX}} + \frac{V_K}{I_{MIN}} \right). \quad (4)$$

Введемо показник, який характеризує співвідношення між максимальною і мінімальною інтенсивністю виконання робіт:

$$L = \frac{I_{MAX}}{I_{MIN}}, \quad (5)$$

і знайдемо показник, що характеризує величину асиметрії:

$$F = \frac{T_\mu}{T_C}. \quad (6)$$

Цей показник можна легко виразити через співвідношення максимальної і мінімальної інтенсивностей виконання робіт:

$$F = 4L \frac{1}{(L+1)^2}. \quad (7)$$

На рис. 4 наведено графік цієї функції, з якої випливає, що визначальним параметром для розрахунку асиметрії є відношення максимальної і мінімальної інтенсивності виконання робіт. Якщо  $L > 1$ , то асиметрія завжди має місце, при цьому зміщена в бік мінімального часу закінчення роботи. Виходячи з даної моделі, поява негативної асиметрії є неможливою.

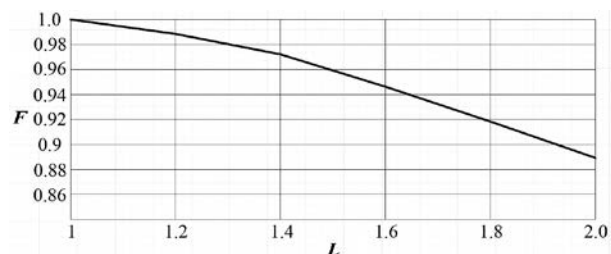


Рис. 4. Графік функції  $F = f(L)$

Аналіз графіка (рис. 4) показує наростаюче збільшення асиметрії при збільшенні  $L$ . При значеннях  $L < 1,2$  асиметрія змінюється незначно, далі динаміка її збільшення зростає. Визначимо еластичність цієї функції до зміни параметру  $L$ . Еластичність показує реакцію функції на зміну одного з вхідних в неї аргументів – на скільки відсотків зміниться одна величина при зміні іншої. В даному випадку знайдемо, наскільки збільшиться асиметрія при збільшенні розкиду виробітку працівника.

Для цього спочатку знайдемо співвідношення максимального і мінімального часу виконання роботи:

$$K = \frac{T_{MAX}}{T_{MIN}} \quad (8)$$

Визначимо зміну параметру  $K$  і параметру  $F$ :

$$\Delta K = \frac{K_2 - K_1}{K_1}; \quad \Delta F = \frac{F_2 - F_1}{F_1}. \quad (9)$$

У формулах (9) індекси "1" і "2" показують значення відповідних показників до і після зміни. В остаточному вигляді формула для розрахунку показника еластичності набуде вигляду:

$$E = \frac{\Delta K}{\Delta F}. \quad (10)$$

На підставі формули (10) побудовано графік відповідної залежності (рис. 5), на якому видно яскраво виражений вигин при  $L=1,2$ .

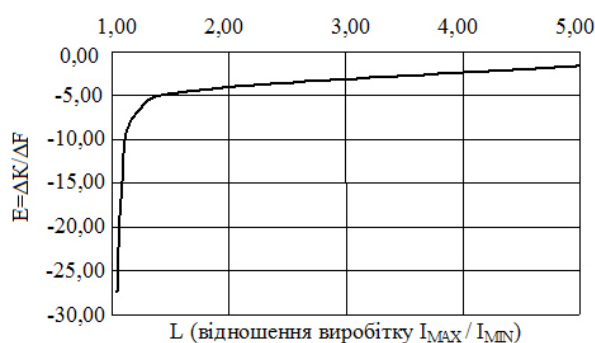


Рис. 5. Вплив зміни показника  $L$  на еластичність функції

В зоні  $L < 1,2$  крива асимптотично наближається до осі ординат, в зоні  $L > 1,2$  до осі абсцис. У зоні  $L < 1,2$  зміни вхідних показників не призводять до істотної зміни результату функції, це

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

свідчить про стійкість  $F$  в цій зоні. Таким чином, на підставі отриманих даних, слід вважати, що при значеннях  $L < 1,2$  немає суттєвої зміни (похибка в межах декількох відсотків) в асиметрії розподілу. У зонах  $L > 1,2$  необхідно враховувати асиметрію в законі розподілу часу виконання робіт.

Параметр  $L$  показує, наскільки широкий діапазон виробітку виконавця, іншими словами, наскільки нестабільна його робота. Це також можна охарактеризувати середньоквадратичним відхиленням розподілу його статистичних даних. Середньоквадратичне відхилення має суттєвий вплив на часові параметри роботи при врахуванні фактору надійності. Чим менше значення має середньоквадратичне відхилення, тим робота стабільніша і передбачуваніша (рис. 6).

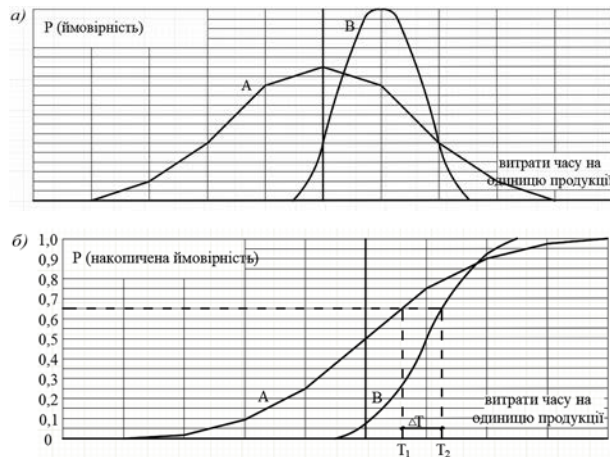


Рис. 6. Порівняння виконавців за допомогою функції розподілу:

*a* – графік розподілу параметричних даних; *b* – графік накопиченої надійності

На рис. 6, *a* показані розподіли статистичних даних витрат часу двох виконавців А і В, а на рис. 6, *b* – відповідні їм графіки накопиченої ймовірності завершити роботи в певні строки. Як видно з графіку, виконавець А має більший розкид значень.

Кількісно вплив середньоквадратичного відхилення можна оцінити через порівняння показників роботи двох виконавців при відомих значеннях математичного очікування  $\mu_1$  і  $\mu_2$  і середньоквадратичного відхилення  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$ . Будемо вважати, що математичні очікування рівні  $\mu_1 = \mu_2$ . Тоді звідси визначимо ймовірний час закінчення робіт для кожного виконавця і різницю між ними:

$$\Delta T = T_2 - T_1. \quad (11)$$

Запишемо значення надійності для кожного виконавця:

$$R_1 = f\left(\frac{T_1 - \mu_1}{\sigma_1}\right); R_2 = f\left(\frac{T_2 - \mu_2}{\sigma_2}\right). \quad (12)$$

Якщо знайти різницю часу виконання робіт ( $T$ ) двох різних розподілів при одному і тому ж рівні надійності  $R_1 = R_2$ , то виявиться, що ця різниця залежить від середньоквадратичного відхилення і математичного очікування. А якщо порівняти розподіли з однаковим математичним очікуванням ( $\mu_1 = \mu_2$ ), то різниця в часі виконання робіт буде залежати лише від середньоквадратичного відхилення:

$$\Delta T = R(\sigma_2 - \sigma_1). \quad (13)$$

Таким чином, виконавець, параметри роботи якого характеризуються меншим значенням середньоквадратичного відхилення ( $\sigma$ ) при інших рівних умовах має такі переваги:

- виконує роботу за фіксований час з більш високою надійністю;
- виконує роботу при заданому рівні надійності за більш короткий час.

Тобто розкид значень виробітку (а з ним відповідно і середньоквадратичне відхилення) має суттєвий вплив на часові параметри роботи. Чим більший розкид, тим більша асиметрія в законі розподілу часу виконання робіт, і тим більша невизначеність часових параметрів.

Проведено визначення раціонального рівня організаційно-технологічної надійності часових параметрів календарного плану. В дослідженні використовується не детерміноване значення виробітку чи витрат часу, а ймовірне, тобто визначається інтервал можливих значень цих параметрів. Якщо використовувати не тільки максимальне і мінімальне значення продуктивності, то можна отримати множинні значення часу з ймовірністю їх появи. Використовуючи підсумкову наростаючу функцію розподілу можна встановити, з якою ймовірністю окрема робота буде виконана до певного терміну. На рис. 7 наведено приклад, як за допомогою підсумкової функції розподілу можна встановити, до якого часу роботи будуть виконані.

Надійності 60 % відповідає час завершення робіт  $T_1$ , надійності 80 % – час  $T_2$ .

Підвищення надійності закінчення робіт призводить до відповідного збільшення тривалості її виконання. Тому підхід, заснований на обліку імовірнісних процесів в календарному плануванні, передбачає збільшення цих термінів по відношенню до детермінованих розрахунків.

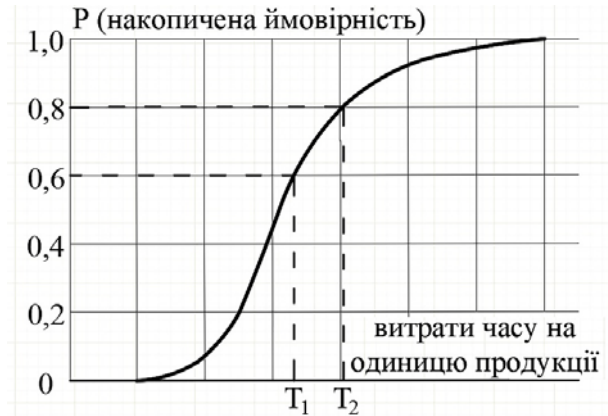


Рис. 7. Підсумкова функція розподілу часу виконання робіт

Використання детермінованих методів розрахунку в плануванні та організації будівельного виробництва дає досить оптимістичні, а значить і менш надійні результати. Це, в свою чергу, призводить до порушень як проміжних так і завершальних термінів будівництва об'єктів. Використання не детермінованого результату, а інтервалу можливих значень, дає можливість оцінити ймовірність досягнення кінцевого результату до того чи іншого строку будівництва.

Який рівень надійності слід вважати прийнятним? Використання 100 % рівня надійності відповідає невиправдано високим плановим строкам будівництва. З іншого боку, використання заниженого рівня надійності несе ризик невиконання будівельних робіт в належний час. Логічно, що шукати прийнятний рівень надійності тривалості робіт при розробці календарного плану слід в індивідуальних показниках виконавців будівельно-монтажних процесів. Для вибору рівня надійності потрібно проаналізувати графік накопиченої ймовірності, який характеризує ймовірність виконання роботи в межах певного часу.

Графік функції надійності умовно можна розділити на декілька зон. (рис. 8). Зона А характеризується стрімким зростанням надійності при низькому зростанні часу, але її не слід об-

рати, через те, що надійність в цій зоні занадто низька. Це зона високого ризику.

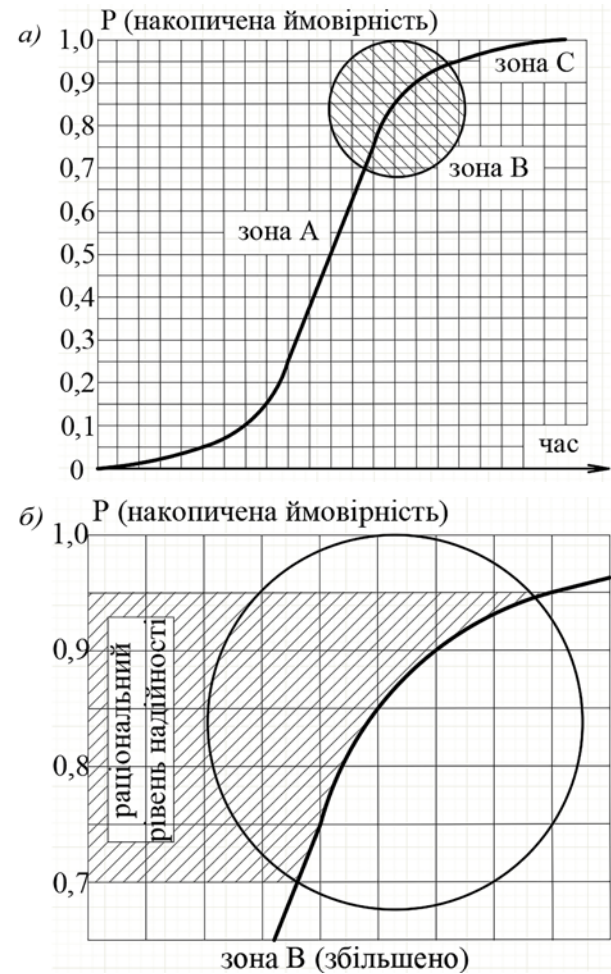


Рис. 8. Вибір доцільного рівня надійності на типовому графіку функції надійності:  
 а – загальний вигляд; б – зона В збільшено

Зона В позначає місце, де графік змінює кут нахилу, плавно переходячи із стрімкого вертикального в похилий, майже горизонтальний. Ця зона оптимальна для вибору, бо має гарний рівень надійності при прийнятних показниках часу.

Зона С характеризується повільним зростанням надійності при дуже стрімкому збільшенні часу. Вибір цієї зони є неефективним, бо за кожний додатковий процент надійності доводиться формувати занадто великі резерви часу.

Таким чином, раціональним вибором є рівень надійності із зони В. Зазвичай надійність в цій зоні складає 70...90 %.



## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Зазначимо обмеження результатів досліджень. Головне обмеження – це наявність статистичних даних за минулі періоди роботи робочих, бригад, механізмів. Ця інформація потрібна для того, щоб мати змогу оцінити індивідуальні якості виконавців і визначити обґрунтований час виконання ними будівельно-монтажних робіт. В іншому разі, при відсутності такої статистики, час виконання робіт визначається за даними витрат часу ДБН на той чи інший будівельний процес.

**Наукова новизна та практична значимість**

Удосконалено метод розрахунку будівельного потоку з урахуванням ймовірності термінів виконання робіт, що дозволяє кількісно оцінити динаміку наростання невизначеності в термінах виконання робіт в складі об'єктного будівельного потоку. Новий підхід планування часових параметрів дозволяє контролювати зміни надійності в процесі виконання плану. Отримані результати формують базу для подальшого розрахунку інтенсивностей відмов і раціонального режиму управління.

Розрахунок часових параметрів будівельних потоків з урахуванням дестабілізуючого впливу випадкових факторів зовнішнього і внутрішнього середовища дозволяє наблизити спроектовані на їх основі календарні плани будівництва об'єктів до реальних умов, які мають місце на етапі реалізації цих планів.

**Висновки**

Дослідження показали, що надійність календарного плану цілком залежить від достовірності часових параметрів, які закладаються в нього на стадії розробки.

Проаналізовано вибірки статистичних даних, і на прикладі роботи мулярів зроблено висновки, що розподіл статистичних даних виробітку відповідає нормальному закону розподілу. Розподіл статистичних даних часу виконання робіт описується за допомогою  $\alpha$ -розподілу і має деяку асиметрію.

Встановлено взаємозв'язок між виробітком виконавців і надійністю виконання робіт в планові строки, а також його вплив на асиметрію в розподілі значень часу виконання робіт.

Визначено, що величина асиметрії залежить від відношення максимального до мінімально-

го виробітку виконавця робіт, тобто розкиду значень виробітку виконавця. Чим це відношення більше, тим менш передбачувана робота виконавця і тим значніша асиметрія.

У дослідженнях був використаний підхід врахування ймовірнісних показників при розрахунку тривалості робіт у складі календарного плану. Цей підхід відрізняється від детермінованого підходу тим, що замість одного фіксованого значення часу виконання будівельного процесу використовується діапазон часу з ймовірністю завершення процесу за той чи інший проміжок часу.

Визначено раціональний рівень організаційно-технологічної надійності, який слід використовувати при формуванні часових параметрів календарного плану. Раціональним вибором є рівень надійності 70...90 %.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Гусаков, А. А. Организационно-технологическая надежность строительного производства [Текст] / А. А. Гусаков. – Москва : Стройиздат, 1974. – 252 с.
2. Афанасьев, В. А. Параллельно-поточная организация строительства [Текст] / В. А. Афанасьев, А. В. Афанасьева. – Ленинград : ЛИИ, 1985. – 96 с.
3. Кабанов, В. Н. Организационно-технологическая надежность строительного процесса [Текст] / В. Н. Кабанов // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 1 (77) – С. 59-67. doi: 10.18720/MCE.77.6
4. Bhargav Dave, Juho-Pekka Hämäläinen, Sergio Kemmer, Lauri Koskela, Anssi Koskenvesa Suggestions to improve lean construction planning. In: Proc. 23rd Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction. Perth, Australia, July 29-31, pp. 193-202.
5. Pei-Yuan Hsu, Marco Aurisicchio, Panagiotis Angeloudi. Investigating schedule deviation in construction projects through root cause analysis. Procedia Computer Science 121 (2017). pp. 732-739. doi: 10.1016/j.procs.2017.11.095
6. Tarek Salama, Ahmad Salah, Osama Moselhi. Integration of offsite and onsite schedules in modular construction. 34 th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017), pp. 767-774. DOI: 10.22260/ISARC2017/0107
7. Hylton Olivieri, Olli Seppänen, Arioaldo Denis Granja Improving workflow and resource usage in construction schedules through location-based management system (LBMS). Construction Management and Economics Vol. 36, 2018 – Issue

- 2, pp. 109-124. Doi: 10.1080/01446193.2017.1410561
8. Behman, A., Harfield, T., & Kenley, R. (2016, 7-8 March). Construction management scheduling and control: The familiar historical overview. S. Kamaruzzaman., A. Ali., N. Azmi & S. Lin (Ed.), Proceedings of the 4th International Building Controls Conference (pp. 754-759). Doi: 10.1051/mateconf/20166600101
9. Сиверикова, А. И. Параллельно-поточный метод организации строительства [Текст] / А. И. Сиверикова, В. З. Величкин // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 4 (31). – С. 135-162.
10. Файзулина, О. А. Современная методика составления календарных планов при строительстве комплекса зданий [Текст] / О. А. Файзулина, А. В. Беспалова, О. П. Дашковская, А. И. Кныш // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. – 2018. – Вып. № 70. – С. 164-169.
11. Jaśkowski, P. Methodology for enhancing reliability of predictive project schedules in construction. *Eksploatacja i Niezawodność. Maintenance and Reliability* 2015; 17 (3): pp. 470-479, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.3.20>
12. Lok Siew China, Abdul Rahim Abdul Hamid. The practice of time management on construction project *Procedia Engineering* 125 (2015). pp. 32-39. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.006
13. Ткач, Т. В. Учет вероятности при определении продолжительности работ календарного плана [Текст] / Т. В. Ткач, В. Р. Млодецкий, О. О. Мартиш // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении. – 2016. – Вып. 94. – С. 168-173.
14. Млодецкий, В. Р. Организационно-технологическая и управленческая надежность функциональной системы строительной организации [Текст] : автореф. дисс. д-ра техн. наук : 05.23.08 / Млодецкий Виктор Ростиславович; Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры. – Днепропетровск, 2005. – 20 с.

А. А. МАРТЫШ<sup>1\*</sup>, А. П. МАРТЫШ<sup>2</sup>, Ф. И. ПАВЛОВ<sup>3</sup>, Н. С. РЫНКЕВИЧ<sup>4</sup>,  
И. А. МИХАЙЛОВА<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup> Кафедра планирования и организации производства, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (095) 905 86 75, эл. почта [martysh@yahoo.com](mailto:martysh@yahoo.com), ORCID 0000-0002-8864-2555

<sup>2</sup> Кафедра технологии строительного производства, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 76, эл. почта [tsp@mail.pgasa.dp.ua](mailto:tsp@mail.pgasa.dp.ua), ORCID 0000-0002-6126-1920

<sup>3</sup> Кафедра планирования и организации производства, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38(056) 756 33 66, эл. почта [pavlovfed@ukr.net](mailto:pavlovfed@ukr.net), ORCID 0000-0002-4442-9277

<sup>4</sup> Кафедра планирования и организации производства, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38(056) 756 33 66, эл. почта [starnarysharm@gmail.com](mailto:starnarysharm@gmail.com), ORCID 0000-0002-1229-6051

<sup>5</sup> Кафедра планирования и организации производства, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепр, Украина, 49600, тел. +38(056) 756 33 66, эл. почта [innakorchoromnaya@gmail.com](mailto:innakorchoromnaya@gmail.com), ORCID 0000-0002-3647-3972

## ПОВЫШЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ КАЛЕНДАРНЫХ ПЛАНОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

**Цель.** Определение рационального уровня организационно-технологической надежности временных параметров календарного плана. **Методика.** Рассмотрены факторы, влияющие на выполнении строительно-монтажных работ в составе календарного плана. Использован подход, согласно которому время завершения определенного объема работ является производным от производительности исполнителя и интенсивности выполнения работ. Продолжительность работ является не детерминированным значением, а диапазоном (промежутком) возможных значений, которые можно описывать с помощью нормального распределения,  $\beta$ -распределения и  $\alpha$ -распределения. **Результаты.** Установлена взаимосвязь между выработкой исполнителей и надежностью выполнения работ в плановые сроки. Определен рациональный уровень организационно-технологической надежности календарного плана строительства на этапе моделирования его временных параметров. **Научная новизна.** Усовершенствован метод расчета строительного потока с учетом вероятно-

© О. О. Мартиш, О. П. Мартиш, Ф. И. Павлов, Н. С. Ринкевич, И. О. Михайлова, 2017

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

сти сроков выполнения работ, что позволяет количественно оценить динамику нарастания неопределенности в сроках выполнения работ в составе объектного строительного потока. Новый подход планирования временных параметров позволяет контролировать изменения надежности в процессе выполнения плана. Полученные результаты формируют базу для дальнейшего расчета интенсивностей отказов и рационального режима управления. **Практическая значимость.** Расчет временных параметров строительных потоков с учетом дестабилизирующего влияния случайных факторов внешней и внутренней среды позволяет приблизить спроектированные на их основе календарные планы строительства объектов к реальным условиям, которые имеют место на этапе реализации этих планов.

*Ключевые слова:* календарное планирование, организационно-технологическая надежность, интенсивность работ, выработка, затраты времени

O. O. MARTYSH<sup>1\*</sup>, O. P. MARTYSH<sup>2</sup>, F. I. PAVLOV<sup>3\*</sup>, N. S. RYNKEVYCH<sup>4</sup>,  
I. O. MYKHAILOVA<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup> Department of planning and organization of production, State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (095) 905 86 75, e-mail martysh@yahoo.com, ORCID 0000-0002-8864-2555

<sup>2</sup> Department of technology of construction production, State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 34 76, e-mail tsp@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-6126-1920

<sup>3\*</sup> Department of planning and organization of production, State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38(056) 756 33 66, e-mail pavlovfed@ukr.net, ORCID 0000-0002-4442-9277

<sup>4</sup> Department of planning and organization of production, State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38(056) 756 33 66, e-mail starnarysharm@gmail.com, ORCID 0000-0002-1229-6051

<sup>5</sup> Department of planning and organization of production, State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38(056) 756 33 66, e-mail innakorchomnaya@gmail.com, ORCID 0000-0002-3647-3972

## IMPROVING THE ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF CONSTRUCTION SCHEDULES.

**Purpose.** Determination of the rational level of organizational and technological reliability of schedule time parameters. **Methodology.** The factors affecting the performance of construction and installation works as a part of the construction schedule are considered. It is used the approach where the time for completing a certain amount of work is derivate from the performer's performance and the intensity of work. The duration of the work is not a determinate value, but a range (interval) of possible values that can be described using the normal distribution, the  $\beta$ -distribution, and the  $\alpha$ -distribution. **Findings.** It is found out the dependence between the output of performers and the reliability of work in the planning period. It is determined the rational level of organizational and technological reliability of the construction schedule at the stage of its time parameters modeling. **Originality.** It is improved the method for calculating the construction spread, taking into account the probability of a period of execution of works, which permits to quantify the dynamics of uncertainty growth in the period of execution of works as a part of the construction spread. A new approach to time parameters planning allows controlling changes in reliability during the implementation of the plan. Obtained results form the basis for further calculation of failure rates and rational control mode. **Practical value.** The calculation of the time parameters of the construction spread, taking into account the destabilizing influence of random factors of the external and internal environment, makes it possible to bring the projected construction schedules closer to real-life conditions that occur during the implementation.

*Keywords:* scheduling, organizational and technological reliability, work intensity, time parameters

### REFERENCES

1. Gusakov A. A. *Organizacionno-tehnologicheskaja nadezhnost' stroitel'nogo proizvodstva* [Organizational and technological reliability of construction production]. Moscow, Strojizdat Publ., 1974. 252 p.
2. Afanas'ev V. A., Afanas'eva A. V. *Parallel'no-potochnaja organizacija stroitel'stva* [Parallel construction organization]. Leningrad, LILI Publ., 1985. 96 p.

3. Kabanov V. N. Organizacionno-tehnologicheskaja nadezhnost' stroitel'nogo processa [Organizational and technological reliability of the construction process], *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal – Parallel construction organization*, 2018. № 1 (77). pp. 59-67. doi: 10.18720/MCE.77.6
4. Bhargav Dave, Juho-Pekka Hämmäläinen, Sergio Kemmer, Lauri Koskela, Anssi Koskenvesa Suggestions to improve lean construction planning. In: Proc. 23rd Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction. Perth, Australia, July 29-31, pp. 193-202.
5. Pei-Yuan Hsu, Marco Aurisicchio, Panagiotis Angeloudi Investigating schedule deviation in construction projects through root cause analysis. *Procedia Computer Science* 121 (2017). pp. 732-739. doi: 10.1016/j.procs.2017.11.095
6. Tarek Salama, Ahmad Salah, Osama Moselhi Integration of offsite and onsite schedules in modular construction. 34 th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017), pp. 767-774. DOI: 10.22260/ISARC2017/0107
7. Hylton Olivieri, Olli Seppänen, Arioaldo Denis Granja Improving workflow and resource usage in construction schedules through location-based management system (LBMS). *Construction Management and Economics*. Vol. 36, 2018. Issue 2, pp. 109-124. Doi: 10.1080/01446193.2017.1410561
8. Behman, A., Harfield, T., & Kenley, R. (2016, 7-8 March). Construction management scheduling and control: The familiar historical overview. S. Kamaruzzaman., A. Ali., N. Azmi & S. Lin (Ed.), *Proceedings of the 4th International Building Controls Conference* (pp. 754-759). 66. Doi: 10.1051/mateconf/20166600101
9. Siverikova A. I. , Velichkin V. Z. Parallel'no-potochnyj metod organizacii stroitel'stva [Parallel and stream methods of construction organization], *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij – Construction of Unique Buildings and Structures*, 2015. № 4 (31). pp. 135-162.
10. Fajzulina O. A., Bespalova A. V., Dashkovskaja O. P., Knysh A. I. Sovremennaja metodika sostavlenija kalendarnyh planov pri stroitel'stve kompleksa zdaniy [Modern of calendar plans technique composition for construction of building complex], *Vestnik Odesskoj gosudarstvennoj akademii stroitel'stva i arhitektury – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture electronic Repository*. 2018. Issue 70. pp. 164-169.
11. Jaśkowski P. Methodology for enhancing reliability of predictive project schedules in construction. *Maintenance and Reliability*, 2015. Issue 17. pp. 470-479, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.3.20>
12. Lok Siew China, Abdul Rahim Abdul Hamid The practice of time management on construction project *Procedia Engineering* 125 (2015). pp. 32-39. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.006
13. Tkach T. V., Mlodec'kij V. R., Martish O. O. Uchet verojatnosti pri opredelenii prodolzhitel'nosti rabot kalendarnogo plana [Probability accounting during the determining the duration of the work in construction schedules.] *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Serija : Komp'juternye sistemy i informacionnye tehnologii v obrazovanii, nauke i upravlenii – Building. Materials Science. Engineering. Series: Computer systems and information technology in education, science and management*. 2016. Issue 94. pp. 168-173.
14. Mlodeckij V. R. *Organizacionno-tehnologicheskaja i upravlencheskaja nadezhnost' funkcional'noj sistemy stroitel'noj organizacii*. Avtoreferat Diss. [Organizational-technological reliability and management of the functional system of a construction company. Autor's abstract]. Dnepropetrovsk, 2005. 20 p.

Надійшла до редколегії 14.11.2017

Прийнята до друку 23.11.2017