

© Д.В. Лаухін<sup>2</sup>, Є.І. Заяць<sup>1</sup>, Л.М. Дадіверіна<sup>1</sup>, О.В. Бекетов<sup>1</sup>,  
І.М. Мацюк<sup>2</sup>, О.М. Твердохліб<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» Дніпро, Україна

## РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ СУМІЩЕННЯ ОКРЕМИХ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ЯК ФАКТОР СКОРОЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ІННОВАЦІЙНИХ БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЄКТІВ

© D. Laukhin<sup>2</sup>, Y. Zaiats<sup>1</sup>, L. Dadiverina<sup>1</sup>, O. Beketov<sup>1</sup>,  
I. Matsiuk<sup>2</sup>, A. Tverdohleb<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> State Higher Education Institution «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## RATIONALIZATION OF COMBINATION OF INDIVIDUAL PRODUCTION PROCESSES AS A FACTOR OF REDUCTION OF DURATION OF IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE BUILDING PRODUCTS

**Мета.** Скорочення тривалості реалізації будівельних проєктів, на основі моделювання раціонального суміщення технологічних процесів, які ураховують обмеження встановлені інноваційними технологіями та вдосконалення методів планування і організації будівельного виробництва, що дозволить зменшити кількість організаційних помилок.

**Методика досліджень.** Виконано аналіз умов обмеження на суміщення технологічно залежних робіт. Розроблена математична модель, яка відображає задані двосторонні обмеження на суміщення технологічно суміжних робіт. Розроблено метод, який дозволяє визначити раціональні початок та закінчення робіт потоку на всіх захватках з урахуванням заданих двосторонніх обмежень на їх суміщення при безперервності виконання критичних робіт.

**Результати дослідження.** Розроблено модель та метод ув'язки роботи спеціалізованого будівельного потоку з урахуванням двостороннього обмеження на суміщення процесів, яке передбачають сучасні інноваційні будівельні проєкти, що дозволяє скоротити тривалість реалізації будівельних проєктів та виключити помилки в плануванні і організації будівельного виробництва.

**Наукова новизна.** Теоретично обґрунтовано доцільність врахування двостороннього обмеження на суміщення процесів при розрахунках будівельних потоків за умови безперервного виконання критичних робіт – зроблено вперше. Розроблена концепція відрізняється тим, що обмеження на суміщення технологічно залежних робіт, може бути накладено одночасно за рахунок суміщення технологічно попередньої та подальшої роботами.

**Практичне значення.** Скорочення тривалості етапів циклів реалізації будівельних проєктів в Україні до вимог сучасних світових стандартів шляхом інноваційного планування виробничих процесів з урахуванням раціонального суміщення будівельних потоків як у часі, так і у просторі.

**Ключові слова:** планування та організація будівельного виробництва, суміщення робіт, адитивні технології, 3D-друк, тривалість будівництва, будівельні потоки.

**Вступ.** Одним з найбільш значущих чинників економічної ефективності раціональної організації виробничого процесу є – скорочення тривалості виробничого циклу.

Використання в будівельному виробництві інноваційних рішень та нанотехнологій призвело до збільшення вагових показників фактора часу та визначення його як одного з основних маркерів нового рівня ведення будівельного бізнесу. Це викликано об'єктивними передумовами, серед яких: підвищення нестабільності сучасного ринку будівельних послуг, а також посилення конкурентної боротьби за споживача між виробниками.

Можливість в найкоротші терміни реалізувати інноваційну проєктну ідею, скоротивши тривалість виробничого процесу, одночасно надавши споживачеві високоякісний та сучасний готовий продукт, дозволить суб'єкту ринку будівельних послуг зайняти лідируюче положення і гарантоване наповнення портфеля замовлень [1].

Яскравим прикладом впливу інновацій на фактори економічної ефективності в тому числі і на терміни реалізації інвестиційних проєктів є використання в будівельному виробництві адитивних технологій 3D-друку, що продемонстровано практичними результатами роботи багатьох провідних будівельних компаній світу [2].

Однак, необхідно відзначити, що інновації в будівельному виробництві стимулюють підвищення ефективності не тільки шляхом впровадження нових технологій та обладнання, а в значній мірі покращення якості планування та організації будівельного виробництва та обґрунтованості прийняття управлінських рішень, за рахунок використання сучасних методів моделювання виконання виробничих процесів. Використання сучасних методів моделювання дозволяє, вже на стадії проєктування, вибрати найбільш раціональний варіант планування та організації будівельного виробництва з урахуванням встановлених обмежень з можливості реалізації проєкту.

Скорочення до світових стандартів строків будівельного виробництва можливе за рахунок багатьох факторів один з них раціональне суміщення виробничих процесів у часі та просторі. Сучасні інноваційні будівельні проєкти передбачають складне суміщення виробничих процесів з урахуванням всіх встановлених обмежень, це дозволить виключити помилки в плануванні та організації будівельного виробництва.

Тому питання про вдосконалення методів планування та організації будівельного виробництва на основі моделювання раціонального суміщення технологічних процесів в часі та в просторі, з урахуванням обмежень, встановлених інноваційними технологіями, є актуальним.

**Основна частина.** Зведення будівель та споруд є сукупністю деякої множини технологічно взаємопов'язаних процесів. Серед них є певна кількість робіт, зміна тривалості яких, тягне відповідну зміну загальної тривалості будівельного проєкту. Є також роботи, для яких зміна їх тривалостей до певних меж, не впливає на терміни реалізації проєктів. Перші роботи прийнято називати критичними, другі – не критичними.

Виявлення критичних робіт та критичного шляху (той шлях, на якому лежать критичні роботи) є одним з важливих досліджень при розробці та оптимі-

зації календарних планів, особливо при оперативному плануванні. На стадії оперативного планування критичний шлях показує, на яких роботах організаторам будівельного виробництва слід сконцентрувати основну увагу та зусилля для успішної реалізації проєктів [3].

У процесі планування будівельного виробництва важливо не тільки виявити критичні роботи, але і забезпечити безперервність їх виконання з метою раціоналізації тривалості реалізації будівельних проєктів. Для вирішення цієї задачі розроблені методи ув'язки робіт будівельних потоків як без суміщення суміжних робіт на розглянутих захватках, так і з суміщення [4-8].

Керуючись практичним досвідом організації зведення сучасних об'єктів різного призначення, а також з огляду на характерні особливості використання інноваційних рішень в будівельних проєктах, можна констатувати про необхідність вдосконалення існуючих методів планування, що дозволить враховувати складне раціональне спільне виконання (суміщення) декількох процесів (робіт) і в часі і в просторі. Керуючись вище викладеним, можна констатувати, що дослідження по раціоналізації суміщень розглянутої, технологічно попередньої та технологічно подальшої робіт, на одній і тій же захватці в один і той же час з урахуванням відповідних тимчасових обмежень є актуальними.

Як зазначалося раніше, існуючі методи ув'язки робіт будівельних потоків не дозволяють враховувати в розрахунках такі можливості раціонального поєднання робіт, як при визначенні тривалості окремих будівельних потоків, так і реалізації проєктів в цілому.

В основу існуючих методів розрахунку будівельних потоків покладено припущення, що для кожної розглянутої роботи обмеження на її поєднання з суміжними роботами на розглянутій захватці може бути задано: а) тільки з технологічно безпосередньо попередньої їй роботою або б) тільки з технологічно подальшою роботою. За умови: а) тривалість роботи записується рівністю (1):

$$t_{i,j} = a_{(i,i-1),j} + b_{(i,i-1),j}, \quad (1)$$

а за умови б) – рівністю (2):

$$t_{i,j} = b_{(i,i+1),j} + a_{(i,i+1),j} \quad (2)$$

де  $t_{i,j}$  – тривалість роботи  $i$  на захватці  $j$ ;  $a_{(i,i-1),j}$ ,  $a_{(i,i+1),j}$  – тривалість сумісної частини роботи  $i$  відповідно з безпосередньо попередньою  $i-1$  роботою та з безпосередньо подальшою  $i+1$  роботою на захватці  $j$  в днях;  $b_{(i,i-1),j}$ ,  $b_{(i,i+1),j}$  – тривалість не сумісної частини роботи  $i$  відповідно з безпосередньо попередньою  $i-1$  роботою та з безпосередньо подальшою  $i+1$  роботою на захватці  $j$  в днях.

Використання існуючих методик, що враховують одностороннє обмеження на суміщення технологічно залежних робіт на одній захватці, не відповідає сучасним вимогам будівельного виробництва, та призводить до помилок в плануванні та організації будівельних робіт.

Дослідження показали, що обмеження на суміщення даної роботи може бути накладено одночасно як на суміщення з технологічно попередньої роботою, так і з технологічно подальшою роботою. В цьому випадку технологічна залежність двох суміжних робіт повинна бути описана не одним обмеженням, а системою обмежень (3):

$$\left. \begin{aligned} t_{i,j} &= a_{(i,i-1),j} + b_{(i,i-1),j} \\ t_{i,j} &= b_{(i,i+1),j} + a_{(i,i+1),j} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для вирішення поставленої проблеми, при обмеженнях, які описані системою рівностей (3), був розроблений метод, що враховує двостороннє обмеження на суміщення робіт за умови безперервності виконання критичних робіт.

Результати досліджень. Обмеження на суміщення технологічно залежних робіт можуть мати такі умови:

1) Робота, яка розглядається допускає повне суміщення її виконання з виконанням технологічно безпосередньо попередньої та подальшої роботами:

$$t_{i,j} = a_{(i,i-1),j} = a_{(i,i+1),j} . \quad (4)$$

2) Робота, яка розглядається не допускає спільне виконання з безпосередньо технологічно попередньої та подальшої роботами:

$$a_{(i,i-1),j} = a_{(i,i+1),j} = 0 . \quad (5)$$

3) Робота, яка розглядається допускає спільне виконання з безпосередньо технологічно попередньою  $i-1$  та подальшою  $i+1$  роботами в заданих межах:

$$0 \leq a_{(i,i-1),j} \leq t_{i,j} ; \quad 0 \leq a_{(i,i+1),j} \leq t_{i,j} . \quad (6)$$

Можна констатувати, що будь-яка розглянута робота  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, m$ ) при її спільному виконанні з безпосередньо технологічно попередньою  $i-1$  та подальшою  $i+1$  роботами може бути описана співвідношеннями (3) в межах (7):

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq a_{(i,i-1),j} , a_{(i,i+1),j} \leq t_{i,j} \\ 0 \leq b_{(i,i-1),j} , b_{(i,i+1),j} \leq t_{i,j} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Відповідно, будь-який спеціалізований потік може бути представлений моделлю (8), що відображає задані двосторонні обмеження на суміщення технологічно суміжних робіт:

$$\left( t_{i,j} ( a_{(i,i-1),j} , a_{(i,i+1),j} ) \right) , \quad i=1, 2, 3, \dots, m ; \quad j=1, 2, 3, \dots, n , \quad (8)$$

Використовуючи запропоновану методику було виконано моделювання роботи спеціалізованого будівельного потоку з урахуванням заданих двосторонніх обмежень на суміщення за умови безперервного виконання критичних робіт в загальному вигляді (А) та цифровому (Б).

А) Спеціалізований будівельний потік, який досліджується, представлений математичною матричною моделлю (8):

$$(t_{i,j}(a_{(i,i-1),j}, a_{(i,i+1),j})), i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, n.$$

Визначимо раціональні початок та закінчення робіт потоку на всіх захватках з урахуванням заданих двосторонніх обмежень на їх суміщення при безперервності виконання критичних робіт.

Етапи моделювання.

1. Початок першої ( $i = 1$ ) роботи на першій ( $j = 1$ ) захватці приймемо рівним нулю:  $t_{1,1}^H = 0$ . Тоді її закінчення на  $j = 1$  захватці  $t_{1,1}^O = t_{1,1}^H + t_{1,1}$ .

2. Початок та закінчення першої ( $i = 1$ ) роботи на другій  $j = 2$  та послідуєчих  $j = 3, 4, \dots, n$  захватках визначатимуться рівностями:

$$t_{1,j}^H = t_{1,j-1}^O, \quad t_{1,j}^O = t_{1,j}^H + t_{1,j}.$$

3. Маючи початок та закінчення попередньої  $i-1$  роботи на захватках  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ , легко визначити початок та закінчення на всіх захватках розглянутої  $i$  ( $i = 2, 3, 4, \dots, m$ ) роботи.

На першій захватці початок та закінчення  $i = 2, 3, \dots, m$  робіт:

$$t_{i,1}^H = \max(t_{i-1,1}^O - a_{(i-1,i),1}, t_{i-1,1}^O - a_{(i,i-1),j}), \quad t_{i,1}^O = t_{i,1}^H + t_{i,1}.$$

На другій та наступних  $j = 3, 4, \dots, n$  захватках початок та закінчення  $i = 2, 3, \dots, m$  робіт:

$$t_{i,j}^H = \max(\max(t_{i-1,j}^O - a_{(i-1,i),j}; t_{i-1,1}^O - a_{(i,i-1),j}); t_{i,j-1}^O). \quad t_{i,j}^O = t_{i,j}^H + t_{i,j}$$

Виконавши етап 3 для всіх  $i = 2, 3, \dots, m$  робіт на всіх  $j = 2, 3, 4, \dots, n$  захватках, визначимо раціональні початки та закінчення всіх робіт потоку з урахуванням заданих обмежень по їх суміщенню, виключивши можливі простої бригад при переході з захватки на захватку за умови безперервності виконання критичних робіт.

Б) Була змодельована, з використанням запропонованого методу, у цифровому вигляді (вихідна розрахункова матриця (9)) робота окремого спеціалізованого потоку, у складі 4-х робіт, які виконуються на 4-х захватках, що входить до складу об'єктного потоку, за умови безперервного виконання критичних робіт.

		Захватки ( $j$ ):			
		1	2	3	4
Роботи ( $i$ ):	1	$6(4, 2)$	$5(4, 1)$	$6(1, 5)$	$7(3, 4)$
	2	$5(1, 1)^*$	$2(2, 1)$	$4(2, 1)$	$2(2, 2)$
	3	$6(2, 1)$	$2(2, 1)$	$5(3, 1)$	$3(2, 0)$
	4	$4(3, 2)$	$1(0, 1)$	$5(3, 4)$	$3(2, 0)$

(9)

Де:  $5(1,1)^*$  – перша цифра позначає тривалість роботи, яка розглядається, тобто друга робота ( $i=2$ ) на першій хватці ( $j=1$ ). Друга цифра – допустиме суміщення роботи, яка розглядається ( $i=2$ ) на хватці ( $j=1$ ) з роботою безпосередньо попередньою ( $i=1$ ) в днях. Третя цифра – допустиме суміщення роботи, яка розглядається ( $i=2$ ) з безпосередньо подальшою ( $i=3$ ) роботою на хватці ( $j=1$ ) в днях.

Отримані результати ув'язки робіт потоку, для наочності зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Початок та закінчення робіт будівельного потоку при двосторонньому обмеження на суміщення процесів за умови безперервного виконання критичних робіт

№ робіт, $i$	Захватки, $j$							
	I		II		III		IV	
	$t_{i,1}^II$	$t_{i,1}^3$	$t_{i,2}^II$	$t_{i,2}^3$	$t_{i,3}^II$	$t_{i,3}^3$	$t_{i,4}^II$	$t_{i,4}^3$
1	0	6	6	11	11	17	17	24
2	5	10	10	12	15	19	22	24
3	9	15	15	17	18	23	23	26
4	14	18	18	19	22	27	27	30

$t_{i,j}^II$  – початок роботи  $i$  на хватці  $j$ ;

$t_{i,j}^3$  – закінчення роботи  $i$  на хватці  $j$ .

Порівняльна характеристика використання різних методів ув'язки робіт будівельних потоків при двосторонньому обмеження на суміщення процесів в умовах: а) безперервності використання кількісного складу трудових ресурсів [9]; б) безперервності завантаження фронтів (захваток) робіт [10]; в) безперервності виконання критичних робіт, розглянутих у цій статті (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняльна характеристика результатів ув'язки робіт будівельних потоків, виконаної різними методами при двосторонньому обмеження на суміщення процесів

Метод розрахунку	$T_{заг}$	$\Delta t_i$	$\Delta t_j$
а. Безперервності використання кількісного складу трудових ресурсів	35	0	24
б. Безперервності завантаження фронтів (захваток) робіт	35	35	0
в. Безперервності виконання критичних робіт (розглянутий у цій статті)	30	10	5

$\Delta t_i$  – простой бригад робітників, дні;

$\Delta t_j$  – простой фронтів (захваток) робіт, дні;

$T_{заг}$ , – загальна тривалість, дні.

Залежно від умов виробництва, ґрунтуючись на даних наведених у таблиці 2, можна легко обґрунтувати з економічної точки зору вибір того чи іншого методу ув'язки робіт розглянутого потоку.

**Висновки.** 1. Виконаними дослідженнями доведено високу результативність планування робіт будівельних потоків з використанням запропонованого методу, за рахунок раціоналізації ув'язки окремих будівельних процесів в умовах заданих обмежень, які встановлюються інноваційними технологічними процесами. Отримані результати дають підставу рекомендувати розроблений метод для широкого практичного застосування при плануванні будівельного виробництва.

2. Раціоналізація планування інноваційних будівельних виробничих процесів, скорочення до сучасних світових стандартів тривалості всіх етапів життєвого циклу реалізації будівельних проєктів, на наш погляд, є одним з дієвих кроків для можливості ефективної виробничої діяльності будівельних компаній України.

#### Перелік посилань

1. Егоров, А. Н., Шприц, М. Л., & Нагманова, А. Н. (2011). Инновационность в строительной сфере экономики как инструмент снижения стоимости, сокращения сроков и повышения качества строительства. *Проблемы современной экономики*, 3, 251-252.
2. Лаухін, Д.В., Дадіверіна, Л.М., Твердохліб, О.М., & Мацюк, І.М. (2020). Аналіз застосування в будівельному виробництві адитивних технологій 3D-друку. *Збірник наукових праць НГУ*, 61, 163-177  
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.163>
3. Борута, Я. (2017). *Как работает метод критического пути (СРМ) для продуктового бизнеса?* <https://worksection.com/blog/cpm.html>
4. Дикман, Л.Г. (2006). *Организация строительного производства. Учебник для строительных вузов*. Издательство Ассоциации строительных вузов.
5. Кирнос, В.М., Залуний, В.Ф., & Дадиверина, Л.Н. (2005). *Организация строительства*. Порог.
6. Фатхутдинов, Р.А. (2001). *Организация производства: Учебник*. ИНФРА-М.
7. Ковальчук, Я.О. (2017). *Технологія та організація будівництва: Навчальний посібник*. Тернопіль.
8. Ушацький, С.А., Шейко, Ю.П., & Тригер, Г.М. (2007). *Організація будівництва. Підручник*. (за редакцією С.А. Ушацького). Київ: Кондор.
9. Дадиверина, Л.Н., & Одинский, В.Г. (2012). Методика расчета строительных потоков при условии непрерывности выполнения работ и двухстороннем ограничении на совмещение работ. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 7-8, 101-106.
10. Дадиверина, Л.Н. (2010) Методика расчётов строительных потоков при условии непрерывной загрузки фронтов работ и двустороннего ограничения на их совмещение. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 4-5, 31-37.

#### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Сокращение продолжительности реализации строительных проектов, на основе моделирования рационального совмещения технологических процессов, учитывающих ограничения, установленные инновационными технологиями и совершенствование методов планирования и организации строительного производства, что позволит уменьшить количество организационных ошибок.

**Методика.** Выполнен анализ условий ограничения на совмещение технологически зависимых работ. Разработана математическая модель, отражающая заданные двусторонние ограничения на совмещение технологически смежных работ. Разработан метод, позволяющий определить рациональное начало и окончание работ потока на всех захватках с учетом заданных двусторонних ограничений на их совмещение при непрерывности выполнения критических работ.

**Результаты исследований.** Разработаны модель и метод увязки работы специализированного строительного потока с учетом двустороннего ограничения на совмещение процессов, которое предусматривает современные инновационные строительные проекты, что позволяет сократить продолжительность реализации строительных проектов и исключить ошибки в планировании и организации строительного производства.

**Научная новизна.** Теоретически обоснована целесообразность учета двухстороннего ограничения на совмещение процессов при расчетах строительных потоков при условии непрерывного выполнения критических работ – выполнено впервые. Разработанная концепция отличается тем, что ограничения на совмещение технологически зависимых работ может быть наложено одновременно путем совмещения технологично предыдущей и последующей работами.

**Практическое значение.** Сокращение продолжительности этапов циклов реализации строительных проектов в Украине до требований современных мировых стандартов за счет инновационного производственных процессов с учетом рационального совмещения строительных потоков как во времени, так и в пространстве.

**Ключевые слова:** планирование и организация строительного производства, совмещение работ, аддитивные технологии, 3D печать, продолжительность строительства, строительные потоки.

#### ABSTRACT

**Purpose.** Reducing the duration of construction projects, based on modeling the rational combination of technological processes that take into account the constraints imposed by innovative technologies and improving methods of planning and organization of construction production, which will reduce organizational errors.

**The methods.** The analysis of conditions of restriction on combination of technologically dependent works is executed. A mathematical model has been developed that reflects the set bilateral restrictions on the combination of technologically related works. A method has been developed that allows to determine the rational start and end of flow work on all grippers, taking into account the set bilateral restrictions on their combination with the continuity of critical work.

**Findings.** A model and method of linking the work of specialized construction flows have been developed, taking into account the bilateral constraint on the combination of processes, which provides for modern innovative construction projects, which reduces the duration of construction projects and eliminates errors in planning and organizing construction.

**The originality.** The expediency of taking into account the bilateral restriction on the combination of processes in the calculation of construction flows under the condition of continuous critical work is theoretically substantiated - done for the first time. The developed concept differs in that the restriction on the combination of technologically dependent works can be imposed simultaneously by combining technologically previous and subsequent works.

**Practical implimentation.** Reducing the duration of the stages of construction project cycles in Ukraine to the requirements of modern world standards through innovative planning of production processes taking into account the rational combination of construction flows both in time and space.

**Keywords:** planning and organization of construction production, combination of works, additive technologies, 3D printing, construction duration, construction flows.