

УДК 69.05:658.7:005.334

Савченко О. С., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-0498-218X>Савченко Л. Г., <https://orcid.org/0000-0002-9444-2031>

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ОПТИМАЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИСКОРЕНОГО БУДІВНИЦТВА

Анотація

Вступ. Потреба у прискореному будівництві набуває особливої гостроти в умовах подолання наслідків надзвичайних ситуацій, військових конфліктів, а також під час розгортання масштабних промислових і логістичних комплексів у стислі строки. Традиційна модель організації будівництва, що передбачає поетапне планування з тривалими циклами накопичення запасів, вичерпала свій потенціал у динамічному середовищі, оскільки вона не здатна гнучко реагувати на дефіцит часового ресурсу. У зв'язку з цим, актуальність дослідження зумовлена об'єктивною необхідністю розроблення нових моделей логістичного забезпечення, які б дозволили трансформувати логістику з допоміжної функції на інтелектуальний драйвер виробничого процесу.

Проблематика логістичного забезпечення прискореного будівництва охоплює низку критичних викликів, першочерговим серед яких є синхронізація процесів постачання та монтажу. В умовах зведення об'єктів у стислі строки, таких як модульні споруди чи мобільні госпіталі, практично відсутній часовий ресурс на складування, тому будь-яка затримка постачання навіть на декілька годин призводить до простою техніки та персоналу. Це зумовлює необхідність переходу на систему Just-in-Time («точно в строк»), де матеріали подаються «з коліс» безпосередньо в зону монтажу.

Паралельно постає проблема дефіциту складських і маневрових площ, оскільки високі темпи робіт вимагають одночасної присутності на майданчику значної кількості ресурсів. Надмірне накопичення матеріалів призводить до «затоварення» території, що блокує під'їзні шляхи та роботу кранів; розв'язанням цієї проблеми стає створення проміжних логістичних хабів і консолідаційних центрів за межами об'єкта.

Мета. розробити модель оптимальної організації логістичного забезпечення прискореного будівництва соціальної інфраструктури, спрямовану на мінімізацію впливу логістичних і ресурсних обмежень.

Матеріали і методи. аналітичні: аналіз ланцюга постачання, визначення всіх етапів руху матеріалів від виробника до майданчика та ідентифікація ризикових точок. Порівняльний аналіз: зіставлення вартості та термінів постачання імпортованих і вітчизняних аналогів; організаційне моделювання: моделювання «вузьких місць»: створення імітаційної моделі (мережевого графіка) для оцінки впливу затримки поставки критичного матеріалу (бетон, арматура, сендвіч-панелі) на загальний термін реалізації проекту.

Результати. зроблена спроба ідентифікувати та класифікувати ключові логістичні ніші у поточному будівельному ланцюзі постачання. Проаналізовані організаційні схеми, які успішно використовують комплектні поставки для мінімізації складських потреб. Обґрунтована економічна доцільність переходу на вітчизняні матеріали як спосіб зменшення залежності від міжнародної логістики. Розроблено рекомендації щодо організаційного планування постачання в умовах постійної зміни безпекової ситуації.

Висновки. Аналіз особливостей організації логістики дозволяє стверджувати, що в умовах прискореного будівництва часовий чинник набуває критичного значення, внаслідок чого логістична система перестає виконувати лише допоміжну роль і стає стратегічним чинником, що визначає загальний темп робіт. У зв'язку з цим, перехід до моделі постачання Just-in-Time постає як

обов'язкова умова для уникнення виробничих простоїв і забезпечення безперервності монтажних процесів. Важливим аспектом оптимізації простору є використання зовнішніх консолідаційних центрів (хабів), що визначено як найбільш ефективний спосіб розв'язання проблеми дефіциту площ на будівельному майданчику, забезпечуючи високу маневровість техніки та належну організацію під'їзних шляхів.

Ключові слова: логістичне забезпечення, модульне будівництво, прискорене будівництво, ризику в будівництві, Fast-Track, Just-in-Time.

Вступ

Організація прискореного будівництва, особливо в умовах обмежень, є однією з найскладніших управлінських задач у будівельній галузі. Вона вимагає не просто швидшого виконання робіт, а фундаментальної зміни організаційної моделі та переходу від послідовного до паралельного виконання етапів.

Сучасний етап розвитку будівельної галузі характеризується стрімким зростанням попиту на об'єкти прискореного зведення, що зумовлено необхідністю швидкого відновлення інфраструктури, розгортання модульних містечок та спорудження об'єктів критичного призначення. У таких проєктах часовий ресурс стає головним обмеженням, що докорінно змінює вимоги до системи управління ресурсами. Актуальність теми дослідження зумовлена тим, що традиційні підходи до логістики, орієнтовані на значні складські запаси та лінійні графіки, виявляються неефективними в умовах дефіциту часу та простору. Оптимальна організація логістичного забезпечення стає фундаментом прискореного будівництва, оскільки будь-яка неузгодженість у ланцюгу постачання здатна повністю зупинити виробничий процес.

Практична цінність результатів дослідження дозволить будівельним організаціям ефективно маневрувати ресурсами на обмежених майданчиках, уникати критичних простоїв та забезпечувати високу економічну ефективність реалізації об'єктів у критично короткі терміни.

Теоретичні положення формування та розвитку логістичної інфраструктури будівельного підприємства дослідженні у працях вітчизняних та закордонних вчених, а саме: Бауэрокс Д. Дж. Ковальської Л. Л., Колодіна В. С., Кліменко В. В., Крикавського Є. В., Куваєва Н. Г., Кузнецова М. М., Сергеева В. І., Тарана С. А., Чернописької М. В., та ін.

Основна частина

Ключовим методом прискореного будівництва є Fast-Track (прискорений шлях).

Fast-Track — це організаційно-технологічний підхід, за якого проєктування та будівництво виконуються паралельно, а не послідовно, як у традиційній моделі.

Тобто, коли інженери ще закінчують проєктування наступних етапів (наприклад, внутрішніх мереж та оздоблення), будівельники вже розпочинають роботи на попередніх (наприклад, зведення каркаса та фундаменту). Основною метою прискореного будівництва є максимальне скорочення загального строку проєкту шляхом накладання фаз робіт.

Порівняння традиційної та прискореної моделі будівництва надано у **табл. 1**.

Таблиця 1

Порівняння між моделями

Характеристика	Традиційна модель	Fast-Track модель
Проєктування	Завершується на 100 % перед початком будівництва.	Видається поетапно (пакетами робіт).
Етапність	Послідовна: проєктування → постачання → будівництво	Паралельна: проєктування, постачання та будівництво йдуть одночасно
Ризик	Менший, але довший термін.	Вищий (ризик змін та невідповідностей), але швидша реалізація.

*складено авторами на основі [6]

Успішна організація Fast-Track має свої особливості та вимагає впровадження спеціальних управлінських рішень:

А. Управління проектуванням та інформацією:

- пакети робочої документації: проєкт ділиться на логічні пакети (наприклад, «нульовий цикл», «каркас», «фасад», «інженерія»). Дозвіл на будівництво отримується на весь об'єкт, але роботи стартують за першим пакетом, поки інші ще проєктуються;
- використання BIM (Building Information Modeling): життєво необхідно. Всі зміни та координація між архітекторами, конструкторами та інженерами відбуваються в єдиній 3D-моделі в режимі реального часу, щоб мінімізувати колізії (зіткнення).

Б. Управління ланцюгом постачання (Procurement):

- рання закупівля критичних позицій (Long Lead Items): необхідно на ранніх стадіях проєкту визначити матеріали чи обладнання, які мають довгий строк виготовлення або постачання (наприклад, трансформатори, ліфти, спеціалізовані панелі) та запустити їхнє замовлення ще на етапі ескізного проєкту;
- комплектне постачання (JIT — Just-in-Time): матеріали доставляються безпосередньо на робоче місце або на мінімальний склад, щоб уникнути простоїв, мінімізувати обсяги зберігання (дорогих матеріалів в умовах безпекових ризиків) та зменшити втрати.

В. Управління будівництвом:

- нарощування потужностей: залучення більшої кількості бригад та техніки для паралельного виконання робіт, які традиційно виконувалися б послідовно (наприклад, одночасне зведення стін і монтаж інженерних мереж на різних поверхах);
- модульність і збірність: максимальне використання готових заводських елементів (модулів, панелей) для перенесення частини робіт із будівельного майданчика на завод, де якість контролюється краще, а швидкість виробництва вища [1].

Україна вже має досвід і свою специфіку організації прискореного будівництва в умовах обмежень, як-то настання воєнного чи повоєнного стану, коли організація Fast-Track вимагає додаткової уваги до певних обмежень (табл. 2). Модульні технології дозволяють ефективно нейтралізувати основні обмеження прискореного будівництва.

Таблиця 2

Обмеження при організації Fast-Track

Обмеження	Організаційне рішення Fast-Track (за допомогою модульних технологій)
Логістичні	Диверсифікація постачальників (робота з кількома джерелами) та перехід на місцеві матеріали для зменшення залежності від імпорту та підвищеної вартості перевезень. Також, якщо сировина (сталь, деревина, ізоляція) може бути доставлена на один завод ефективніше, ніж на 20 різних майданчиків, це концентрує логістичні зусилля та зменшує ризик затримок.
Безпекові	Зменшення часу перебування матеріалів на майданчику (JIT-поставки) та скорочення загального строку будівництва для мінімізації ризику пошкодження об'єкта. Загальний час, який персонал і матеріали перебувають у небезпечній зоні, скорочується до мінімуму. Основна робота виконується у безпечному місці.
Ресурсні (кадрові)	Максимальне використання модульних і збірних технологій, що вимагають меншої кількості робочої сили безпосередньо на майданчику. Мінімізується потреба в рутинній праці (зварювання, утеплення, прокладання внутрішніх комунікацій) на майданчику, переходячи на індустріальні методи, де залучається менша кількість висококваліфікованих монтажників.

Обмеження	Організаційне рішення Fast-Track (за допомогою модульних технологій)
Обмеження якості	Стандартизоване заводське виробництво гарантує, що всі об'єкти соціальної інфраструктури, побудовані за цією технологією, матимуть однаково високу якість.
Фінансові	Поетапне фінансування, прив'язане до пакетів робіт, що дозволяє залучати кошти відповідно до фактичного прогресу проєкту, а не чекати на завершення всього проєктування.

**складено автором на основі [7]*

Тобто, організація прискореного будівництва є ефективним інструментом для швидкого відновлення соціальної інфраструктури, проте його успіх на 80 % залежить від злагодженості та якісної та гнучкої управлінської координації між проєктувальниками, постачальниками та будівельниками.

Модульне (або префабриковане, збірне) будівництво — це метод, за якого значна частина конструктивних елементів або цілі функціональні блоки (модулі) виготовляються в контрольованих заводських умовах, а потім транспортуються на будівельний майданчик для швидкого монтажу (табл. 3).

Таблиця 3

Переваги модульних технологій у прискоренні проєкту

Перевага	Організаційний ефект (Fast-Track)
Паралельність процесів	Зведення фундаменту на майданчику та виготовлення стін / модулів на заводі відбуваються одночасно. Це скорочує загальний строк проєкту до 30–50 % порівняно з традиційним будівництвом.
Скорочення «мокрого» циклу	Заводське виготовлення включає більшість внутрішніх і зовнішніх робіт, мінімізуючи потреби в «мокрих» процесах (штукатурка, стяжка) на майданчику. Це критично для прискорення будівництва у холодну пору року.
Контроль якості	Виробництво відбувається під постійним контролем у заводському цеху, що знижує кількість дефектів та необхідність у тривалих виправленнях на майданчику
Ефективність ресурсів	Зменшується потреба у великій кількості робочої сили на майданчику. Роботи виконуються меншими, висококваліфікованими монтажними бригадами

**складено на основі [2]*

Ключовим аспектом в організації прискореного будівництва є логістика, яка стає найважливішим етапом у модульному будівництві, змінюючи тривалий процес традиційного будівництва (табл. 4).

Таблиця 4

Етапи логістики в організації прискореного будівництва

Етап логістики	Організаційні вимоги
1. Транспортування модулів	Спеціалізована техніка: потрібен великогабаритний транспорт (трали) і супровід, оскільки модулі часто перевищують стандартні дорожні габарити. Планування маршруту: жорстке планування маршруту з урахуванням обмежень на мостах, дорогах і часових вікон для перевезення.

Етап логістики	Організаційні вимоги
2. Вантажно-розвантажувальні роботи	Вантажно-розвантажувальні операції: необхідна наявність потужних автокранів із достатнім вильотом стріли та високою вантажопідйомністю. Планування вантажно-розвантажувальних робіт є критичним шляхом проекту.
3. Комплектність постачання	Постачання ЛТ (Just-in-Time): модулі повинні прибувати на майданчик у точній послідовності монтажу (саме в той день, коли їх готові підіймати) та не створювати «логістичних пробок».

* складено авторами на основі [2]

Актуальність дослідження логістичних потоків модульного будівництва в умовах ризику обумовлена стрімким переходом будівельної галузі до індустріальних методів зведення споруд, де логістика стає не просто елементом забезпечення, а частиною технологічного конвеєра. У модульному будівництві до 80 % обсягу робіт переноситься з будівельного майданчика в цехові умови, що робить готовий модуль надзвичайно вразливим об'єктом транспортування. Будь-який ризик у ланцюгу постачання — від затримки на заводі до пошкодження модуля під час перевезення — зупиняє весь проект, оскільки монтаж кожного наступного елемента неможливий без попереднього (табл. 5).

Таблиця 5

Логістичний потік модульного будівництва в умовах ризику

Блок схеми	Опис процесу	Роль у прискоренні
I. ВИРОБНИЦТВО (контрольований простір)	Завод (Off-site): виготовлення, внутрішнє оздоблення та «упаковка» модулів. Ключовий момент: створення транспортбельних секцій, які відповідають дорожнім стандартам.	Забезпечує якість та швидкість виготовлення, не залежну від погоди на майданчику.
II. ПЛАНУВАННЯ РИЗИКІВ (логістичний штаб)	Аудит маршруту: перевіряння мостів, висоти шляхопроводів і радіусів поворотів. Безпековий аналіз: визначення «безпекових вікон» (нічні перевезення) та розроблення альтернативних маршрутів на випадок перекриття.	Мінімізує час простою через дорожні та безпекові обмеження.
III. ТРАНСПОРТУВАННЯ (Fast-Track)	Супровід та моніторинг: використання GPS-трекерів та спеціалізованих тралів для великогабаритного вантажу. ЛТ-потік: модулі відправляються лише тоді, коли майданчик готовий їх прийняти.	Забезпечує безперервність потоку робіт.
IV. БУДІВЕЛЬНИЙ МАЙДАНЧИК (обмежений простір)	Синхронізація «Кран-Трал»: модуль, щойно прибув, одразу перевантажується на фундамент / каркас. Мінімізація складу: відсутність великих складів; трал є тимчасовим складом.	Забезпечує найшвидший монтаж та мінімізує ризики зберігання матеріалів на відкритій території.
V. ЗВ'ЯЗОК І КООРДИНАЦІЯ	Постійний зворотний зв'язок: обмін даними між логістичним штабом, виробництвом та монтажними бригадами для оперативного коригування графіка постачання.	Критично для паралельних процесів (Fast-Track).

* складено на основі [5]

Особлива гострота питання полягає в тому, що модульні блоки є великогабаритними та специфічними вантажами, доставляння яких вимагає складного маршрутного планування та врахування багатьох змінних ризику: від пропускнув здатності доріг до наявності спеціалізованої підйимальної техніки. В умовах економічної нестабільності або кризових ситуацій виникають додаткові логістичні загрози, такі як розрив ланцюгів постачання комплектуючих, дефіцит спеціалізованого транспорту та зростання вартості палива. Оскільки модульне будівництво часто застосовується для екстреного відновлення житла або створення об'єктів критичної інфраструктури, управління ризиками логістичного потоку стає гарантом національної безпеки та соціальної стабільності.

Науковий розгляд даного питання дозволяє розробити адаптивні механізми захисту логістичних процесів, зокрема через створення резервних маршрутів, диверсифікацію постачальників сировини для заводів та впровадження систем моніторингу цілісності конструкцій у режимі реального часу. Таким чином, дослідження логістичних потоків у цій сфері є ключем до підвищення життєстійкості будівельних проєктів та забезпечення їхньої реалізації у критично короткі терміни, попри вплив зовнішніх чинників дестабілізації.

Логістичну схему модульного будівництва в умовах ризику представлено на **рис. 1**.

Ключові висновки з графічної схеми:

1. Виробництво як постачальник послуги, а не матеріалу (блок 1): завод надає готовий «будівельний блок», що вимагає мінімум фінальних робіт на місці. Це спрощує організацію робіт на майданчику та скорочує час до введення об'єкта в експлуатацію.

2. Інформація є ресурсом (блок 2): успіх схеми залежить не від швидкості самого трала, а від швидкості обробки інформації про зміни на дорогах, погоду та безпекову ситуацію.

3. Головний стримувальний чинник — кран (блок 3): у цій схемі кран, який підіймає модуль, є «вузьким місцем». Вся логістика має бути підлаштована під його графік роботи та потужності.

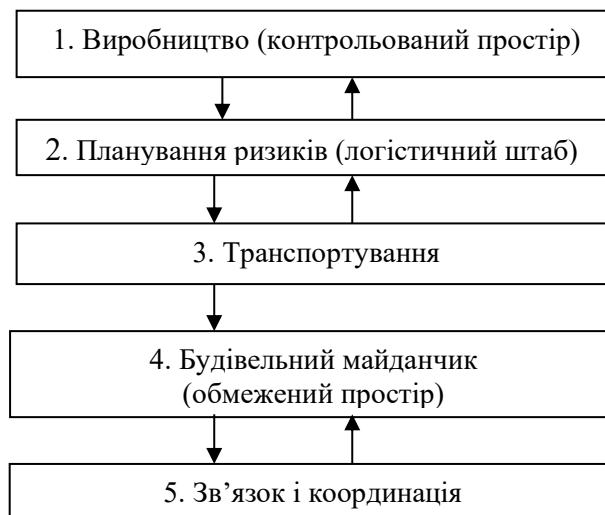


Рисунок 1 — Логістична схема модульного будівництва в умовах ризику

**побудовано авторами*

Логістична схема модульного будівництва в умовах ризику — це складна система, де кожен етап критично залежить від таймінгу. На відміну від традиційного будівництва, тут основна активність зміщена з будівельного майданчика на завод та в дорогу. Логістична схема являє собою високотехнологічний процес, де стратегічне планування зміщується з будівельного майданчика на етап заводського виготовлення та транспортування. В основі такої схеми лежить концепція, яка

передбачає, що архітектурні рішення приймаються з урахуванням габаритів доріг, висоти мостів та вантажопідйомності кранів ще на стадії проектування. В умовах підвищених ризиків, таких як воєнні дії, нестабільність енергопостачання або перебої з паливом, схема переходить від лінійного управління до адаптивного.

Першим критичним вузлом є закупівельна логістика, де замість моделі постачання «точно в строк» впроваджується стратегія створення страхових буферів сировини на заводі, що дозволяє виробництву працювати автономно протягом кількох місяців у разі розриву логістичних ланцюжків. Виробничий етап інтегрується з цифровою моделлю будівлі (BIM), що забезпечує ідеальну точність геометричних параметрів модулів, мінімізуючи ризик того, що конструкції не зістикуються на майданчику.

Другим етапом є транспортна логістика, яка в умовах ризику стає найбільш вразливою ланкою. Схема передбачає обов'язкову розробку основного та кількох резервних маршрутів, а також використання спеціалізованого парку низькорамних тралів з пневматичною підвіскою для захисту внутрішнього оздоблення модулів від вібрацій на пошкоджених дорогах. Для нівелювання ризику розсинхронізації заводського циклу та готовності фундаменту до схеми включаються проміжні логістичні хаби (буферні склади), де модулі можуть зберігатися під захисним термопакуванням.

Завершальний етап — монтажна логістика, яка реалізується за принципом «з коліс». В умовах ризику цей процес підсилюється наявністю автономного енергозабезпечення майданчика та дублюванням вантажопідйомної техніки. Увесь логістичний ланцюжок супроводжується безперервним інформаційним потоком: GPS-моніторингом вантажу, датчиками контролю стану конструкцій у реальному часі та динамічним перерахунком графіка монтажу у разі затримок. Така суцільна інтеграція дозволяє перетворити будівництво на швидкий процес збирання, де логістика виконує роль головного конвеєра, стійкого до зовнішніх шоків [4].

Послідовність процесів перетворюється на інтегровану систему, де логістика, виробництво та монтаж жорстко синхронізовані.

Розроблена логістична схема модульного будівництва в умовах ризику має функціонувати як динамічний документ, що «дихає» та регулярно оновлюється відповідно до змін оперативних обставин. Основним інструментом управління у цій схемі виступає матриця ризиків (табл. 6), яка детально враховує ймовірність перекриття ключових транспортних артерій, можливі затримки на блокпостах, стан дорожнього покриття та безпекові загрози в конкретних регіонах. Для кожного ідентифікованого ризику прописується алгоритм дій, що дозволяє логістичній службі миттєво реагувати на форс-мажорні обставини без зупинки всього виробничого циклу.

Другим критичним компонентом є розроблення детальних таймінгів, що охоплюють увесь шлях модуля: від точного часу виїзду з території заводу та розрахункового часу транзиту через контрольні точки до моменту прибуття на майданчик і безпосереднього часу підйому конструкції краном. Такий мікроменеджмент часу необхідний для реалізації концепції монтажу «з коліс», де будь-яке відхилення графіка одного трала може призвести до простою дорого вартісної техніки та всієї монтажної бригади.

Третім обов'язковим елементом схеми є чіткий план комунікацій, який визначає відповідальних осіб за сповіщення про зміну маршрутів, координацію дій із дорожніми службами, військовими адміністраціями та місцевими органами влади. Це забезпечує єдине інформаційне поле для всіх учасників процесу — від водія трала до керівника будівництва. Завдяки такій структурованій організації вдається максимально реалізувати головну перевагу модульної технології — надвисоку швидкість монтажу, ефективно нівелюючи при цьому критичні ризики, пов'язані з транспортуванням негабаритних вантажів у складних та непередбачуваних умовах. Впровадження цієї схеми перетворює логістику з допоміжного сервісу на інтегровану систему безпеки та ефективності, що гарантує успішне завершення проекту навіть за умов високої невизначеності [3].

Таблиця 6

Матриця логістичних ризиків модульного проекту

Категорія ризику	Опис загрози	Ймовірність / плив	Превентивні заходи (запобігання)	План реагування (якщо сталось)	Відповідальна особа
Транспортний	Блокування маршруту (ДТП, ремонт, блокування)	Висока / Критичний	Попередній об'їзд (route survey) за 24 год до виїзду. Розробка 2-х альтернативних шляхів.	Перенаправлення колони на резерв. маршрут; узгодження з дорожньою поліцією/ВЦА.	Диспетчер логістики
Технічний	Пошкодження модуля під час руху (деформація рами, тріщини в оздобленні)	Середня / Високий	Використання тралів з гідро підвіскою; встановлення датчиків нахилу та вібрації.	Зупинка колони, дефектовка на місці; залучення мобільної бригади реставраторів.	Інженер з якості
Безпековий	Обмеження руху через повітряні тривоги або комендантську годину	Висока / Середній	Планування виїздів з урахуванням "безпекових вікон"; моніторинг офіційних каналів оповіщення.	Зупинка в заздалегідь визначених безпечних "точках відстою" (паркінги, АЗС з охороною).	Керівник колони
Операційний	Поломка монтажного крана на майданчику	Низька / Критичний	Регулярне ТО перед початком фази монтажу; наявність критичного набору запчастин на місці.	Переспрямування тралів, що в дорозі, на буферний склад; виклик резервного крана.	Виконроб
Погодний	Пориви вітру >12 м/с (заборона підйому модулів)	Середня / Високий	Моніторинг погоди (прогноз на 48 год); використання анемометрів на майданчику.	Тимчасове складування модулів на майданчику; консервація відкритих вузлів від опадів.	Оператор крана

*складено на основі [1]

Щоб мінімізувати ключові ризики під час організації прискореного будівництва визначимо логічне розв'язання проблеми (табл. 7).

Таблиця 7

Матриця ризиків та рішень

Етап	Ключовий ризик	Логістичне рішення
Постачання	Дефіцит матеріалів	Мультимодальні перевезення, диверсифікація постачальників.
Транспорт	Пошкодження оздоблення	Посилена система кріплення та пневматична підвіска тралів.
Монтаж	Помилка стикування	Використання цифрових двійників (BIM) для перевірки допусків.

*складено на основі [3]

Для мінімізації ризиків у такій схемі найкраще працює стратегія BIM-логістики. Це коли логістичні дані (час прибуття трала, вага модуля, черговість монтажу) інтегровані в 3D-модель будівлі. Це дозволяє віртуально «програти» процес доставки та монтажу ще до початку виробництва.

Побудуємо спрощений мережевий графік логістичної схеми прискореного будівництва та визначимо критичний шлях, а також ключові робочі пакети (табл. 8): виділяємо основні роботи, які проходять паралельно (згідно з принципом Fast-Track) і залежать від логістики.

Спрощена логістична модель мережевого графіка

Номер вузла	Назва етапу (об'єднана)	Зв'язки та Критичний шлях
1	Проектування та закупівлі	Початок — стартові роботи (вузли А, В, С)
2	Планування логістичних потоків	Головний перехід до бази (вузол Е)
3	Підготовка фундаменту	Паралельний процес (вузли Е, F)
4	Виробництво та транспортування	Критичний етап (вузол G)
5	Фінальний монтаж	Завершення (вузол H)

*складено авторами

Мережевий графік відображає послідовність робіт (стрілками) та події (вузлами). Головна його цінність – виділення критичного шляху (КШ).

Критичний шлях (КШ) — це найдовший ланцюг робіт у проєкті. Будь-яка затримка на цьому шляху призводить до затримки всього проєкту.

Особливості критичного шляху в даній схемі: у традиційному будівництві КШ часто включає фундамент → каркас → мережі. У схемі Fast-Track з модулями КШ буде проходити через роботу з найбільшою тривалістю, яка не може бути виконана паралельно (рис. 2).

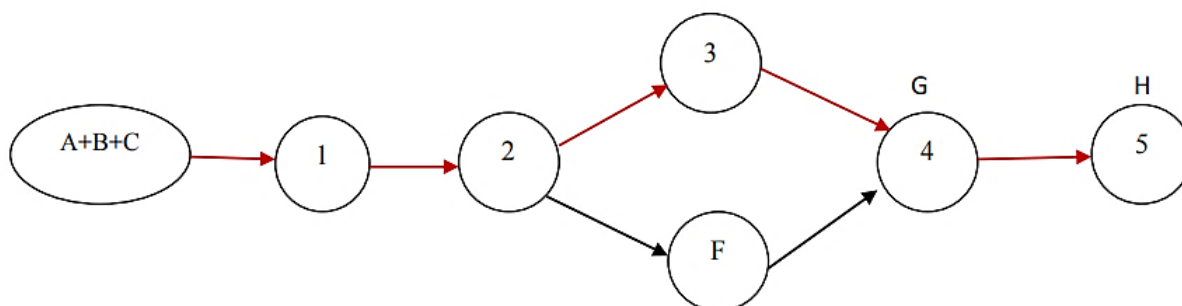


Рисунок 2 — Спрощений мережевий графік логістичної моделі прискореного будівництва
*побудовано авторами

Запропонований мережевий графік відображає структуру організації прискореного будівництва.

Стартові роботи (А+В+С) — це блок підготовчих робіт, а саме: процес проектування, виготовлення модулів (завод), підготовка майданчика (роботи нульового циклу, підготовка під'їзних шляхів та кранового майданчика). Проектна документація (блок 1) на фундамент і каркас необхідна для запуску будівельних робіт та замовлення модулів. Планування логістики та дозвіл (блок 2) передбачає аудит маршруту, отримання дозволів на негабарит, розробку безпекових вікон (логістичний штаб). Завершення всіх робіт з фундаментом фокусується у блоці 3. Паралельні роботи (F) — монтаж фундаменту, постачання модулів на майданчик (Трал / Кран-Трал). Монтаж каркасу (прискорений), тобто безпосередній підйом та з'єднання модулів на фундаменті складає блок 4. Фінальні підключення інженерних мереж та комунікацій, завершення контролю якості та здача об'єкта в експлуатацію — блок 5.

Перші роботи (А, В, С) стартують одночасно. Після планування логістики частина робіт іде паралельно. Всі потоки сходяться у виробництві й транспортуванні. Фінальний монтаж можливий лише після завершення критичного етапу.

Використання МГ дозволяє:

- фокусувати ресурси: направляти управлінські зусилля (і гроші) на роботи, що лежать на критичному шляху;
- контролювати логістику: затримка роботи (дозвіл на маршрут) може паралізувати основний процес (виробництво), оскільки не можна виробляти модулі, якщо не знаєш, як їх доставити;
- оцінити резерви часу: виявити роботи, які мають резерв часу, і можуть бути відкладені без шкоди для загального терміну (наприклад, деякі роботи з благоустрою).

Висновки

Для успішної організації прискореного будівництва соціальної інфраструктури в умовах України ключовими чинниками є розроблення логістичної схеми транспортування модулів з урахуванням поточних безпекових і дорожніх обмежень, ефективне управління інтерфейсом між заводом-виробником (виготовлення) та генпідрядником (монтаж) як критичним елементом Fast-Track, а також економічне обґрунтування модульних рішень як способу зменшення загальних витрат проекту шляхом економії часу та мінімізації ризиків, попри потенційно вищу вартість самих модулів.

Окрему роль відіграє надійність ланцюга постачання, оскільки прискорене будівництво характеризується високою залежністю від стабільності роботи обмеженого кола контрагентів: збій на боці одного постачальника спричиняє «ефект доміно», порушуючи весь графік робіт, а будь-які форс-мажорні обставини (затори, погодні умови) стають критичними через відсутність часових резервів.

Виявлено, що зазначені виклики зумовлюють необхідність кардинальної зміни підходів до інформаційної прозорості та цифровізації процесів, оскільки традиційний документообіг не відповідає динаміці «швидких» проєктів. Відсутність моніторингу вантажів у реальному часі формує управлінський вакуум, що обґрунтовує доцільність упровадження BIM-технологій (4D та 5D моделювання), інтегрованих із логістичними системами для візуалізації та синхронізації графіків постачання з цифровою моделлю будівлі.

Список літератури

1. Manish Kumar Dixit, Varusha Venkatraj, Fatemeh Pariafsai, Jason Bullen. Site logistics factors impacting resource use on construction sites : a delphi study. *Frontiers. Frontiers in Built Environment*. 2022. Vol. 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.858135>.
2. Pamela C. Nolz. Optimizing construction schedules and material deliveries in city logistics: a case study from the building industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2021. No. 33. P. 846–878. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10696-020-09391-7>.
3. Hisham Said and Khaled El-Rayes. Optimal material logistics planning in congested construction sites. *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784412329.159>. URL: <https://www.researchgate.net/publication/262601645>.
4. Hisham Said and Khaled El-Rayes. Optimizing material logistics planning in construction projects. *Conference: Construction Research Congress*. 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/41109\(373\)120](https://doi.org/10.1061/41109(373)120). URL: <https://www.researchgate.net/publication/262601662>.
5. Автоматизація та роботизація складу і логістичних підприємств. URL: <https://sunone.com.ua/articles-uk/avtomatizaciya-ta-robotizaciya-skladu-i-logistichnih-pidpriemstv>.
6. Hisham Said and Khaled El-Rayes. Automated system for multi-objective optimization of construction supply and site logistics. *Conference: Proceedings, Annual Conference — Canadian Society for Civil Engineering*. 2013. URL: <https://www.researchgate.net/publication/289281020>.

7. Ahmet Anil Sezer, Anna Fredriksson. Paving the path towards efficient construction logistics by revealing the current practice and issues. *Logistics*. 2021. No. 5 (3). 53 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics5030053>.

References

1. Manish Kumar Dixit, Varusha Venkatraj, Fatemeh Pariafsai and Jason Bullen. Site logistics factors impacting resource use on construction sites : a delphi study. *Frontiers. Frontiers in Built Environment*. (2022). Vol. 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.858135> [in English].
2. Pamela C. Nolz. Optimizing construction schedules and material deliveries in city logistics : a case study from the building industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2021. No. 33. P. 846–878. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10696-020-09391-7> [in English].
3. Hisham Said and Khaled El-Rayes. Optimal material logistics planning in congested construction sites. *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World*. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784412329.159>. URL: <https://www.researchgate.net/publication/262601645> [in English].
4. Hisham Said and Khaled El-Rayes. Optimizing material logistics planning in construction projects. Conference: *Construction Research Congress*. 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/41109\(373\)120](https://doi.org/10.1061/41109(373)120). URL: <https://www.researchgate.net/publication/262601662> [in English].
5. Avtomatyzatsiya ta robotyzatsiya skladu i lohistychnykh pidpryemstv [Automation and robotization of warehouse and logistics enterprises]. URL: <https://sunone.com.ua/articles-uk/avtomatizaciya-ta-robotizaciya-skladu-i-logistichnih-pidpriemstv> [in Ukrainian].
6. Hisham Said and Khaled El-Rayes. Automated system for multi-objective optimization of construction supply and site logistics. Conference : *Proceedings, Annual Conference — Canadian Society for Civil Engineering*. 2013. URL: <https://www.researchgate.net/publication/289281020> [in English].
7. Ahmet Anil Sezer and Anna Fredriksson. Paving the path towards efficient construction logistics by revealing the current practice and issues. *Logistics*. 2021. No. 5 (3), 53 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics5030053> [in English].

Oleksandr Savchenko, *Ph.D., Associate Professor*, <https://orcid.org/0000-0003-0498-218X>
Lidiia Savchenko, <https://orcid.org/0000-0002-9444-2031>

Sumy National Agrarian University (CHAY), Sumy, Ukraine

OPTIMAL ORGANIZATION OF LOGISTICS OF ACCELERATED CONSTRUCTION

Abstract

Introduction. The need for accelerated construction becomes particularly acute in the context of overcoming the consequences of emergencies, military conflicts, as well as during the deployment of large-scale industrial and logistics complexes in a short time. The traditional model of construction organization, which involves phased planning with long cycles of stock accumulation, has exhausted its potential in a dynamic environment, since it is unable to flexibly respond to the shortage of time resources. In this regard, the relevance of the study is due to the objective need to develop new models of logistics support that would allow transforming logistics from an auxiliary function into an intelligent driver of the production process.

The issue of logistics support for accelerated construction covers a number of critical challenges, the primary among which is the synchronization of supply and installation processes. In conditions of construction of objects in a short time, such as modular buildings or mobile hospitals, there is practically no time resource for warehousing, so any delay in delivery even for a few hours leads to downtime of equipment and personnel. This necessitates the transition to the Just-in-Time system, where materials are supplied «from the wheels» directly to the installation area.

In parallel, the problem of shortage of warehouse and maneuvering areas arises, since the high pace of work requires the simultaneous presence of a significant number of resources on the site. Excessive accumulation of materials leads to «overcrowding» of the territory, which blocks access roads and the operation of cranes; the solution to this problem is the creation of intermediate logistics hubs and consolidation centers outside the facility.

Objective. To develop a model of optimal organization of logistical support for accelerated construction of social infrastructure, aimed at minimizing the impact of logistical and resource constraints.

Materials and methods. Analytical: supply chain analysis: determination of all stages of material movement from the manufacturer to the site and identification of risk points. Comparative analysis: comparison of the cost and delivery terms of imported and domestic analogues; organizational modeling: modeling of «bottlenecks»: creation of a simulation model (network graph) to assess the impact of a delay in the delivery of critical material (concrete, reinforcement, sandwich panels) on the overall project duration.

Results. An attempt was made to identify and classify key logistics niches in the current construction supply chain. Organizational schemes that successfully use complete deliveries to minimize warehouse needs were analyzed. The economic feasibility of switching to domestic materials as a way to reduce dependence on international logistics was substantiated. Recommendations were developed for organizational planning of supplies in conditions of constantly changing security situations.

Conclusions. Analysis of the features of logistics organization allows us to state that in conditions of accelerated construction, the time factor becomes critical, as a result of which the logistics system ceases to play only a supporting role and becomes a strategic factor that determines the overall pace of work. In this regard, the transition to the Just-in-Time supply model appears as a prerequisite for avoiding production downtime and ensuring the continuity of installation processes. An important aspect of space optimization is the use of external consolidation centers (hubs), which is defined as the most effective way to solve the problem of space shortage at the construction site, ensuring high maneuverability of equipment and proper organization of access roads.

Keywords: modular building, accelerated construction, logistics, risks in construction, Fast-Track, Just-in-Time.