

## ЗАСТОСУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ СИСТЕМ ТИПУ "РАМА-БУДІВЛЯ" ДЛЯ ПЕРЕКРИТТЯ ВЕЛИКИХ ПРОГОНІВ

Д.А. Юрков, Д.О. Банніков, д.т.н.

Дніпропетровськ

**А**наліз світової практики будівництва та реконструкції виявив новий підхід до вирішення проблеми відсутності територій для будівництва – розвиток підземної та надземної урбанізації. В ряді країн намітилась тенденція до максимального

використання для будівництва територій, зайнятих залізничними коліями, при цьому відбувається забудова простору не тільки під, але й над існуючою залізничною інфраструктурою. Такий підхід дозволяє розташовувати об'єкти будівництва в найбільш комерційно вигідних місцях, адже залізниці, як правило, проходять через центральні райони міст, займаючи при цьому досить значні території. Але надколійне будівництво потребує вирішення ряду питань. Одним із найбільш вагомих є пошук конструктивного рішення.

Конструктивні системи будівель над коліями можна поділити на дві групи, залежно від можливостей розташування опор між існуючими коліями:

каркасна та великопрогонові рами-будівлі. Будівлі першого типу не мають принципових особливостей, за винятком лише нетипової сітки колон. Їх будівництво можливе лише в місцях, де відстань між коліями дозволяє використати проміжні опори (рис.1). Будівлі другого типу мають просторову раму значного прогону, яка є несучою основою всієї будівлі. При цьому спорудження таких конструкцій не потребує постановки додаткових проміжних опор, що дає можливість "накрити" залізничні колії будівлями практично в будь-якому місці (рис. 2).

Якщо конструкції будівель першого типу вивчені досить детально і накопичений значний досвід їх будівництва, то великопрогонові рами-будівлі є новим видом конструкцій, які майже не досліджувались, особливо в Україні. Відсутність готових стереотипів для їх проектування потребує спеціального типологічного аналізу та розроблення нових конструктивних прийомів та підходів. Тому будівництво таких споруд у нашій країні можливе лише на основі детальних досліджень та розрахунків.

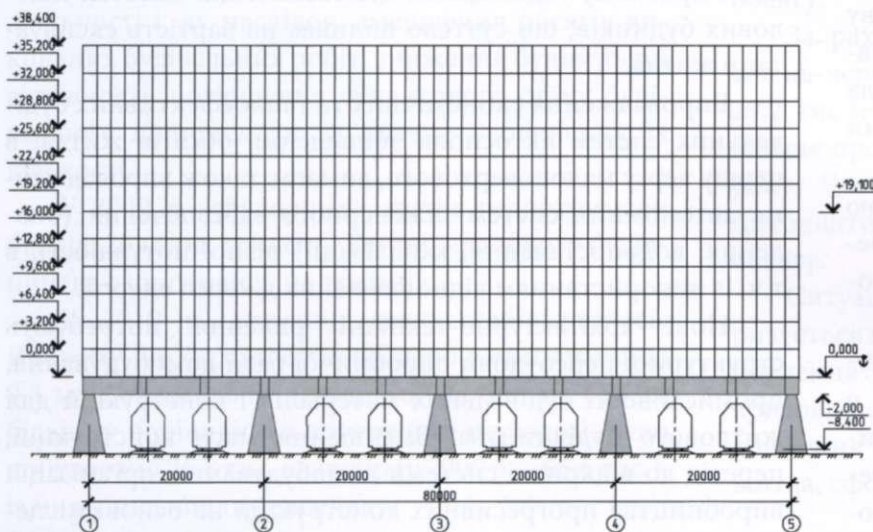


Рис. 1. Принципова схема перекриття залізничних колій із застосуванням будівель каркасної конструктивної системи.

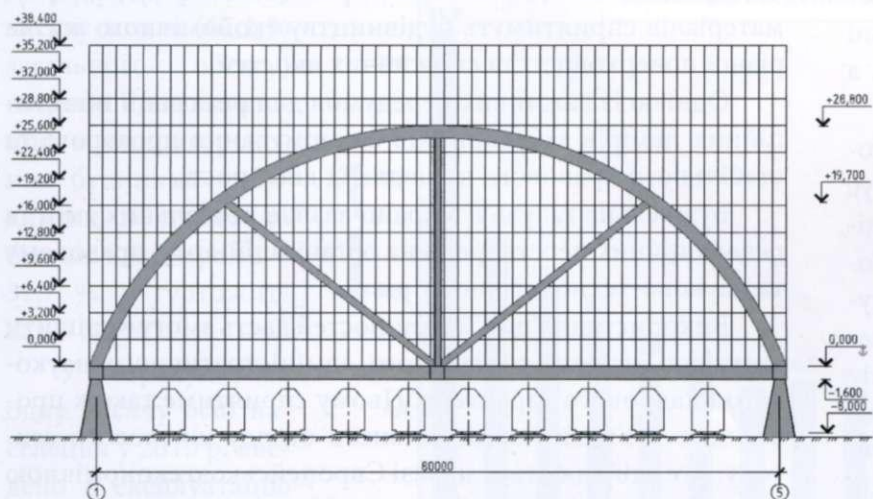


Рис. 2. Принципова схема перекриття залізничних колій із застосуванням великопрогонових рам-будівель.



Метою досліджень є виявлення конструктивних особливостей великопрогонових рам-будівель на основі можливих варіантів конструктивних систем будівель і пошук найбільш раціональних варіантів за визначеними показниками.

В якості об'єкта досліджень були обрані різні можливі варіанти великопрогонових рам-будівель запроектовані з урахуванням конкретного місця їх розташування – району Центрального залізничного вокзалу м. Дніпропетровськ, а тому параметри кожної будівлі чітко визначені: прогін – 80 м; ширина – 25 м; висота – 12 поверхів по 3,2 м та 16 поверхів по 3,2 м; призначення: 1-3 поверхи – торгові площі і 3-12 (16) поверхи – офісні приміщення.

Для об'єктивного порівняння варіантів виконувався розрахунок однієї плоскої рами для кожної системи будівлі методом скінченних елементів (МСЕ), який є досить універсальним і дає можливість реалізовувати складні геометричні обриси об'єкта та фізичну неоднорідність, враховувати складні закріплення і пов'язі між елементами конструкції, розраховувати не тільки статичні, але й динамічні задачі, задачі стійкості<sup>1</sup>.

Розрахунки виконувались за допомогою програмно-обчислювального комплексу SCAD<sup>2</sup>. Для кожної запропонованої конструктивної схеми з метою виконання подальшого розрахунку сформована розрахункова схема (РС), що являє собою плоску стержневу систему.

Для проведення розрахунків та досліджень всі наведені РС були розділені на групи (за ознакою геометричної подібності). Групи РС наведені на рис. 3.

РС № 1 – несучий елемент представлений у вигляді трикутника, складеного з ромбів та подібних трикутників. Варіант є досить цікавим з архітектурного погляду, але в окремих випадках може виявитись економічно не вигідним.

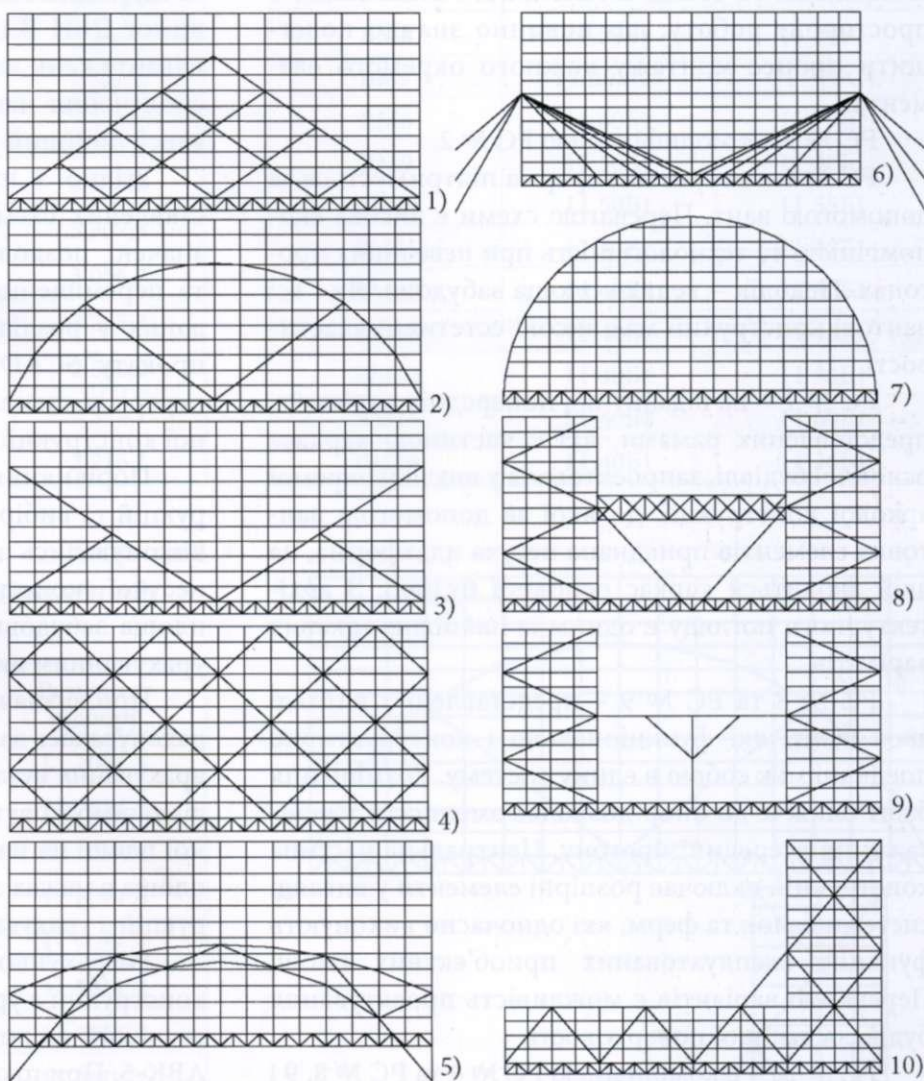


Рис. 3. Групи РС можливих варіантів великопрогонових рам-будівель: (I група РС № 1-7; II група РС № 8, 9; III група РС № 10).

<sup>1</sup> Перельмутер А.В. Метод конечных элементов и строительная механика. [Текст] / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Труды ЛПИ № 369. – Л. 1979. – 340 с.

Карпиловский В.С. Методы конструирования конечных элементов. [Текст] / В.С. Карпиловский. – УкрНИИТИ, № 3153. – Киев, 1980. – 20 с.

<sup>2</sup> Проектно-вычислительный комплекс Structure CAD (SCAD) для расчета конструкций методом конечных элементов: учебное пособие / Белокопытова И.А., Бурьгин С.Г., Гавриленко И.С., Перельмутер А.В. – Киев, 2002. – 280 с.



РС № 2 – несучий елемент представлений у вигляді арки. Потенційно є найбільш економічно вигідним варіантом у більшості випадків та має високі естетичні якості.

РС № 3 – є менш цікавим варіантом з архітектурного погляду, але має значні переваги щодо технологічності.

РС № 4 – є модифікацією РС № 1. Схема запропонована з метою зменшення середніх розмірів поперечного перерізу елементів за рахунок їх кількості та більш інтенсивного включення в просторову роботу, що повинно значно полегшити процес монтажу кожного окремого елемента.

РС № 5 – є модифікацією РС № 2.

РС № 6 – несуча платформа підтримується за допомогою вант. Перевагою схеми є висока економічність та технологічність при невеликих прогонах. Недолік – велика площа забудови. Як і всі вантові конструкції має високі естетичні властивості.

РС № 7 – на відміну від попередніх варіантів, представлених рамами, які є частиною каркаса основної будівлі, запроектована у вигляді окремої аркової конструкції, до якої за допомогою вантових елементів приєднана несуча платформа, на якій зводиться каркас основної будівлі. З архітектурного погляду є одним із найбільш цікавих варіантів.

РС № 8 та РС № 9 – представлені у вигляді двох башт, які функціонально і конструктивно поєднані між собою в єдину систему. Розміщення башт ближче до опор дозволяє зменшити навантаження всередині прогону. Центральна частина конструкцій включає розпірні елементи у вигляді системи балок та ферм, які одночасно виконують функцію експлуатованих приоб'єктних площ. Перевагою варіантів є можливість проектування будівель великої поверховості.

РС № 10 – є комбінацією РС № 4 та РС № 8, 9 і об'єднує всі переваги зазначених варіантів. Окрім цього, архітектурний вигляд будівлі дозволяє гармонійно вписувати її в існуючу історичну забудову за рахунок поступового підвищення поверховості.

Для кожної групи РС був виконаний збір навантажень з урахуванням індивідуальних особливостей кожної схеми. В якості розглядуваних у роботі навантажень обрано чотири основних, які діють на будівлю – власна вага елементів конструкції, технологічне навантаження на перекриття будівлі, снігове та вітрове навантаження. Навантаження від власної ваги перекриття, покриття та каркаса задані в SCAD в автоматичному режимі. Технологічні навантаження на перекриття, снігові та вітрові навантаження визначені відповідно до вимог ДБН В.1.2-2-2006<sup>3</sup>. Після визначення всіх навантажень для кожної групи РС розрахункові сполучення навантажень складались та виконувалась лінійний розрахунок заданої системи.

Згідно з проведеними розрахунками представлених схем для кожного варіанта були визначені поздовжні зусилля, згинальні моменти та переміщення у вузлах. На основі отриманих даних у розділі "перевірка перерізів із металопрокату" SCAD був виконаний попередній підбір перерізів елементів рам та підрахована маса кожної конструкції.

Порівняння результатів розрахунків конструкцій та вибір найбільш раціональних варіантів виконувались за наступними показниками: маса несучої конструкції, корисний об'єм будівлі, площа забудови і вартість несучої конструкції з урахуванням виготовлення.

При визначенні маси несучої конструкції розраховувалась загальна маса окремих елементів без врахування вузлових з'єднань. Корисний об'єм будівлі розраховувався множенням загальної корисної площі на висоту будівлі. Площа забудови – це площа в межах зовнішніх огорожувальних конструкцій з урахуванням усіх виступних частин.

Розрахунковий параметр "вартість несучої конструкції з урахуванням виготовлення" був визначений за допомогою програмного комплексу АВК-5. При цьому, при визначенні загальної вартості кожної конструкції враховувалась вартість: матеріалу, виготовлення елементів на заводі, навантаження-розвантаження, транспортування на умовну відстань та вартість монтажу конструкції на будмайданчику.

<sup>3</sup> ДБН В.1.2-2-2006 Навантаження і впливи. Вимоги проектування / Мінбуд України. – Київ, 2006. – 69 с.



Аналіз результатів розрахунку (табл. 1) свідчить, що найбільш раціональними варіантами розрахункових схем за обраними показниками є РС № 2 (І група) та РС № 10 (ІІІ група).

Таблиця 1

**Порівняльні характеристики розрахункових схем**

| № РС | Маса, т | Корисний об'єм будівлі, м <sup>3</sup> | Площа забудови, м <sup>2</sup> | Вартість з урахуванням виготовлення, тис. грн. |
|------|---------|----------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|
| 1    | 77,47   | 76 800                                 | 2 000                          | 1 877,3                                        |
| 2    | 76,38   | 76 800                                 | 2 000                          | 1 850,9                                        |
| 3    | 136,27  | 76 800                                 | 2 000                          | 3 302,2                                        |
| 4    | 87,41   | 76 800                                 | 2 000                          | 2 118,2                                        |
| 5    | 136,40  | 76 800                                 | 2 000                          | 3 307,8                                        |
| 6    | 126,14  | 76 800                                 | 2 000                          | 3 056,7                                        |
| 7    | 134,75  | 59 100                                 | 2 000                          | 3 265,3                                        |
| 8    | 105,6   | 43 400                                 | 2 000                          | 2 560,2                                        |
| 9    | 97,56   | 38 400                                 | 2 000                          | 2 364,1                                        |
| 10   | 91,45   | 44 800                                 | 2 000                          | 2 216,1                                        |

Таблиця 2

**Результати підбору перерізів елементів рами № 2**

| Конструктивний елемент | Вихідний переріз | Результат підбору |
|------------------------|------------------|-------------------|
| BM1                    | ІІ 60БС3         | ІІ 70БС5          |
| BM2                    | ІІ 60БС3         | ІІ 70БС5          |
| BM3                    | ІІ 60БС3         | ІІ 70БС4          |
| BM4                    | ІІ 60БС3         | ІІ 60БС5          |
| BM5                    | ІІ 50БС1         | ІІ 50БС4          |
| BM6                    | ІІ 50БС1         | ІІ 50БС4          |
| BM7                    | ІІ 50БС1         | ІІ 50БС3          |
| BM8                    | ІІ 50БС1         | ІІ 45БС2          |
| BM9                    | [ ] 36П          | [ ] 40П           |
| BM10                   | [ ] 36П          | [ ] 40П           |
| BM11                   | [ ] 36П          | [ ] 36П           |
| BM12                   | [ ] 36П          | [ ] 18П           |
| BM13                   | [ ] 36П          | [ ] 18П           |

Таблиця 3

**Результати підбору перерізів елементів рами № 10**

| Конструктивний елемент | Вихідний переріз | Результат підбору |
|------------------------|------------------|-------------------|
| BM1                    | ІІ 60БС3         | ІІ 70БС5          |
| BM2                    | ІІ 60БС3         | ІІ 70БС3          |
| BM3                    | ІІ 60Б1          | ІІ 70Б1           |
| BM4                    | ІІ 60Б1          | ІІ 35Б1           |
| BM5                    | ІІ 50Б1          | ІІ 23Б1           |
| BM6                    | ІІ 50Б1          | ІІ 55Б1           |
| BM7                    | ІІ 60БС3         | ІІ 70БС4          |
| BM8                    | ІІ 60Б1          | ІІ 70Б1           |
| BM9                    | ІІ 50Б1          | ІІ 40Б1           |
| BM10                   | ІІ 50Б1          | ІІ 55Б1           |
| BM11                   | ІІ 50Б1          | ІІ 35Б1           |
| BM12                   | ІІ 40Б1          | ІІ 50Б1           |
| BM13                   | ІІ 40Б1          | ІІ 40Б1           |
| BM14                   | ІІ 40Б1          | ІІ 30Б1           |
| BM15                   | ІІ 40Б1          | ІІ 60Б1           |
| BM16                   | ІІ 40Б1          | ІІ 26Б1           |

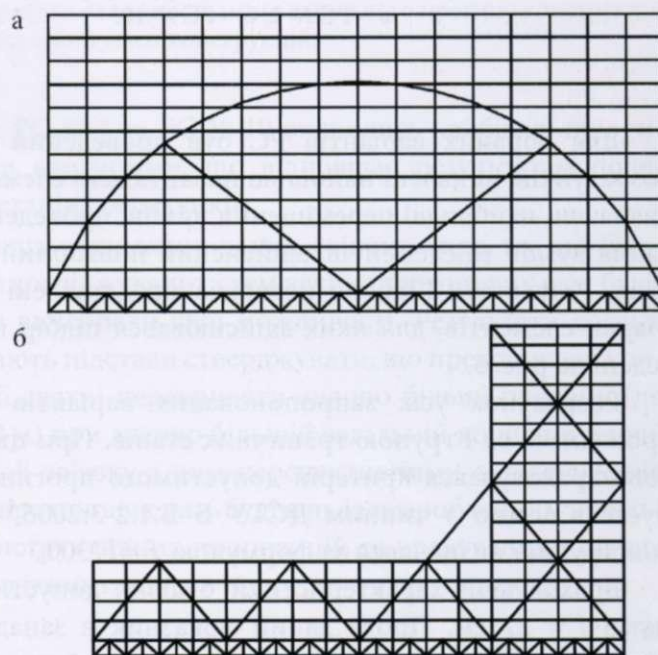


Рис. 4. Розрахункові максимальні зусилля від найгіршого сполучення навантажень, кН:  
а – РС № 2; б – РС № 10.



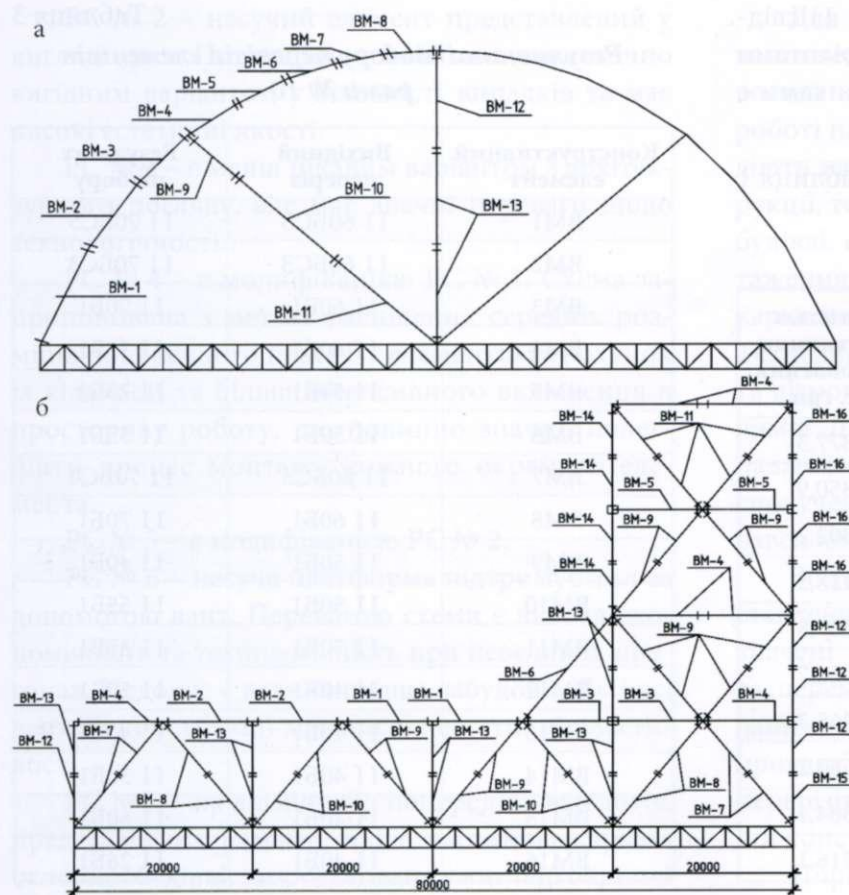


Рис. 5. Марки елементів для підбору перерізів у SCAD:  
а – РС № 2; б – РС № 10.

Для обраних варіантів РС був проведений другий етап розрахунків, виявлені найбільш навантажені елементи (рис. 4), визначені найбільші переміщення вузлів, проведено конструювання вузлів та елементів, здійснений повторний підбір перерізів. Результати підбору перерізів представлені у табл. 2, 3. Марки елементів, для яких здійснювався підбір перерізів, наведені на рис. 5.

Розрахунок усіх запропонованих варіантів конструкцій проводився за I групою граничних станів. При цьому обов'язково враховувався критерій допустимого прогину, який нормується згідно з чинним ДСТУ Б В.1.2-3:2006<sup>4</sup> і для даних конструкцій визначався за формулою  $f = l/300$ .

Враховуючи характеристики будівлі, допустимий прогин склав  $f = 27$  см. Проте даний показник є занадто високим. Виходячи з конструктивних вимог, реальний показник загального прогину рами не повинен перевищувати 5-10 см. Як показують дослідження, для кожної РС є можливість зменшити

значення прогинів збільшуючи перерізи найбільш навантажених елементів. Однак для кожного варіанта РС збільшення перерізів елементів по-різному впливає на зміну значень прогинів.

У результаті, для досягнення реальних значень прогинів за рахунок збільшення перерізів, загальна маса деяких конструкцій збільшується вкрай непропорційно. Як показують деякі дослідження, збільшення маси окремих конструкцій навіть у декілька разів може практично не впливати на показники загального прогину.

На графіку (рис. 6) для кожної РС наведені криві, які показують як змінюється загальний прогин рами ( $f$ , см) при зміні перерізів найбільш навантажених елементів. Зміна перерізів елементів впливає на зміну загальної маси конструкції, що виражена у відсотках по відношенню до "початкової маси". В якості "початкової маси" (нульова точка на графіку) прийнята маса конструкції з найменшими перерізами, які задовольняють вимогу міцності при заданих навантаженнях.

Найбільш раціональним варіантом конструктивної схеми є варіант, крива якого на графіку наближається до горизонтальної. Тобто, результатом відносно невеликого збільшення перерізів буде відчутне зменшення загального прогину. Найкращими варіантами конструктивних схем виявились РС №1, РС № 2, РС № 4, РС № 5 та РС № 8 і РС № 9, до них наближається РС № 10. Отримані результати відповідають результатам розрахунків попередніх етапів, згідно з якими найбільш раціональними варіантами виявились РС № 2 та РС № 10.

<sup>4</sup> ДСТУ Б В.1.2-3:2006 Прогини і переміщення. Вимоги проектування / Мінбуд України. – Київ, 2006. – 30 с.



Аналізуючи графік, слід зауважити, що РС, криві яких наближаються до вертикалі (РС № 6, РС № 3, РС № 7), є менш раціональними для будівництва в даних умовах, тому їх використання може виявитись вигідним тільки при проектуванні будівель із відносно невеликим прогоном (до 50-60 м).

Графік залежності зміни загального прогину конструкцій від зміни їх маси дозволяє об'єктивніше оцінити кожен конструкцію, проаналізувати їх роботу та визначити можливі пріоритети застосування.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У результаті досліджень проведена оцінка можливостей перекриття великих прогонів на основі застосування в будівництві великопрогонових рам-будівель.

Розроблені та запропоновані десять можливих варіантів конструктивних схем великопрогонових рам-будівель. Виявлені конструктивні особливості кожного запропонованого варіанта.

Проведений багатосторонній аналіз запропонованих схем та в результаті порівняння за визначеними показниками обрано найбільш раціональні варіанти, якими виявились РС № 2 (з несучим елементом у вигляді арки) та РС № 10 (комбінований варіант РС із ромбічною решіткою).

Варіант РС № 2 виявився приблизно на 42 % менш матеріаломістким, ніж більшість представлених варіантів. Відповідні показники для варіанта РС № 10 складають 33 %.

Проведені дослідження та розрахунки дозволили побудувати графіки залежності зміни загального прогину конструкцій від зміни їх маси, які дають змогу об'єктивно оцінити кожен конструкцію та обрати найбільш адекватний варіант для конкретних умов будівництва. Відповідно до

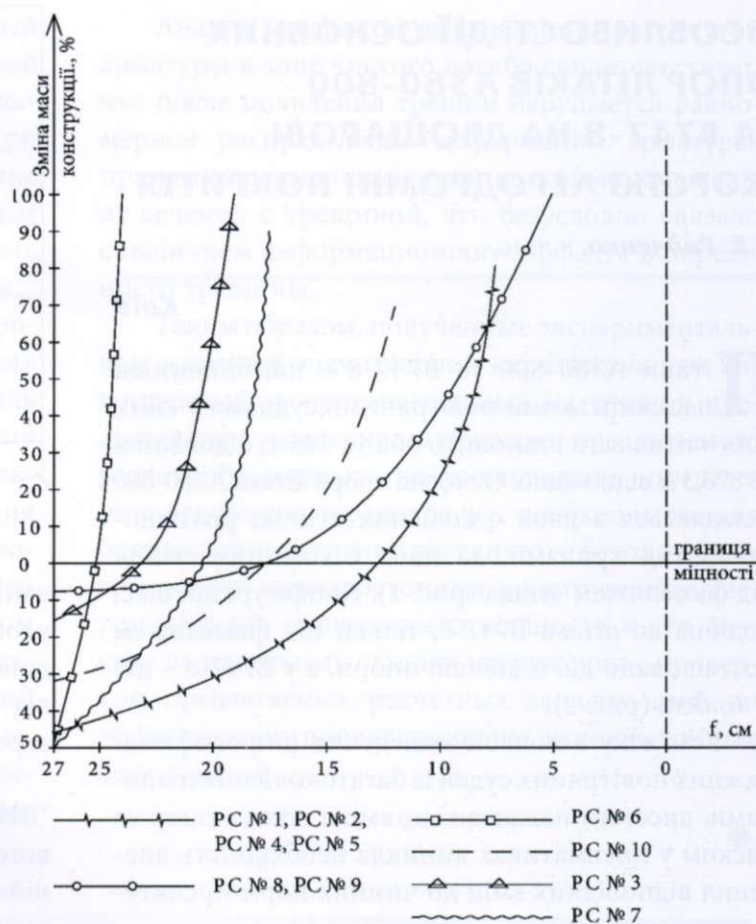


Рис. 6. Графіки залежності зміни загального прогину конструкцій від зміни маси конструкцій.

графіка РС № 2 та РС № 10 виявились найбільш пріоритетними варіантами, що відповідає результатам попередніх етапів розрахунків.

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що більшість із досліджуваних схем великопрогонових рам-будівель не вичерпали свої можливості. Результати досліджень дають підстави стверджувати, що представлені конструкції здатні перекривати значно більші прогони (до 100-120 м) при значно більшій загальній корисній площі будівлі. В зв'язку з цим перспективними є дослідження великопрогонових рам-будівель із розробленням детальних конструктивних пропозицій та врахуванням різних умов будівництва.