

УДК 624.014.074

*к.т.н. Усенко В. Н.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКРЁСТНО-БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ ПОКРЫТИЙ С ГИБКИМИ ЗАТЯЖКАМИ В НЕСКОЛЬКИХ УРОВНЯХ

Рассматривается задача проверки эффективности пространственных перекрёстно-балочных систем с гибкими затяжками в нескольких уровнях при расчёте их методами оптимального проектирования с использованием ПК «ЛИРА».

Ключевые слова: пространственные перекрёстно-балочные системы с гибкими затяжками, методы оптимального проектирования, экономический эффект.

Актуальность проблемы. Одно из направлений повышения эффективности строительного производства — переход к применению лёгких металлических конструкций, в том числе эффективных пространственных покрытий.

Здания и сооружения с применением лёгких металлических конструкций комплектной поставки особо перспективны для строительства в сельских районах республики, где отсутствует или слабо развита строительная база и ощущается недостаток трудовых ресурсов, а также при реконструкции действующих предприятий, где имеют место стеснённые условия монтажа.

Применение предварительного напряжения является одним из направлений в решении проблемы снижения материалоемкости металлических конструкций. В этой связи существенно возрастает роль оптимального проектирования, которое в практике строительства применяется ещё недостаточно широко.

Таким образом, направленность работы совпадает с одной из главных и долговременных задач капитального строительства — снижением материалоемкости строительных металлоконструкций.

Основная часть. На кафедре строительных конструкций ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ» разработана конструкция покрытия, которая представляет собой систему перекрёстных металлических балок с предварительно на-

пряжёнными гибкими затяжками, расположенными в нескольких уровнях.

Схема конструкции, показанная на рисунке 1, включает в себя опирающиеся по контуру балки продольного и поперечного направлений, к узлам соединения которых верхними концами шарнирно прикреплены вертикальные стойки, их нижние концы соединены с гибкими затяжками первого уровня. С целью повышения жёсткости конструкции в промежутках между стойками первого (нижнего) уровня выполнен второй (верхний) уровень гибких затяжек.

Жёсткие верхние пояса шпренгельных балок и вертикальные стойки выполняются из прокатных или гнутосварных профилей. Балки перекрёстных направлений в точках пересечений соединяются между собой жёсткими узлами, способными воспринимать изгибающие моменты и поперечные силы соответственно в плоскости каждой примыкающей к узлу шпренгельной балки.

Гибкие затяжки выполняются из канатов, пучков или стержней из высокопрочной стали и закреплены в приопорных участках балок. Очертание затяжек принято в виде ломаной линии, вписанной в квадратную параболу. Величины стрелок парабол и количество панелей принимаются в зависимости от конкретных условий, учитывая, что увеличение этих параметров, как правило, ведёт к уменьшению материалоемкости конструкции.

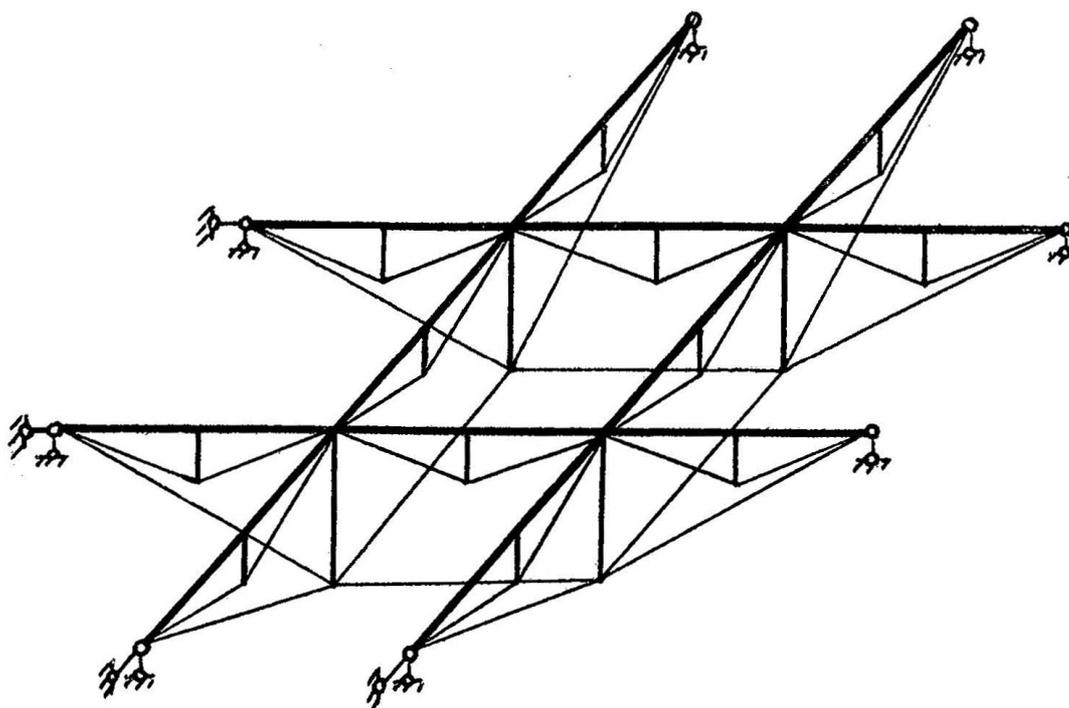


Рисунок 1 Перекрёстно-балочная система покрытий с гибкими затяжками в нескольких уровнях

С целью исключения геометрической изменяемости конструкции предусмотрена постановка диагональных связей в плоскости балок.

Предлагаемые конструкции покрытия обладают достоинствами: применение предварительного напряжения и гибких затяжек из сталей повышенной прочности, значительная жёсткость покрытия, высокая степень надёжности от внезапного разрушения, возможность регулировать распределение усилий в балках за счёт изменения уровня напряжений в затяжках.

Исследуемые конструкции могут быть использованы в качестве покрытий большепролётных зданий и сооружений. Эффективность применения конструкции в качестве покрытий большепролётных зданий и сооружений зависит от целого ряда факторов, а именно: величины и характера нагрузки, количества панелей балки, высоты шпренгеля, сечения, шага балок в продольном и поперечном направлениях, марки стали и др.

Преимущества предлагаемых систем покрытий также состоят в том, что наличие нескольких уровней гибких затяжек, а

также возможность регулировать распределение изгибающих моментов по длине балок за счёт величины предварительного напряжения затяжек позволяют значительно уменьшить расчётные значения изгибающих моментов.

В основу работы положен метод оптимизации предварительно напряжённых металлических конструкций. Подлежит решению первая задача оптимального проектирования, сформулированная в [2, 3]: нахождение оптимального распределения внутренних усилий и материала в статически неопределимых системах с заданной геометрической схемой при условии введения предварительного напряжения в лишние связи. То есть при выполнении системы ограничений, учитывающей требования прочности, устойчивости и работоспособности элементов, необходимо определить величины искомых параметров, соответствующих минимальному значению целевой функции (принятому критерию качества).

В качестве целевой функции (критерия оптимальности) принята стоимость мате-

риалов конструкции, представленная как сумма соответствующих показателей составляющих элементов и имеющая вид

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n A_i \cdot l_i \cdot \gamma_i \cdot \varphi_i \cdot c_i, \quad (1)$$

где A_i — площадь поперечного сечения элемента; l_i — длина элемента; γ_i — плотность материала; φ_i — конструктивный коэффициент; c_i — стоимость единицы массы конструкции.

Целью численных исследований оптимального распределения усилий и материала является проверка эффективности предлагаемых пространственных предварительно напряжённых перекрёстных систем покрытий с гибкими затяжками при расчёте их методами оптимального проектирования. В то же время численные исследования дают возможность совершенствовать и развивать методику расчёта.

При проведении численных исследований с использованием ПК «ЛИРА» [1, 5] ставились следующие задачи:

1. Определить оптимальное количество перекрёстных балок, соответствующее минимальной стоимости конструкции при различных внешних нагрузках.

2. Исследовать степень влияния второго уровня затяжек на величину усилий и перемещений пространственных систем.

3. Получить значение оптимальной высоты конструкции для рассматриваемых систем покрытий.

Численное исследование проводилось в следующей последовательности:

1. Выбор количества перекрёстных балок (размера ячейки системы).

2. Исследование оптимального распределения усилий и материала в системах с различным количеством перекрёстных балок и числом уровней затяжек.

3. Поиск оптимальной высоты конструкции.

Критерием эффективности решения поставленной задачи являются расход материала и стоимость по сравнению с показателями типовых систем покрытий, проектирование которых осуществлялось вариантами методами.

тирование которых осуществлялось вариантами методами.

При проектировании данной перекрёстно-балочной конструкции исследовались различные варианты конструктивных решений предлагаемых систем покрытий, имеющих один и два уровня гибких затяжек, с изменением количества перекрёстных балок от 2×2 до 7×7 (размер ячейки изменялся от $4,0 \times 4,0$ м до $1,5 \times 1,5$ м).

Оптимизационный расчёт конструкций выполнялся согласно разработанному алгоритму. Соотношение жёсткостей элементов, необходимое для расчёта ненапряжённой статически неопределимой системы и определения усилий самонапряжения, принималось исходя из имеющегося опыта проектирования аналогичных конструкций.

Исследовалась также возможность введения начальных усилий не во все лишние связи, а только в гибкие затяжки ввиду удобства создания в них усилий предварительного напряжения. Кроме того, введение начальных усилий в места пересечения балок трудноосуществимо и ведёт к значительному усложнению конструкции узлов.

В случае если усилия предварительного напряжения вводятся только в гибкие затяжки, то материалоемкость конструкции повышается на 4,85 % по сравнению со случаем введения начальных усилий во все лишние связи системы.

Для определения показателей трудоёмкости и стоимости пространственных перекрёстных систем с гибкими затяжками использована методика Я. М. Лихтарникова [4].

При определении стоимости исследуемых систем покрытий затраты, несущественно зависящие от массы и технологии изготовления конструкций, не учитывались. В частности, не учитывались затраты на монтаж, зависящие в большей степени от принятой технологии производства работ, количества монтажных единиц и т. п. и в меньшей степени — от массы монтируемых конструкций. Также не учитывались транспортные расходы, которые зависят не только от массы, но и от расстояния транспортировки.

Поиск оптимальной высоты рассматриваемых систем покрытий с количеством перекрёстных балок 2×2 и 3×3 с одним уровнем гибких затяжек выполнялся с помощью итерационного процесса путём целенаправленного изменения высоты конструкции H . При решении данной задачи для различных значений параметра H распределение усилий, материала и основные показатели конструктивной формы определяются по алгоритму оптимизационного расчёта конструкций с заданной геометрической схемой.

Анализ полученных результатов расчётов показывает, что рост количества перекрёстных балок (уменьшение размера ячейки) приводит к снижению стоимости материала конструкции. Удельный расход стали на предлагаемое покрытие с учётом контурных ферм составил $18,2 \text{ кг/м}^2$, что меньше, чем на аналогичные типовые покрытия из лёгких металлических конструкций комплектной поставки («Молодечно» — $22,8 \text{ кг/м}^2$, «Кисловодск» — $19,1 \text{ кг/м}^2$, «ЦНИИСК» — $18,5 \text{ кг/м}^2$).

Функция зависимости стоимости конструкции с учётом затрат на создание предва-

рительного напряжения от количества перекрёстных балок имеет экстремум (минимум) для систем с количеством перекрёстных балок 2×2 (размер ячейки $4,0 \times 4,0 \text{ м}$) и 3×3 (размер ячейки $3,0 \times 3,0 \text{ м}$). Исходя из этого, следует считать, что количество перекрёстных балок должно назначаться соответствующим минимальной стоимости конструкции с учётом затрат на создание предварительного напряжения, при котором возможно беспрогонное решение кровли.

С увеличением количества перекрёстных балок эффективность применения второго уровня гибких затяжек снижается, однако его наличие способствует уменьшению усилий в элементах системы и снижению материалоемкости.

Оптимальная высота исследуемых перекрёстно-балочных систем с гибкими затяжками, соответствующая минимальной стоимости материала конструкции, равна $2,5 \text{ м}$, т. е. $1/4,8$ её пролёта (рис. 2). Результат получен без учёта повышения стоимости несущих и ограждающих конструкций при увеличении строительного объёма здания.

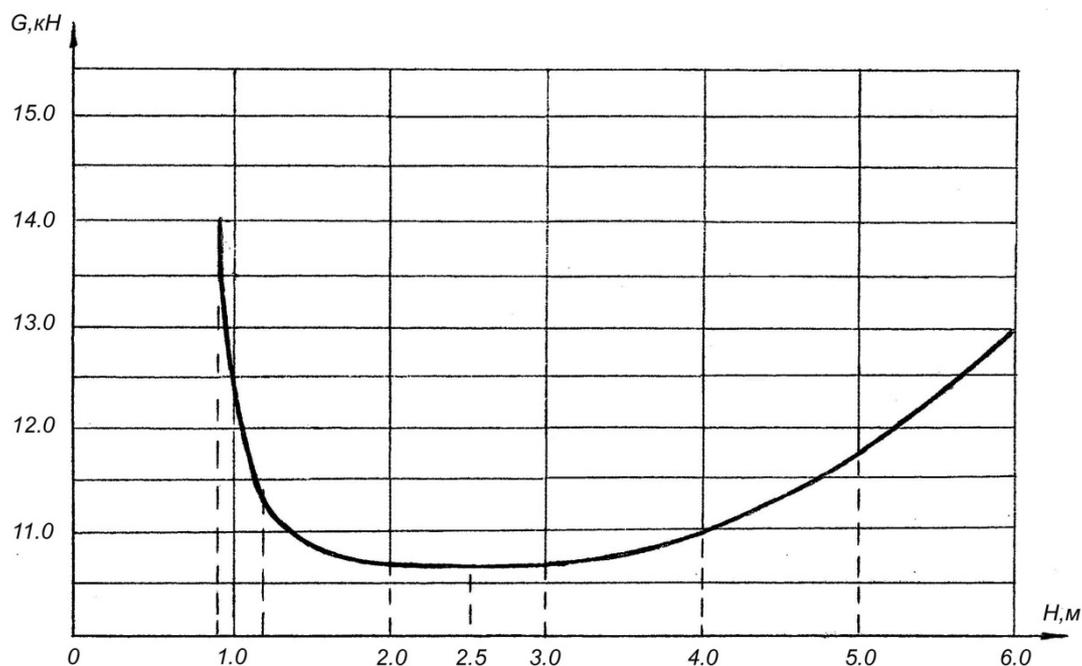


Рисунок 2 Зависимость материалоемкости конструкции покрытия с количеством перекрёстных балок 2×2 с одним уровнем затяжек от высоты системы H

В области экстремума функция имеет пологий характер, поэтому при отклонении фактической высоты конструкции от оптимальной на 20 % материалоемкость возрастает всего на 8–10 %.

При реальном проектировании конкретных перекрёстно-балочных систем исследуемого типа назначение такой большой высоты вряд ли возможно, поэтому можно полагать, что увеличение выноса гибких затяжек в пределах общей строительной высоты, как правило, приводит к снижению материалоемкости конструкции.

Выводы:

1. Применение пространственных перекрёстных систем с гибкими затяжками взамен существующих даёт экономический эффект за счёт уменьшения массы расходуемой стали до 25 % по сравнению с типовыми конструкциями.

2. Количество перекрёстных балок должно назначаться соответственно минимальной стоимости конструкции с учётом затрат на создание предварительного напряжения, при котором возможно беспрогонное решение кровли.

3. При увеличении количества перекрёстных балок эффективность применения второго уровня гибких затяжек снижается, однако наличие второго уровня затяжек способствует уменьшению усилий в элементах системы и снижению материалоемкости.

4. Поиск оптимальной высоты конструкции показал, что с увеличением высоты (до 1/4,8 её пролёта) материалоемкость предлагаемых систем покрытий снижается. Поэтому на практике высоту конструкции следует принимать не ниже типовой, а в случае если увеличение высоты не приводит к росту строительной высоты покрытия, то её необходимо назначать в пределах до 1/4,8 пролёта.

5. Методика оптимального проектирования перекрёстных систем исследуемого типа на ряде этапов предполагает использование стандартных программ расчёта стержневых конструкций и программ решения основной задачи линейного программирования, что позволяет снизить трудоёмкость расчётов и сократить сроки проектирования.

Библиографический список

1. Свод правил СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. — М. : Минрегион России, 2011. — 173 с.
2. Трофимович, В. В. Оптимальное проектирование металлических конструкций [Текст] / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. — К. : Будівельник, 1981. — 136 с.
3. Трофимович, В. В. Оптимизация металлических конструкций [Текст] / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. — К. : Вища школа, 1983. — 200 с.
4. Лихтарников, Я. М. Металлические конструкции : методы технико-экономического анализа при проектировании [Текст] / Я. М. Лихтарников. — М. : Стройиздат, 1968. — 263 с.
5. Метод конечных элементов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>.

© Усенко В. Н.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ПГСИА ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Хвортовой М. Ю., к.т.н., доц., зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.

Статья поступила в редакцию 28.02.20.

к.т.н. Усенко В. М. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

**ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ
ПЕРЕХРЕСНО-БАЛКОВИХ СИСТЕМ ПОКРИТТІВ З ГНУЧКИМИ ЗАТЯЖКАМИ
У КІЛЬКОХ РІВНЯХ**

Розглядається актуальна задача перевірки ефективності просторових перехресно-балкових систем покриттів з гнучкими затяжками при розрахунку їх методами оптимального проектування з використанням ПК «ЛІРА».

Ключові слова: просторові перехресно-балкові системи з гнучкими затяжками, методи оптимального проектування, економічний ефект.

PhD in Engineering Usenko V. N. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

**NUMERICAL INVESTIGATION AND DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF
CROSS-BEAM COATING SYSTEMS WITH FLEXIBLE TIE-BARS AT SEVERAL LEVELS**

We consider the problem of checking the effectiveness of dimensional cross-beam systems with flexible tie-bars at several levels when calculating them by optimal design methods using the “LIRA” software package.

Key words: dimensional cross-beam systems with flexible tie-bars, optimal design methods, economic effect.