

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕКРЫТИЙ МОНОЛИТНЫХ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ

Лапина А. И.

В статье рассмотрены особенности проектирования и расчета монолитных железобетонных перекрытий. Предложена методика выбора оптимальных конструктивных параметров плит перекрытия. Даны рекомендации для повышения эффективности этих конструкций.

Процент строительства каркасных зданий в общем объеме жилого многоэтажного строительства в Республике Беларусь постоянно растет. Стоимость и трудозатраты на устройство перекрытий этих зданий составляют значительную часть от общих соответствующих показателей. Поэтому повышение эффективности этих конструкций напрямую влияет на эффективность строительства и стоимость жилья в республике. Увеличить эффективность перекрытий монолитных каркасных зданий можно: за счет разработки и внедрения новых материалов, путем совершенствования технологии производства работ, создания и/или использования более точных методов расчета, за счет выбора оптимальных конструктивных систем и их параметров. Рассмотрим последние два способа, так как они являются наиболее простыми и эффективными, т. е. дают возможность получить значительную экономию, не прибегая к значительным расходам ни на экспериментальные исследования, ни на переподготовку кадров.

1. Повышение эффективности конструкции за счет использования более точных методов расчета.

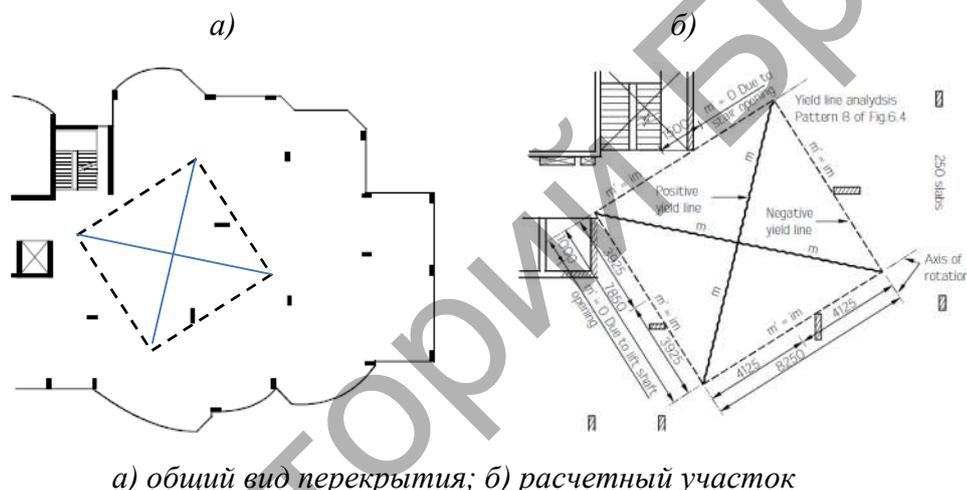
Для расчета перекрытий каркасных монолитных зданий сегодня практически всегда используется метод конечных элементов. Это связано в первую очередь с высокой универсальностью данного метода и наличием большого числа программных приложений, реализующих расчет данным методом с разной степенью автоматизации [4, 6]. При этом применение метода конечных элементов к расчету плит перекрытия, выполненных из монолитного железобетона, имеет ряд недостатков, наиболее существенными из которых являются:

- большие затраты рабочего времени, необходимого для расчета с приемлемой точностью одного варианта из множества возможных конструктивных решений плиты;
- недостаточно разработанный механизм для расчета конструкций плит в неупругой стадии.

Существующие на данный момент модификации метода конечных элементов для учета нелинейной работы конструкции сводятся к многократному решению линейной задачи. Это существенно увеличивает и без того большие затраты рабочего времени. Учитывая также невысокую точность таких расчетов, большинство проектировщиков ограничиваются расчетом железобетонных плит по методу конечных элементов только в упругой стадии.

При этом исследования, проведенные проектной организацией “European Concrete Building Project” в Великобритании 2004 году [1], показывают, что проектирование перекрытий на основе метода предельного равновесия, учиты-

вающего работу конструкций в неупругой стадии, позволяет существенно сократить как расход стали, так и трудозатраты на создание монолитной железобетонной плиты перекрытия. В рамках эксперимента исследователями “European Concrete Building Project” было запроектировано перекрытие каркасного монолитного здания в Кардингтоне четырьмя различными способами. Три первых способа были выполнены не основе упругого расчета по методу конечных элементов. Для четвертого способа был использован метод предельного равновесия. Проведенные расчеты показали, что для перекрытия потребовалось 14.5 тонны арматурной стали при использовании метода предельного равновесия и 16.9 тонны при использовании традиционных методов проектирования, основанных на теории упругости. Таким образом, расход стали сократился на 14,2 % по сравнению с самым экономичным из полученных на основе упругого расчета решений. Количество отправочных марок арматурных изделий так же сократилось с 75 до 22 штук, что положительно влияет на трудоемкость перекрытия.



а) общий вид перекрытия; б) расчетный участок
Рисунок 1 – Перекрытие, запроектированное “European Concrete Building Project” в Кардингтоне по методу предельного равновесия [1]

Для дополнительной иллюстрации экономичности метода половина здания была запроектирована по методу предельного равновесия, согласно которому максимальный расход стали наиболее армированных участков составил 565 мм/м^2 , что соответствует арматурным стержням диаметром 12 мм установленным с шагом 200 мм. Вторая половина здания по правилам теории упругости на основе метода конечных элементов. Расход стали в наиболее напряженных участках в этом случае составил 1148 мм/м^2 , что соответствует арматурным стержням диаметром 16 мм, установленным с шагом 175 мм. В процессе эксплуатации обе части перекрытия удовлетворяли всем предъявляемым к ним требованиям, при этом разница в значениях прогибов была незначительной.

Основным недостатком метода предельного равновесия является отсутствие алгоритма расчета по данному методу, что не позволяет автоматизировать проектирование конструкций на его основе. Для наиболее ответственного этапа расчета – построения схемы излома – одни авторы советуют проводить экспериментальные исследования, другие – обращаются к опыту и интуиции инженера. Разумеется, что ни один, ни другой подход не может быть положен в основу автоматизированной системы проектирования железобетонных плит.

С целью создания последовательного и однозначного алгоритма расчета мной были собраны и обобщены результаты испытаний железобетонных плит до разрушения и опыт по их проектированию. Это позволило создать алгоритм построения схем излома и расчета железобетонных плит перекрытия произвольной конфигурации с различными условиями опирания.

Так как в общем случае из множества возможных схем излома перекрытий расчётной является та, в пластических шарнирах которой возникает максимальный изгибающий момент, *задача выбора расчетной схемы излома представляет собой задачу оптимизации положения пластических шарниров по критерию максимума изгибающего момента*, возникающего в них от воздействия приложенной нагрузки. Таким образом, для создания алгоритма расчета железобетонных плит по методу предельного равновесия будем использовать теорию оптимизации.

В качестве расчетного участка плиты примем многоугольный участок, вписанный в пределы опор перекрытия, имеющий максимальную площадь и минимальную жесткость опирания по периметру.

Функцию оптимизации запишем исходя из закона сохранения энергии, согласно которому виртуальная работа внутренних сил, затраченная на поворот в линейных пластических шарнирах, равна виртуальной работе внешних сил, затраченной на перемещение вертикальных нагрузок:

$$\sum m_i \cdot l_i \cdot \theta_i = \sum N_i \cdot \delta_i,$$

где m_i – предельный изгибающий момент внутренних сил в линейных пластических шарнирах, кНм/м;

l_i – длина линейных пластических шарниров, м;

N_i – равнодействующая нагрузки, приложенной к i -му звену, кН;

$\theta_i = \delta_i / d_{ci}$ – угол поворота звена;

$\delta_i = \delta_{\max} \cdot d_{ci} / d_{mi}$ – перемещение центра тяжести звена, м.

δ_{\max} – максимальное перемещение звена, м;

d_{ci} – расстояние от оси вращения до центра тяжести звена, м;

d_{mi} – расстояние от оси вращения до вершины звена с максимальным перемещением, м.

Так как при равномерно распределённой нагрузке равнодействующая нагрузки, приложенная к i -му звену, будет равна произведению интенсивности нагрузки на площадь этого звена, целевая функция будет иметь вид:

$$m = \frac{q \sum_{i=1}^{i \leq n} S_i \cdot d_{ci} / d_{mi}}{\sum_{i=1}^{i \leq n} L_i / d_{mi}} \rightarrow \max .$$

Из полученной формулы видно, что предельный момент в пластических шарнирах прямо пропорционален интенсивности равномерно распределенной нагрузки. Это свидетельствует о том, что максимум функции, а значит, и расчетное положение пластических шарниров, можно определить даже при заданной интенсивности нагрузки. При помощи простых математических преобразований легко доказать, что значение всех остальных параметров, необходи-

мых для расчета критерия оптимизации, можно вычислить, зная только положение линейных пластических шарниров.

Согласно публикации [1] к положению пластических шарниров предъявляются следующие требования:

- оси вращения звеньев схемы излома лежат вдоль линий опирания и проходят вблизи любых колонн;
- пластические шарниры должны быть прямыми;
- пластические шарниры, соединяющие смежные звенья, должны проходить через точку пересечения осей вращения этих звеньев;
- пластические шарниры должны быть объединены в непрерывные линии и могут заканчиваться только на краю плиты;
- “положительные” линейные пластических шарниров располагаются ближе к шарнирно опертому краю, чем к жестко заземленному краю плиты.

Учитывая эти требования, оси вращения звеньев схем излома совместим с границами расчетного участка, а положение линейных пластических шарниров будем задавать соотношением синусов углов между этим шарниром и осями вращения звеньев, которые он соединяет. Эти соотношения и будут приняты нами в качестве параметров оптимизации. Значения соотношения синусов будем варьировать от 1 (при этом значение пластического шарнира будет совпадать с биссектрисой угла, образованного осями вращения) до 0 (при этом значение пластического шарнира будет совпадать с положением оси вращения одного из звеньев). Такое решение обеспечит выполнение всех вышеперечисленных требований, предъявляемых к положению линейных пластических шарниров, и позволит рассматривать решаемую задачу как задачу безусловной оптимизации.

К методам решения таких задач оптимизации, не имеющих ограничений, относятся: симплекс-метод, метод циклического покоординатного спуска/подъема, метод поиска по образцу и метод вращения координат. Выбор метода оптимизации зависит от вида целевой функции. Было сделано предположение, что выбранные нами параметры позволяют обеспечить котлованный вид функции оптимизации и в качестве метода поиска ее максимума принят метод циклического покоординатного подъема. Далее это предположение было подтверждено после анализа полученных результатов. В качестве точки начального приближения в методе циклического покоординатного подъема рекомендуется использовать наилучшее известное решение. Так как публикации [] рекомендуют строить линейные пластические шарниры по биссектрисам углов расчетного участка, то в качестве точки начального приближения была принята точка, в которой все параметры оптимизации равны единице.

Для реализации разработанной методики мной была создана компьютерная программа “IZLOM”, которая позволяет выполнять построение схем излома в 2D- и в 3D-формате; определять максимальный изгибающий момент в расчетном участке плиты при заданном значении распределенной нагрузки и строить графики зависимости изгибающего момента от положения заданной линии пластического шарнира.

Исходными данными для работы программы является выбранный пользователем в пределах опор перекрытия расчетный многоугольный участок плиты. Дальнейшая работа программы ведется по следующему алгоритму:

1. Назначаем первоначальное положение линейных пластических шарниров, совмещая их с биссектрисами углов, образованных осями вращения звеньев.

2. Определяем значение предельного изгибающего момента в линейных пластических шарнирах при первоначальном их положении и интенсивности равномерной распределенной нагрузки, равной 1кН/м^2 .

3. Изменяем положение одного из пластических шарниров, варьируя соотношение синусов углов между ним и осями вращения звеньев, которые он соединяет. Находим такое значение этого параметра, при котором изгибающий момент в пластических шарнирах максимален.

4. Заменяй текущее положение пластического шарнира найденным положением с максимальным значением изгибающего момента, переходим к другому шарниру.

5. Определяем значение предельного изгибающего момента в линейных пластических шарнирах при текущем их положении и интенсивности равномерной распределенной нагрузки, равной 1кН/м^2 .

6. Если разница между текущим значением изгибающего момента и первоначальным его значением не превышает допустимую погрешность, то определяем значение изгибающего момента при заданной интенсивности нагрузки и заканчиваем работу алгоритма. Иначе – принимаем текущее значение изгибающего момента в качестве первоначального приближения и переходим к пункту 3.

Данный алгоритм позволяет определять положение линейных пластических шарниров для железобетонных плит перекрытия сложной конфигурации с произвольным положением опор и вычислять изгибающий момент в них с высокой точностью за очень короткое время.

Автоматизация и внедрение данного алгоритма позволит не только сократить расход арматуры и трудоёмкость железобетонных перекрытий за счет учета нелинейной работы, но и открывает возможности для других путей повышения эффективности.

2. Повышение эффективности конструкции за счет выбора оптимальных конструктивных систем и их параметров.

Объектом оптимизации является перекрытие многоэтажного каркасного здания, выполненного из монолитного бетона без предварительного напряжения арматуры. Все элементы такого каркаса (колонны, перекрытия и диафрагмы жесткости) работают совместно по рамно-связевой схеме. Поэтому для оптимизации максимального числа параметров перекрытия в качестве модели для решения задачи оптимального проектирования была принята многоэтажная рама, вырезанная в пределах отдельной ячейки перекрытия по линии нулевых поперечных сил.

В соответствии с СТБ ISO 2394 [7] целью проектирования считается минимизация стоимости конструкций на протяжении всего срока службы. Так как стоимость конструкции на протяжении всего срока службы включает в себя затраты на ее создание, эксплуатацию и ликвидацию последствий ее вероятного отказа, то целевая функции примет вид:

$$F() = \frac{C_b + C_m + C_f}{S} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где S – эксплуатируемая площадь расчетного участка здания, m^2 ;

C_b – затраты на строительство колонн и перекрытий с учетом стоимости организационно-технических работ, тыс. руб.;

C_m – эксплуатационные затраты, тыс. руб.;

C_f – затраты на ликвидацию последствий отказа, тыс. руб.

Затраты на ликвидацию последствий отказа определяем с учетом стоимости обеспечения безопасности жизни. Вероятность отказа определяем как область значений, на которой изгибающий момент, вызванный воздействием внешних сил, больше прочности сечения на изгиб.

В качестве параметров оптимизации перекрытия были рассмотрены толщина плиты h , пролет l , площадь сечения опор S_k ; отношение сторон сечения опор k , прочность бетона f_{ck} ; коэффициент соотношения площадей арматуры Q_{sup} сверху и снизу плиты.

Согласно [1] к железобетонным перекрытиям многоэтажных зданий предъявляются следующие требования:

- конструктивные;
- предельных состояний по несущей способности;
- предельных состояний по эксплуатационной пригодности;
- согласно [1] также должно выполняться требование;
- защиты здания от прогрессирующего обрушения.

Конструктивные требования, необходимые для обеспечения долговечности и огнестойкости здания, были выполнены в соответствии с ТКП [2]. Расчет по предельным состояниям несущей способности осуществлялся на основе метода предельного равновесия с использованием упрощенной деформационной модели в сочетании с методом частных коэффициентов. Отметим, что согласно п.5.6.1 [1] методы, основанные на пластическом расчете, могут применяться исключительно для проверки предельного состояния по несущей способности. Поэтому проверку состояний по эксплуатационной пригодности будем осуществлять на основании упругого расчета. В тех случаях, когда относительная деформация в арматуре, вызванная внешним воздействием на плиту, превышает относительную деформацию, соответствующую начальному моменту образования трещин, воспользуемся эмпирическим подходом, изложенным в инструкции [3]. Для защиты здания от прогрессирующего обрушения в соответствии с инструкцией [1] был использован метод связевых усилий.

Таким образом, получаем многомерную задачу оптимизации с ограничениями. Для решения таких задач можно использовать метод последовательного перебора, метод случайного поиска и комбинации этих методов с другими методами оптимизации. Учитывая, что применение комбинированных методов ведет за собой усложнение алгоритма расчета и снижение точности вычислений, принимая во внимание, что приведенный выше алгоритм расчета железобетонных перекрытий по методу предельного равновесия позволяет выполнять экономическое сравнение большого числа возможных конструктивных решений за приемлемое время, для решения задачи оптимизации воспользуемся методом последовательного перебора.

Изложенная методика была реализована в виде программного приложения. При определении оптимальных параметров значимым считалось изменение стоимости на протяжении всего срока службы не менее чем на 1%. При анализе было рассмотрено около 20 млн вариантов железобетонных конструкций. Оптимизировано свыше 300 конструктивных решений, благодаря чему выявлены основные направления повышения эффективности применения безбалочных перекрытий монолитных каркасных зданий.

Было выявлено, что наибольшее влияние на экономическую эффективность оказывает толщина перекрытия. Оптимальное значение этого параметра варьируется от 1/40 до 1/16 от максимальной величины пролета в зависимости от усилий в элементе (таблица 1).

Таблица 1 – Оптимальная толщина перекрытия, см Ошибка! Закладка не определена.

Максимальный пролет, м	Нагрузка на перекрытие, кН/м ²					
	3	4.5	6	7.5	9	
4	16 - 16	16 - 16	16 - 21	20 - 22	21 - 24	
4.5	16 - 16	20 - 21	21 - 23	21 - 24	21 - 25	
5	16 - 21	20 - 22	21 - 24	21 - 25	21 - 25	
5.5	20 - 22	20 - 24	21 - 25	22 - 25	23 - 29	
6	20 - 23	21 - 24	22 - 28	24 - 28	24 - 30	
6.5	20 - 24	21 - 25	23 - 29	25 - 31	27 - 36	
7	21 - 25	22 - 27	24 - 30	27 - 35	30 - 40	
7.5	21 - 25	24 - 29	27 - 32	31 - 40	34 - 40	

Так же существенное влияние оказывают соотношение соседних пролетов перекрытия, прочность бетона, площадь сечения опор. Влияние коэффициента соотношений арматурных площадей снизу и сверху плиты, а также конфигурации опор, невелико. Так, при изменении этих параметров на 10% от оптимального, значение целевой функции изменялась менее чем на 1%.

Заключение.

1. Для проектирования железобетонных перекрытий монолитных каркасных зданий наиболее эффективным является использование метода предельного равновесия, учитывающего работу плиты в неупругой стадии.

2. Для автоматизации расчета конструкции по методу предельного равновесия необходим алгоритм расчета, который был разработан автором на основании теории предельного равновесия.

3. Разработанный метод позволяет существенно сократить затраты рабочего времени на расчет одного варианта из множества возможных конструктивных решений. Это дает возможность выполнять оптимальное проектирование перекрытий монолитных каркасных зданий с высокой точностью.

4. Разработанный алгоритм расчета по методу предельного равновесия и разработанная на его основе методика оптимизации позволяет повысить эффективность безбалочных перекрытий монолитных каркасных зданий.

Список цитированных источников

1. Kennedy, G. Practical Yield Line Design / G. Kennedy, C.H. Goodchild. – Surrey: The Concrete Center, 2004. – 171p.

2. Гвоздев, А.А. Испытание безбалочных перекрытий до разрушения // Строительная промышленность. – М.: 1931. – № 11. – 12 с.
3. Гвоздев, А.А. Расчет несущей способности конструкции по методу предельного равновесия. – М.: Стройиздат, 1949. – 143 с.
4. Городецкий, А.С. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс ЛИРА-Windows / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров, Е.Б. Стрелецкий [и др.]. – К.: Факт, 1997. – 137 с.
5. Лихтарников, Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979. – 319 с., ил.
6. Мордич, А. И. Рекомендации по расчету и конструированию монолитных железобетонных каркасов многоэтажных зданий системы БелНИИС с армированием плоских дисков перекрытий пространственными (объемными) арматурными каркасами. – Минск: БелНИИС, 2003. – 14 с.
7. Надежность строительных конструкций. Общие принципы: СТБ ISO 2394 -2007. – Введ. 01.07.2008 – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2007. – 69 с.
8. НИИЖБ. Инструкция по расчету статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом перераспределения усилий. – М.: Госстройиздат, 1961 – 111 с
9. Рекомендации по проектированию конструктивных систем в особых расчетных ситуациях. Защита от прогрессирующего обрушения. - Брест: БрГТУ, 2010. – 91 с.
10. Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций: ТКП ЕН 1990-2007. – Минск: Минстройархитектуры, 2008.
11. Еврокод. Бетонные и железобетонные конструкции: ТКП ЕН 1992-2009. – Минск: Минстройархитектуры, 2009.

УДК 624.042.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Матвеевко Е. В.

Введение. При совместном воздействии снегопада и ветра на зданиях и вокруг них образуются снежные сугробы. Снег, который сдувается с наветренной стороны препятствия набегающим потоком, накапливается на подветренной стороне, где скорость ветра ниже, оседает и дрейфует. Поэтому образование сугробов – процесс сложного взаимодействия между движущимися снежными частицами и потоком воздуха, деформированного геометрией здания. Значительное количество сугробов приводит к образованию неравномерных нагрузок и чрезмерному скоплению снега на крышах зданий. Сугробы вокруг зданий могут создавать трудности для движения пешеходов и транспорта, а также создавать сложности при уборке снега. Таким образом, для решения задач, связанных со снегом на застроенных территориях, необходимо с достаточной точностью прогнозировать качественное распределение снега на крышах зданий и вокруг них.

В целом перенос снега под воздействием ветра подразделяется на три процесса: ползучесть, солевание и суспензия [1,2]. Поземок – явление, при котором снежинки перемещаются путем ползучести или скольжения по поверхности на высоте до 0,01 м. Солевание (оседание) – это процесс, при котором снежинки перемещаются при помощи повторного прыжка после столкновения с поверхностью. Высота оседания снежинок составляет 0,01-0,1 м. Суспензия (взвесь) –