

УДК 624.072.31

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.204251

Разработка алгоритма подбора жестких упоров в сталебетонных балках при действии распределенной нагрузки

А. Н. Петров, А. П. Палий, М. В. Павлюченков, Г. М. Цыганенко,
Н. С. Хобот, И. А. Высочин, О. В. Юрченко, А. А. Овчаренко, Д. С. Сопов,
А. П. Палий

Розроблений алгоритм підбору жорстких упорів в сталебетонних балках при дії розподіленого навантаження. Бетон зі сталевією смугою з'єднується жорстко з метою досягнення сумісної роботи бетону та сталевієї смуги. Таке з'єднання в балці забезпечують жорсткі упори, які перешкоджають зусиллям зсуву в зоні контакту бетону і сталі. Зусилля визначаються через кути повороту між двома сусідніми перерізами балки. Для визначення кутів повороту використовується графо-аналітичний метод визначення переміщень. При визначенні деформацій сталебетонної балки розрахунок ведеться за приведеними жорсткостями поперечних перерізів.

Ціль дослідження полягає в оптимізації конструкції сталебетонної балки за рахунок підбору раціональної кількості і розташування жорстких упорів. Така оптимізація дозволяє більш раціонально використовувати матеріал конструкції – бетон і сталь. Це призведе до зниження працезатрат і кількості потрібних матеріалів при виробництві, монтажу та експлуатації розглянутих конструкцій.

Запропонований раніше алгоритм підбору жорстких упорів в сталебетонних балках при дії зосередженої сили розвинуто на випадок дії рівномірно розподіленого навантаження. При підборі кількості жорстких упорів передбачається, що величина діючого на балку розподіленого навантаження, механічні характеристики матеріалів (сталі та бетону), а також проліт балки і розміри її поперечного перерізу відомі. На відміну від балок із зосередженою силою посередині, де зусилля змінюються за лінійним законом, в балках з рівномірно розподіленим навантаженням зусилля в сталевій смузі змінюються по квадратній параболі. Тому, хоча і було отримано однаковий крок упорів, неможливо знайти положення, при якому зусилля в усіх упорах приймають однакові значення

Ключові слова: сталебетонна балка, жорсткий упор, крок упорів, зусилля в упорі, приведена жорсткість, графо-аналітичний метод

1. Введение

Строительство во всем мире, является интенсивно развивающейся отраслью. Количество строящихся объектов постоянно растет. С ростом количества зданий и сооружений увеличивается потребность в строительных конструкциях. Такой рост обуславливает появление самых разнообразных видов и форм новых конструкций и новых конструкционных решений. В настоящее время в этом разнообразии все больше и больше места занимают сталебетонные конструкции.

Несмотря на появление новых и модифицированных материалов, самым часто используемым материалом остается бетон. Несмотря на многочисленные исследования, связанные с бетоном, многие вопросы остаются недостаточно изученными. Также этот материал открывает большие возможности для его усовершенствования. В работах [1–3] представлены исследования, направленные на повышение прочности бетона и улучшение его механических характеристик при работе на растяжение.

Кроме того появляются как новые, так и усовершенствованные типы конструкций, что позволяет более эффективно использовать строительные материалы. Как известно, бетон хорошо работает на сжатие, но практически не способен воспринимать растягивающие напряжения. Самым простым решением данной проблемы является армирование бетона. В настоящее время все чаще используются конструкции с внешним армированием, в том числе сталебетонные. В частности, большое применение получили сталебетонные балки. Такие балки, хотя и показали свою эффективность, все же имеют ряд недостаточно изученных проблем. Так, например, задача совместной работы стального листа и бетона. Для достижения их совместной работы необходимо объединить бетон и сталь в единую конструкцию. Пожалуй, самым распространенным способом является использование жестких упоров и гибких анкеров. Представляет интерес оптимизация конструкции сталебетонной балки за счет подбора рационального количества и расположения жестких упоров. Такая оптимизация позволит более рационально использовать бетон и сталь, что в свою очередь приведет к снижению трудозатрат и количества требуемых материалов при производстве, монтаже и эксплуатации рассматриваемых конструкций. Это позволяет говорить об актуальности подобных исследований.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Многие исследования направлены на улучшение механических свойств бетона, в том числе при работе его на растяжение. В настоящее время большая часть работ направлена на улучшение свойств бетона путем добавления в него различных компонентов. Так, в работе [1] в состав бетона добавлена резина. В работе [2] введены исследования бетона с добавлением металлической фибры. В работе [3] рассмотрено применение стальной фибры с ориентированием ее вдоль балки. Следует отметить, что направление данных работ – улучшение свойств материала, а не конструктивных особенностей балок.

Совместное использование стали и бетона в балках приводит к новым задачам. Это и способы соединения упоров с листом, и выбор рационального их количества. В нормативных документах [4–6] приводятся определенные рекомендации к использованию упоров и анкеров. Однако строгих ограничений нет, что позволяет варьировать как количество упоров, так и их расположение. В конечном итоге, рациональное расположение и количество жестких упоров позволит оптимизировать конструкцию сталебетонной балки.

В работе [7] рассмотрены конструкции, работающие в районах с повышенной сейсмической активностью. Проведенные исследования показали, что сталебетонные конструкции обладают хорошей надежностью и могут быть приме-

нены в условиях работы, отличающихся от типовых условий повышенным уровнем сложности.

Большая часть работ посвящена численным исследованиям сталебетонных конструкций. Как, например, в работах [8, 9] изучаются различные способы конструктивных изменений с целью оптимизации работы конструкции в целом. Важным моментом является соединение стали с бетоном. В представленных работах соединение производится с помощью анкеров. Вопрос же оптимизации за счет правильного расположения анкеров и выбора рационального их количества не рассматривается.

В работе [10] показано, что сами анкера могут повысить прочность сталебетонной конструкции. В работе [11] в экспериментальных исследованиях рассматриваются особенности работы предварительно напряженных сталежелезобетонных элементов. Работа [12] посвящена изучению изменения прочностных характеристик сталебетонных конструкций в зависимости от количества арматуры. В работе [13] рассмотрены вопросы, связанные с регулированием положения нейтральной оси, в зависимости от изменения размеров поперечных сечений конструкции. Анализ работ [10–13] показывает, что предложенные в них решения позволяют улучшить характеристики сталебетонных конструкций и, безусловно, имеют практическую ценность. Однако проведены они в ином направлении. Вопросы рационального применения анкеров не рассмотрены, хотя анкера в конструкциях используются.

Следует признать, что сегодня способ соединения стали с бетоном посредством жестких упоров или гибких анкеров не является единственным. Известны работы [14, 15], в которых элементы конструкции соединяются с помощью различных клеев, в том числе акриловых. Этот способ хотя и имеет свои преимущества, но не может считаться универсальным. Таким образом, можно сказать, что использование клея для соединения стали и бетона, хотя имеет право на существование, пока не может заменить все другие способы.

Сегодня в большинстве случаев для этой цели применяются жесткие упоры или гибкие анкера. Такой способ соединения рассматривается в работах [16, 17]. Так, в работе [16] предложен новый тип сталежелезобетонных балок. Конструкция такой балки представляет собой железобетонную полку с арматурным каркасом и стального таврового элемента. Исследования посвящены применению различных типов соединений бетона со стальным тавровым элементом. В работе [17] приведены экспериментальные исследования пяти серий сталебетонных балок. Серии отличались между собой различным соотношением листовой и стержневой арматуры. Задачей данных исследований, кроме прочего, являлось установление оптимального соотношения использования листовой стали Ст-3 в объединении со стержневой арматурой классов Ат-800 и А-1000.

В работе [18] были приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния сталебетонных балок. Соединение стального листа с бетоном произведено посредством гибких анкеров. Показано, что гибкие анкера обладают определенной податливостью. Кроме того, соединение самих анкеров со стальным листом может быть произведено различными способами. Такое разнообразие конструктивных решений само по себе создает определенные трудности

для разработки единой методики расчета. Различные виды гибких анкеров имеют неодинаковую степень податливости. Учет податливости гибкого анкера в значительной степени влияет на несущую способность конструкции. Сама же методика расчета зачастую вообще не учитывает податливость гибких анкеров или учитывает недостаточно точно. Таким образом, вопросы, связанные с созданием единой методики расчета гибких анкеров, остались нерешенными.

В работе [19] проведены натурные экспериментальные исследования композитных балок. Железобетонные балки усилены при помощи стальных листов. Для упрочнения железобетонной балки была предложена новая упрощенная система анкеров (система болтовых плит прямого сдвига). Показано, что предложенная система эффективна для обеспечения совместной работы элементов балки. Вопросы количества анкеров не рассматривались. В работе [20] проведены экспериментальные исследования сталебетонных балок. Стальной лист к бетону прикреплялся путём склеивания. Клеевые соединения могут быть альтернативой соединению при помощи жестких упоров, однако применение такого способа на сегодня трудозатратно и не всегда возможно.

В работе [21] приведены исследования бетонных конструкций с добавлением жидкого стекла. Такой подход позволяет улучшить физико-механические свойства бетона, в частности его коррозионную стойкость. Однако эти исследования направлены на улучшение свойств материала, а не конструкции.

В работе [22] описаны результаты оптимизации сталебетонных балок, в частности рассмотрена сталебетонная балка на двух опорах. Способ внешнего нагружения балки принят в виде сосредоточенной силы. Сила приложена посередине пролета. На практике многие балки работают под действием равномерно распределенной нагрузки, приложенной по всей ее длине. Распространение методики, предложенной в [22], на балки, работающие под действием распределенной нагрузки, позволило бы оптимизировать такие конструкции за счет рационального размещения жестких упоров.

Все это позволяет утверждать, что целесообразным является проведение исследования, посвященного эффективной расстановке жестких упоров.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является распространение алгоритма подбора жестких упоров в сталебетонных балках на случай действия равномерно распределенной нагрузки. Это даст возможность рационально использовать материалы конструкции – сталь и бетон, что сократит количество материала и трудозатраты при производстве, монтаже и эксплуатации сталебетонных балок.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- за счет рациональной расстановки жестких упоров получить одинаковый шаг упоров по длине балки, как это было получено при действии сосредоточенной силы, что и позволит оптимизировать конструкцию сталебетонной балки;
- проверить достоверность исследований путем проведения численного эксперимента.

4. Материалы и методы разработки алгоритма подбора жестких упоров в сталебетонных балках при действии распределенной нагрузки

В исследованиях использована методика, регламентируемая нормативными документами [4–6]. Также использованы существующие методы расчета сталебетонных балок.

Считается, что сталь и бетон конструкции работают совместно, без отрыва и проскальзывания, что регламентируется [4, 5]. Совместная работа бетона и стали достигается посредством использования жестких упоров. Те же нормативные документы регламентируют упоры как абсолютно жесткие.

Постановка жестких упоров запрещает горизонтальное смещение стального листа по отношению к бетону балки. Возникающие в упорах усилия можно получить, определив углы поворота в сечениях между рядом стоящими упорами. Далее определяется число и шаг упоров. Механизмом определения углов поворота является графо-аналитический метод определения перемещений.

Сечение сталебетонной балки неоднородное. Оно состоит из стали и бетона. Жесткости и геометрические характеристики такого сечения являются приведенными величинами.

5. Расчет рациональной расстановки жестких упоров в балке при действии распределенной нагрузки

В [22] предложен алгоритм подбора жестких упоров в сталебетонных балках от действия сосредоточенной силы посреди балки.

Усилие, действующее на упор, определяется через углы поворота между двумя смежными упорами. Поэтому определим удлинение волокон через углы поворота сечений между смежными упорами.

Поскольку дифференциальное уравнение изогнутой оси балки такое же, как и при действии равномерно распределенной нагрузки, удлинения волокон определим так же, как и в [22]. Расчетная схема показана на рис. 1.

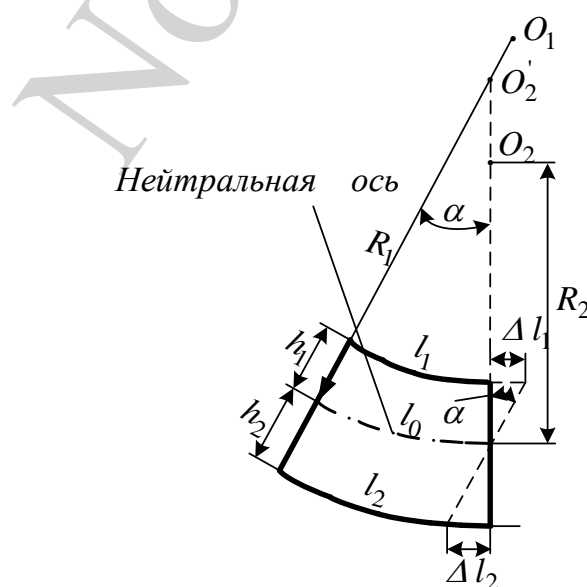


Рис. 1. Бесконечно малый элемент сталебетонной балки

Внутренние усилия в балке под действием равномерно распределенной нагрузки q рассчитываются иначе. Угол поворота в точке 1 будет равен фиктивной поперечной силе в этой точке. Для этого определяем фиктивную нагрузку, полученную в виде эпюры изгибающих моментов от внешней нагрузки (рис. 2, б).

Фиктивные реакции равны

$$R_a^\phi = R_b^\phi = \frac{2}{3 \cdot 2} \frac{ql^2 \cdot l}{8} = \frac{ql^3}{24}.$$

Определяем равнодействующие фиктивной нагрузки для точек 1 и 2

$$\begin{aligned} \omega_{x_1} &= \frac{2M_1 \cdot x_1}{3} = \frac{2qx_1 \cdot x_1(l-x_1)}{3 \cdot 2} = \frac{qx_1^2(l-x_1)}{3}, \\ \omega_{x_2} &= \frac{2M_2 \cdot x_2}{3} = \frac{2qx_2 \cdot x_2(l-x_2)}{3 \cdot 2} = \frac{qx_2^2(l-x_2)}{3}. \end{aligned} \quad (1)$$

Угол поворота в точке 1 на расстоянии $x = x_1$

$$\alpha_1 = \frac{1}{EJ} (-R_a^\phi + \omega_{x_1}) = \frac{1}{EJ} \left(-\frac{ql^3}{24} + \frac{qx_1^2(l-x_1)}{3} \right) = \frac{q}{3EJ} \left(-\frac{l^3}{8} + lx_1^2 - x_1^3 \right). \quad (2)$$

Угол поворота в точке 2 на расстоянии $x = x_2$

$$\alpha_2 = \frac{1}{EJ} (-R_b^\phi + \omega_{x_2}) = \frac{q}{3EJ} \left(-\frac{l^3}{8} + lx_2^2 - x_2^3 \right). \quad (3)$$

Тогда взаимный угол поворота сечений 1 и 2 будет равен

$$\begin{aligned} \alpha_{1-2} &= \alpha_1 - \alpha_2 = \frac{q}{3EJ} \left(-\frac{l^3}{8} + lx_1^2 - x_1^3 \right) - \\ &- \left[\frac{q}{3EJ} \left(-\frac{l^3}{8} + lx_2^2 - x_2^3 \right) \right] = \frac{q}{3EJ} \left[-l(x_2^2 - x_1^2) + (x_2^3 - x_1^3) \right]. \\ \alpha_{1-2} &= \frac{q}{3EJ} \left[-l(x_2^2 - x_1^2) + (x_2^3 - x_1^3) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

По этой формуле определяется взаимный угол поворота двух сечений между точками 1 и 2.

Эта формула справедлива, если $0 < x_1, x_2 \leq \frac{l}{2}$. Знак в формуле (4) определяется по повороту сечения. Если сечение поворачивается по часовой стрелке, то знак угла поворота отрицательный, и наоборот.

Расчет по деформациям железобетонных и сталебетонных балок согласно [4] и [18], выполняется по приведенным жесткостям поперечных сечений и нормативной нагрузке. Приведенная жесткость определяется по формуле

$$B = \phi_{b1} E_b I_{red}, \quad (5)$$

где I_{red} – приведенный осевой момент инерции поперечного сечения балки, ϕ_{b1} – коэффициент, учитывающий влияние кратковременной ползучести бетона и принимаемый для тяжелого бетона 0,85, E_b – модуль деформации бетона.

Нормативная распределенная нагрузка на участках без трещин определяется по формуле

$$q^H = q^p \phi_{b2} \text{ или } q^H = \frac{8M^p \phi_{b2}}{l_p^2}, \quad (6)$$

где ϕ_{b2} – коэффициент, учитывающий влияние длительной ползучести бетона, M^p – изгибающий момент от действия расчетной нагрузки на балку, l_p – расчетная длина балки.

Он зависит от вида бетона, условий среды и характера действия нагрузки (кратковременная или длительная), колеблется в пределах от 1 до 4,5 и определяется по [4, 18].

Поэтому формула (4) примет вид

$$\alpha_{1-2} = \frac{q^H}{3B} \left[-l(x_2^2 - x_1^2) + (x_2^3 - x_1^3) \right]. \quad (7)$$

Приведенные геометрические характеристики сечения определяем так же, как и в [22], по формулам (8) и (9). Схема показана на рис. 3.

$$z_c = \frac{S_{x1}}{A} = \frac{bh \left(\frac{h}{2} + \delta \right) + bn_1 \frac{\delta^2}{3}}{bh + b\delta n_1}, \quad (8)$$

$$I_{red} = \frac{bh^3}{12} + bh \left(z_c - \frac{h}{2} \right)^2 + \frac{b\delta^3}{12} n_1 + n_1 b \delta \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right)^2. \quad (9)$$

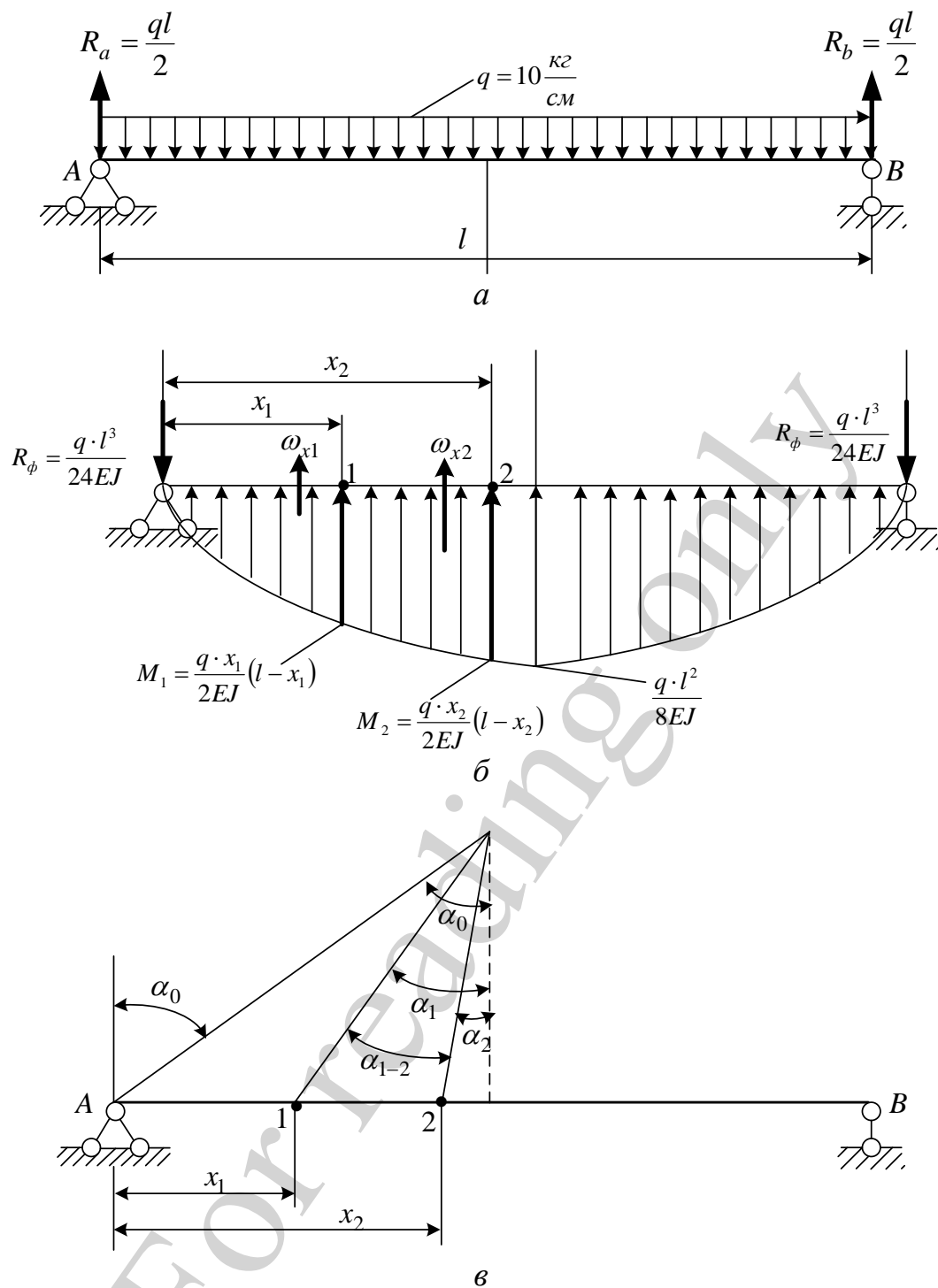


Рис. 2. Схема для определения взаимных углов поворота двух сечений в пролете балки: *a* – расчетная схема; *б* – эпюра изгибающих моментов; *в* – схема определения взаимных углов поворота

Ввиду симметрии, для определения усилий рассмотрим половину балки. Шаг жестких упоров n непостоянный (рис. 4). В отличие от балок, нагруженных сосредоточенной силой посередине, при действии распределенной нагрузки, достичь постоянного шага упоров и постоянного усилия на них не удастся, так как закон изменения углов поворота нелинейный. В этом случае шаг будем принимать постоянным, усилия, воспринимаемые упорами переменными.

где

$$A_1 = \frac{q^H}{3B} \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right) E_s \cdot A_s. \quad (13)$$

В этих формулах: A_s – площадь поперечного сечения стального листа, σ_s – напряжение в стальном листе, E_s – модуль упругости стали, δ – толщина стального листа, x_1 – расстояние от опоры до первой точки, x_2 – расстояние от опоры до второй точки, z_c – положение центра тяжести приведенного сечения, q^H – интенсивность распределенной нормативной внешней нагрузки, действующая на балку.

Внешней нагрузкой может быть как расчетная, так и нормативная нагрузка.

Зная, как определять продольную силу на каждом участке между упорами, можно определить усилия в них.

Шаг упоров определяется в зависимости от высоты балки, высоты упора и высоты сжатой зоны бетона $c = 2h_y$. А $h_y = h - z$. Тогда

$$c = 2(h - z). \quad (14)$$

Длину нулевого участка принимаем, как и при действии сосредоточенной силы [19] равной

$$x = \frac{c}{2}. \quad (15)$$

Для определения числа упоров выразим длину балки через длины участков и числа упоров $\frac{l}{2} = nc + x$ или $l = 2nc + 2x$. Подставим значение (15)

$$l = 2nc + 2 \frac{c}{2} = 2nc + c.$$

Отсюда

$$n = \frac{l - c}{2c}. \quad (16)$$

При необходимости длины участков и числа упоров можно принимать другими, но при этом должны выполняться условия (14)–(16).

Так как продольная сила на каждом участке представляет собой квадратную параболу (12), то нужно попытаться определить участок с экстремальным значением. Для этого на одном из участков (на рис. 4, участок 2) выделим малый элемент длиной a с расстоянием до начала элемента x_1 и до конца элемента x_2 . Ис-

пользуя формулу (12), запишем выражение продольной силы для малого элемента длиной a . Тогда $x_1 = x$, а $x_2 = x + a$. В этом случае $x_1 + x_2 = 2x + a$, $x_1^2 = x^2$, $x_2^2 = x^2 + 2ax + a^2$, $x_1 x_2 = x^2 + ax$. Подставим значения в формулу (12)

$$N_a = A_1 \left[-l(x_i + x_k) + (x_i^2 + x_i x_k + x_k^2) \right] =$$

$$= A_1 \left[-l(x + x + a) + (x^2 + x^2 + ax + x^2 + 2ax + a^2) \right],$$

$$N_a = -2lA_1 - A_1 la + 3A_1 x^2 + 3A_1 ax + a^2.$$

Возьмем производную по величине x и приравняем к нулю

$$N'_a = -2A_1 l + 6A_1 x + 3A_1 a, \quad -2A_1 l + 6A_1 x + 3A_1 a = 0.$$

Отсюда определяем

$$x = \frac{2A_1 l - 3A_1 a}{6A_1} = \frac{2l - 3a}{6}. \quad (17)$$

Так как величина a малая, то

$$x = \frac{2l - 0}{6} = 0,333l. \quad (18)$$

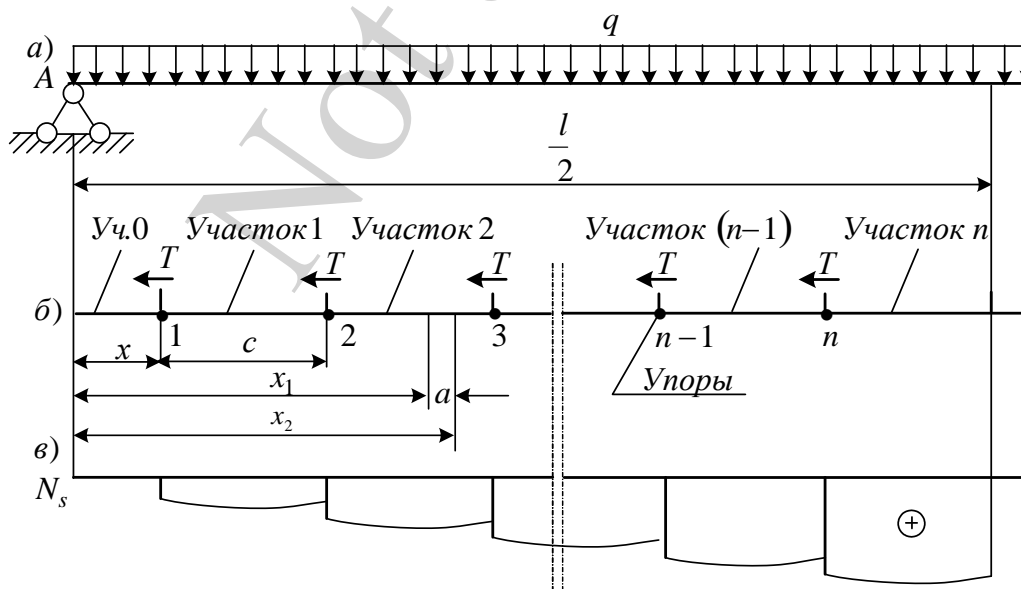


Рис. 4. Схема расстановки жестких упоров и эпюра продольных сил в стальной полосе: а – расчетная схема; б – схема расположения жестких упоров; в – эпюра продольных сил

По формуле (18) определяется расстояние от опоры A до точки с максимальным значением продольной силы в стальной полосе. Эта точка не всегда совпадает с серединой балки. Это связано с законом изменения по длине балки углов поворота сечений, который изменяется по кубической параболе, продольная сила – по квадратной параболе.

Были проведены расчеты для других длин и нагрузок. Все они подтверждают полученное условие. Экстремальное значение продольной силы в полосе для половины длины балки на двух опорах будет на расстоянии $x = 0,333l$. Максимальное значение продольной силы в стальной полосе определяется по формуле (12).

От сосредоточенной силы продольная сила изменяется по линейному закону [22]. Поэтому там нагрузка не влияет на закон изменения продольной силы в стальной полосе. Однако несовпадение максимального значения продольной силы в стальной полосе со серединой балки не влияет на подбор упоров в сталебетонных балках. В этом случае максимальное значение продольной силы, полученное по формуле (12), нужно сравнивать с расчетным усилием для середины пролета, полученным от действия расчетной нагрузки полученной в [23] для проверки напряжений в бетоне и стальном листе.

$$N^p = \frac{M^p}{a_1} = \frac{q^p l_p^2}{8a_1}, \quad (19)$$

где

$$a_1 = h_0 - z/2.$$

Максимальное значение силы, действующей на упоры, можно определять по эпюре продольных сил в стальной полосе. Практика показывает, как правило, максимальное значение силы, действующей на упоры, будет равно продольной силе на первом участке. На остальных участках силы на упор T будут меньше.

Имея набор формул, можно осуществлять подбор шага, числа жестких упоров и определять усилий в них.

Результатом проведенных исследований является алгоритм подбора жестких упоров, если известны характеристики материалов, размеры поперечных сечений балки, длина балки и внешняя нагрузка, действующая на балку. Последовательность действий, согласно предложенному алгоритму, приводится ниже.

По формуле (6) определяется нормативная распределенная нагрузка

$$q^H = \frac{8M^p \phi_{b2}}{l_p^2}, \quad q^H = q^p \phi_{b2}.$$

По формуле (9) определяется проведенный осевой момент инерции поперечного сечения балки

$$I_{red} = \frac{bh^3}{12} + bh \left(z_c - \frac{h}{2} \right)^2 + \frac{b\delta^3}{12} n_1 + n_1 b \delta \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right)^2.$$

По формуле (5) определяется приведенная жесткость поперечного сечения $B = \phi_{b1} E_b I_{red}$.

По формуле (13) определяется коэффициент $A_1 = \frac{q_n}{4B} \left(z_c - \frac{\delta}{2} \right) E_s \cdot A_s$.

По формуле (14) определяется шаг жестких упоров $c = 2(h - z)$.

По формуле (17) определяется длина нулевого участка $x = \frac{c}{2}$.

По формуле (16) определяется число жестких упоров $n = \frac{l - c}{2c}$.

По формуле (18) определяется точка с максимальным значением угла поворота сечения.

В этом сечении будет действовать максимальная продольная сила, действующая на полосу от нормативной нагрузки, которая определяется по формуле (12).

Строится эпюра продольных сил в полосе. По эпюре определяется максимальное значение силы действующей на упоры. Можно по формуле (12) записать выражение для определения продольной силы T на первом участке. Это значение и будет равно силе, действующей на упоры.

Максимальное значение продольной силы, действующей на полосу, сравнивают со значением, полученным по формуле (19).

Зная усилия, действующие на упоры, их шаг и число осуществляется подбор их размеров.

6. Результаты численного эксперимента

Проведен численный эксперимент по расчету рассмотренной сталебетонной балки (рис. 1–4). Пролет балки, так же как и в [22], принят равным 2 м. Величина действующей распределенной нагрузки 5 кН/м. Так как по сравнению с [22] нагрузка изменена, получены другие результаты. Результаты приведены на рис. 5.

Результаты расчета следующие: шаг упоров – 22 см, нулевой пролет – 11 см. Максимальная величина усилия в жестком упоре равна 9,92 кН. Максимальное продольное усилие в стальном листе равно 18,372 кН, что равняется предельному значению, вычисленному по тому же алгоритму. Схема балки и эпюры продольных сил в стальном листе показаны на рис. 6.

Напряжения в листе сталебетонной балки, полученные по результатам численного эксперимента, показаны на рис. 7. Схема расстановки анкеров показана на рис. 8.

Результаты проведенного численного эксперимента совпадают с результатами расчета по предложенному алгоритму.

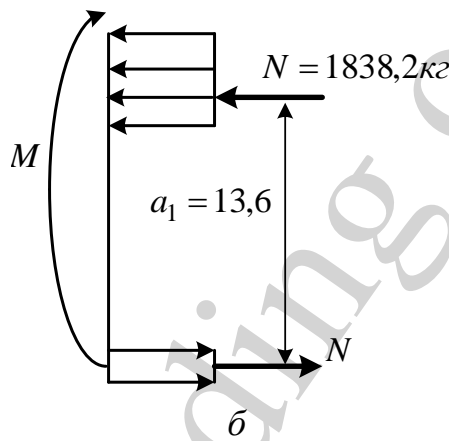
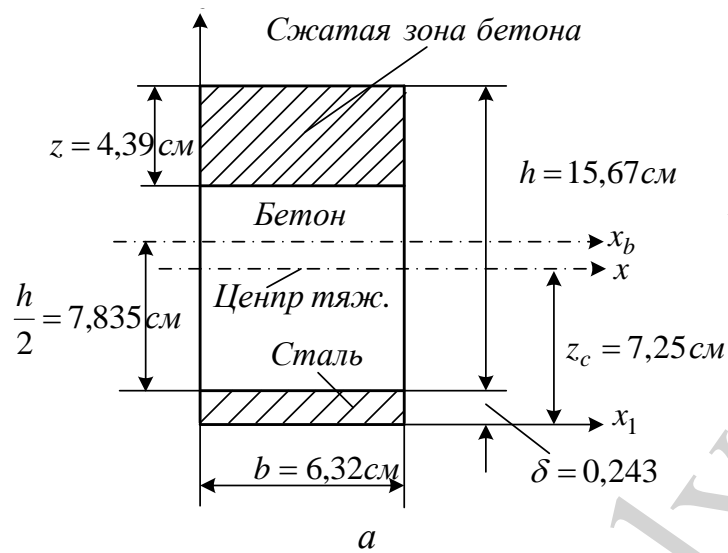


Рис. 5. Сечение сталебетонной балки: а – сечение балки; б – внутренние усилия

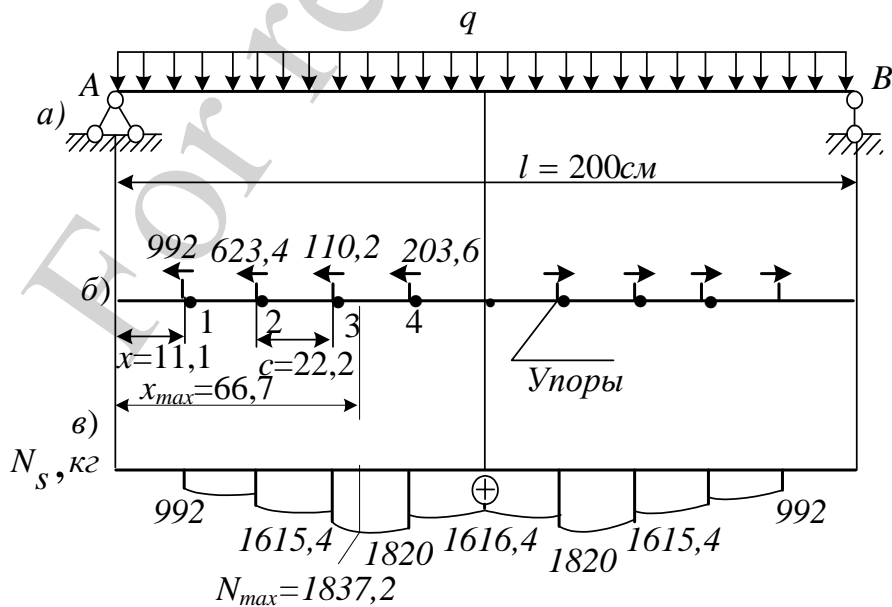


Рис. 6. Расстановка упоров и эпюра продольных сил в стальном листе: а – расчетная схема; б – схема расположения жестких упоров; в – эпюра продольных сил

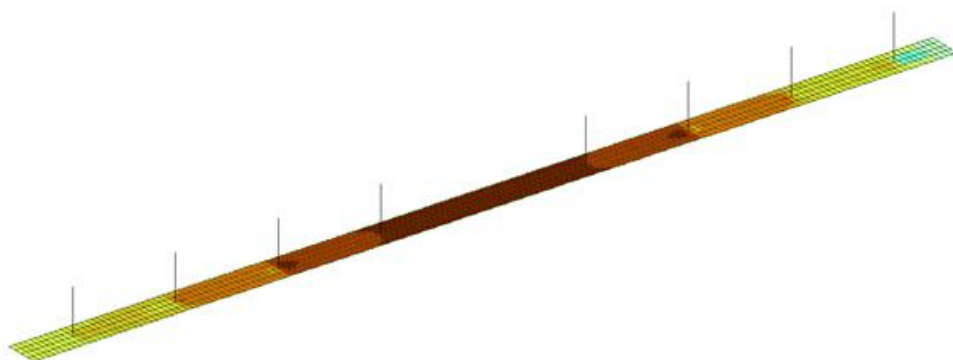


Рис. 7. Модель сталебетонной балки

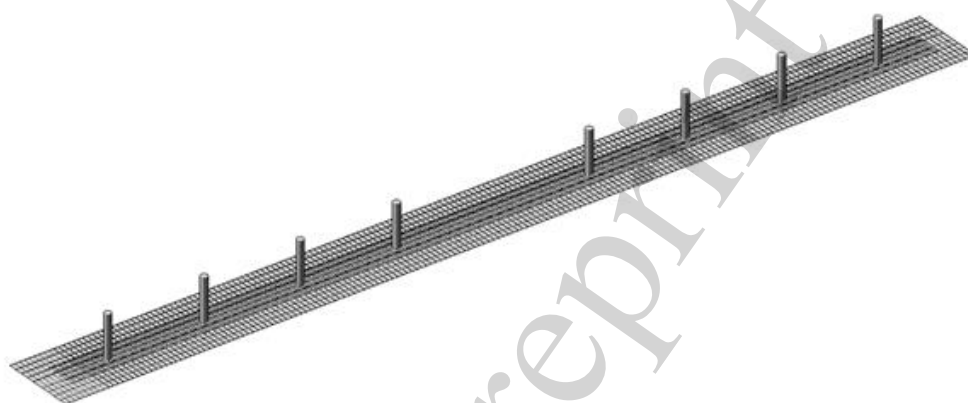


Рис. 8. Схема расстановки анкеров

7. Обсуждение результатов разработки алгоритма подбора жестких упоров в сталебетонных балках при действии распределенной нагрузки

В результате проведенных исследований получен алгоритм, который дает возможность рассчитывать количество и шаг жестких упоров. В отличие от балок, нагруженных сосредоточенной силой посередине, при действии распределенной нагрузки достичь постоянного шага упоров и постоянного усилия на них не удастся. Это связано с тем, что закон изменения углов поворота нелинейный. В этом случае шаг будем принимать постоянным, усилия, воспринимаемые упорами переменными. Усилие в стальном листе и усилие в бетоне также одинаковые и соответствует предельным значениям. Это приведет к тому, что разрушение бетона и стального листа будет происходить одновременно. Следовательно, материал конструкции – бетон и сталь, используются более рационально, что является оптимальной конструкцией с точки зрения экономии материала.

Предложенный алгоритм можно использовать для балок, нагруженных распределенной по всей длине нагрузке. Данный алгоритм получен путем доработки ранее предложенного алгоритма с нагружением силой, приложенной посередине пролета [22]. Так же, как и в случае нагружения сталебетонной балки сосредоточенной силой, удалось получить одинаковый шаг упоров по длине балки, что в свою очередь позволяет более рационально использовать материалы конструкции. Это выражается в уменьшении требуемого количества мате-

риалов и снижение трудозатрат на изготовление и эксплуатацию рассматриваемых конструкций. Предложенный алгоритм был разработан с учетом возможности распространения его на другие конструкции и условия их работы.

Подход к решению поставленных задач является универсальным. В статье показано, что после определенной доработки, методика, изложенная в [22], может быть распространена на иной способ загрузки. Из этого следует, что методика позволяет использовать данный подход для любого способа загрузки, с учетом того или иного сочетания нагрузок. Универсальность методики заключается также в том, что предложенный подход позволяет рассчитывать также сталебетонные балки и с гибкими анкерами. Для этого в алгоритме необходимо учитывать их податливость.

Алгоритм, представленный в статье, применим для составных сечений из стали и бетона (в сталебетонных балках). В железобетонных балках он неприменим, поскольку жесткие упоры в таких балках отсутствуют.

В настоящее время все большее распространение получают новые виды материалов. Это различные полимеры, фибробетон, другие искусственные материалы. Свойства таких материалов имеют свои особенности, которые, безусловно, необходимо учитывать. Возможность применения данного алгоритма к таким материалам не рассматривалась, хотя предложенный подход, наверняка можно использовать при расчете.

Многие конструкции сегодня работают в особых условиях эксплуатации. Это агрессивная среда, высокая огнеопасность, ударные нагрузки, сейсмоопасные районы и многое другое. В таких случаях необходимо предусматривать мероприятия по защите эксплуатируемых конструкций. Способы защиты от таких опасностей известны и должны применяться вне зависимости от типа и степени оптимизации конструкции.

Все выше сказанное позволяет сформулировать возможные направления развития данного исследования. Это, в первую очередь, распространение предложенного алгоритма на расчет сталебетонных балок с гибкими анкерами с учетом их податливости, а также распространение методики расчета на конструкции из других материалов.

8. Выводы

1. Расчет сталебетонных балок произведен по заданным механическим характеристикам материалов. Внешняя нагрузка, равна 5 кН/м, длина балки 2 м. Размерами поперечных сечений бетона и стального листа известны. Расчет произведен от действия равномерно распределенной внешней нагрузки. Получен одинаковый шаг упоров по длине балки, что позволяет оптимизировать конструкцию сталебетонной балки.

2. Проведен численный эксперимент, в результате которого показано, что величины напряжений совпадают с расчетными значениями. По всей длине балки расхождения в результатах не более 15 %, что подтверждает достоверность проведенных исследований.

Литература

1. Xing, Y., Han, Q., Xu, J., Guo, Q., Wang, Y. (2016). Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete-steel composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 123, 79–92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.04.023>
2. Patil, S. P., Sangle, K. K. (2016). Tests of steel fibre reinforced concrete beams under predominant torsion. *Journal of Building Engineering*, 6, 157–162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.02.004>
3. Вандоловський, С. С., Костюк, Т. О., Рачковський, О. В., Плахотнікова, І. А. (2018). Технологія створення сталевібробетону з підвищеною міцністю на розтяг. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 2 (56), 126–131. doi: <https://doi.org/10.30748/zhups.2018.56.18>
4. ДБН В.2.6-160:2010. Сталезалізобетонні конструкції (2011). Київ: Мінрегіонбуд України, 93.
5. ТКП EN 1994-1-1-2009 (02250). Еврокод 4: Проектирование стале-железобетонных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий (2010). Минск: Минстройархитектуры, 95.
6. ДСТУ Б В.2.6-216:2016. Розрахунок і конструювання з'єднувальних елементів стале залізобетонних конструкцій (2016). Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 40.
7. Hsiao, P.-C., Lehman, D. E., Roeder, C. W. (2012). Improved analytical model for special concentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 73, 80–94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.01.010>
8. Mahmoud, A. M. (2016). Finite element modeling of steel concrete beam considering double composite action. *Ain Shams Engineering Journal*, 7 (1), 73–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.03.012>
9. Luan, N. K., Bakhshi, H., Ronagh, H. R., Barkhordari, M. A., Amiri, G. G. (2011). Analytical solutions for the in-plane behavior of composite steel/concrete beams with partial shear interaction. *Asian Journal of Civil Engineering*, 12 (6), 751–771.
10. Медведев, В. Н., Семенов, С. Д. (2016). Прочность и деформативность балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием. *Инженерно-строительный журнал*, 3 (63), 3–15. doi: <https://doi.org/10.5862/mce.63.1>
11. Замалиев, Ф. С. (2018). Численные и натурные эксперименты преднапряженных сталежелезобетонных балок. *Вестник МГСУ*, 13 (3 (114)), 309–321. doi: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.3.309-321>
12. Рахманов, А. Д., Соловьев, Н. П., Поздеев, В. М. (2014). Компьютерное моделирование для исследования напряженно-деформированного состояния балок с комбинированным армированием. *Вестник МГСУ*, 1, 187–195. doi: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.1.187-195>
13. Уткин, В. А. (2010). Регулирование положения нейтральной оси при проектировании сечений сталежелезобетонных пролетных строений. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*, 4 (18), 55–60.

14. Стороженко, Л. І., Лапенко, О. І., Горб, О. Г. (2010). Конструкції залізобетонних перекриттів по профільному настилу із забезпеченням сумісної роботи бетону і сталі за допомогою склеювання. Вісник Національного університету "Львівська політехніка", 662, 360–365.
15. Торкатюк, В. І., Золотова, Н. М., Мельман, В. А. (2003). Использование акриловых клеев для соединения бетонных и железобетонных конструкций. Коммунальное хозяйство городов, 51, 61–68.
16. Стороженко, Л. І., Крупченко, О. А. (2010). Сталезалізобетонні балки із залізобетонним верхнім поясом. Вісник Національного університету "Львівська політехніка", 662, 354–360.
17. Бобало, Т. В., Бліхарський, З. Я., Ільницький, Б. М., Крамарчук, А. П. (2011). Особливості роботи сталобетонних балок армованих стержневою високоміцною арматурою різних класів. Вісник Національного університету "Львівська політехніка", 697, 35–48.
18. Вахненко, П. Ф., Хилобок, В. Г., Андрейко, Н. Т., Яровой, М. Л. (1987). Расчет и конструирование частей жилых и общественных зданий. К.: Буддвельник, 424.
19. Ying, H., Huawei, P., Xueyou, Q., Jun, P., Xiancun, L., Qiyun, P., Bao, L. (2017). Performance of Reinforced Concrete Beams Retrofitted by a Direct-Shear Anchorage Retrofitting System. Procedia Engineering, 210, 132–140. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.058>
20. John, A. T., Nwankwo, E., Orumu, S. T., Osuji, S. O. (2019). Structural Performance of Externally Strengthened Rectangular Reinforced Concrete Beams by Glued Steel Plate. European Journal of Engineering Research and Science, 4 (9), 101–106. doi: <https://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.9.1480>
21. Shkromada, O., Paliy, A., Nechyporenko, O., Naumenko, O., Nechyporenko, V., Burlaka, O. et. al. (2019). Improvement of functional performance of concrete in livestock buildings through the use of complex admixtures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (6 (101)), 14–23. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179177>
22. Petrov, A., Pavliuchenkov, M., Nanka, A., Paliy, A. (2019). Construction of an algorithm for the selection of rigid stops in steel concrete beams. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (7 (97)), 41–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155469>
23. Петров, А. Н., Кобзева, Е. Н., Красюк, А. Г. (2015). Выбор оптимальных по стоимости параметров сталобетонных балок. Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції. Харків-Красний Лиман, 330–336.