

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Транспортные и технологические машины»

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию
для студентов специальности
1-36 11 01 «Подъемно-транспортные, строительные,
дорожные машины и оборудование (по направлениям)»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2022

УДК 624.04
ББК 38.112:30.4
С86

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Транспортные и технологические машины»
«20» сентября 2022 г., протокол № 2

Составитель канд. техн. наук, доц. В. В. Береснев

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. Е. Науменко

Методические рекомендации к курсовому проектированию для студентов специальности 1-36 11 01 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование (по направлениям)» очной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Ответственный за выпуск	И. В. Лесковец
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ № .

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

Введение.....	4
1 Общие требования к курсовой работе	5
2 Методические указания по выполнению курсовой работы.....	6
3 Защита курсовой работы	12
Список литературы	13
Приложение А	14

Введение

Программа курса «Строительная механика и расчет металлоконструкций» для специальности 1-36 11 01 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование (по направлениям)» предусматривает выполнение студентами курсовой работы, целью которой является приобретение умений и навыков в самостоятельном использовании теоретических знаний для определения параметров металлоконструкции, конструирования и компоновки узлов и панелей ферм.

Расчет крановых ферм производится по методу предельных состояний, что позволяет студенту глубже ознакомиться и овладеть приемами расчета по методу предельных состояний.

При конструировании ферм особое внимание следует уделять экономии металла и технологичности их изготовления (подразумевается выбор оптимальных геометрических размеров и рациональное проектирование узлов).

1 Общие требования к курсовой работе

Курсовая работа состоит из графической части, выполняемой на двух листах формата А1, и пояснительной записки.

Все чертежи выполняются в соответствии с ЕСКД «Общие правила выполнения чертежей» и соответствующими ГОСТами. На первом листе студент изображает в масштабе схему плоской крановой фермы и проставляет основные геометрические размеры. Под схемой фермы в масштабе строятся линии влияния опорных реакций и усилий в стержнях заданной панели. На линиях влияния проставляются численные значения ординат, необходимые для дальнейших расчетов. На этом же листе строятся грузовая и единичные диаграммы Максвелла – Кремоны при загрузке фермы подвижной нагрузкой. На втором листе графической части работы изображается в масштабе заданная панель фермы (сварная и клепаная), а также сварной и клепаный узлы с обозначением сварных швов и заклепок.

Расчеты выполняются по ГОСТ 2.105–95.

При аналитическом определении усилий в стержнях фермы от распределенной нагрузки интенсивностью q в расчетах изображается схема загрузки фермы с соответствующими сечениями. Указываются силы, приложенные к отсеченной части, а также проставляются необходимые геометрические размеры плеч и усилий, углы наклона стержней, реакции опор и т. п.

Пояснительная записка и листы графической части помещаются в папку.

Пояснительная записка оформляется на листах формата А4 и в соответствии с требованиями ЕСКД (ГОСТ 2.105–95 *Общие требования к текстовым документам*). Схемы, таблицы и чертежи допускается выполнять на листах любого формата, установленного ГОСТ 2.301–88. Листы должны быть пронумерованы. Титульный лист не нумеруется, но при подсчете учитывается.

Формулы и справочные данные должны сопровождаться ссылками на использованные источники. Источники располагаются в порядке появления ссылок на них в тексте. Запись источника производится в следующей последовательности: фамилия и инициалы автора (авторов), название, место издания (город), издательство, год издания и объем в страницах (ГОСТ 7.1–84 *Библиографическое описание документа*).

Формулы, иллюстрации и таблицы нумеруются в пределах раздела. Например, вторая формула первого раздела нумеруется так: (1.2).

Текст документа при необходимости разбивается на разделы и подразделы.

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всего документа, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные с абзацного отступа. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номера раздела и номера подраздела, разделенных между собой точкой. В конце номера подраздела точка не ставится. Разделы, как и подразделы, состоят из одного или нескольких пунктов.

2 Методические указания по выполнению курсовой работы

2.1 Определение изменяемости системы

Все приведенные в заданиях на курсовую работу типы ферм статически определимы. Однако их необходимо проверить на геометрическую неизменяемость. Ферма геометрически неизменяема при условии

$$I = 2U - C - 3,$$

где C – число стержней фермы;

U – число узлов фермы.

Так как это условие является необходимым, но не достаточным, то дополнительно проверяется структура образования фермы.

2.2 Определение усилий в стержнях ферм от постоянной нагрузки

При определении усилий в стержнях ферм от постоянной нагрузки необходимо заменить равномерно распределенную нагрузку интенсивностью q узловой нагрузкой, приложенной в узлах по ездовому поясу. Величина узловой нагрузки определяется как произведение равномерно распределенной нагрузки интенсивностью q на длину соответствующего участка фермы. После определения узловой нагрузки вычисляют значение опорных реакций, а затем усилие в стержнях заданной панели от узловой нагрузки. Имеется ряд способов аналитического определения усилий в стержнях ферм. При этом не рекомендуется искомое усилие в стержне определять через ранее найденное усилие в другом стержне, а использовать в уравнении равновесия одной из частей фермы узловую нагрузку и опорные реакции. Величины плеч усилий следует определять аналитически. Каждое сечение фермы указывается на расчетной схеме.

2.3 Построение линий влияния усилий в стержнях заданной панели

Построение линий влияния усилий в стержнях заданной панели следует начинать после построения линий влияния опорных реакций. При построении линий влияния рассматривается равновесие отсеченной части фермы при расположении единичного груза левее и правее сечения. Для ферм на двух опорах при расположении груза левее сечения составляется уравнение равновесия правой отсеченной части, которая является уравнением левой ветви линии влияния, выраженным через линию влияния правой опорной реакции. При расположении груза правее сечения рассматривается равновесие левой отсеченной части и составляется уравнение правой ветви линии влияния, выраженное через линию влияния левой опорной реакции. На левую и правую ветви линии влияния сносятся узлы расчетной панели и полученные точки

соединяются передаточной прямой (левые и правые узлы берутся по ездовому поясу).

При построении линий влияния усилий в стержнях консольных ферм, где бы не находилась единичная сила, рассматривается равновесие консольной части фермы.

Контролем правильности построения линий влияния является пересечение левой и правой ветвей линий влияния под моментной точкой. Если последняя находится в бесконечности, то левая и правая ветви линии влияния параллельны.

Все пояснения, касающиеся построения линий влияния, вычерчиваются в соответствии с принятым масштабом, например $M_{л.в} = 2$ ед./см.

2.4 Определение расчетных усилий в стержнях заданной панели

Расчетные усилия в стержнях заданной панели складываются из усилий в этих стержнях от действия постоянной нагрузки интенсивностью q и подвижной нагрузки F и $F/2$.

Для определения максимального растягивающего усилия в стержне фермы от системы подвижных сил F и $F/2$ последние устанавливаются над положительными ординатами соответствующей линией влияния так, чтобы сумма произведений сил на координаты линии влияния, расположенные под ними, была наибольшей. Максимальное сжимающее усилие в стержне определяется аналогично, только силы устанавливаются над отрицательными значениями ординат линий влияния.

Для каждого стержня должно быть определено два расчетных усилия: растягивающее и сжимающее. Растягивающее расчетное усилие равно сумме усилий в стержне от постоянной нагрузки и растягивающего усилия от системы подвижных сил F и $F/2$. Сжимающее расчетное усилие равно сумме усилий в стержне от постоянной нагрузки и сжимающего усилия от системы подвижных сил F и $F/2$.

При этом учитывается коэффициент перегрузки для постоянной нагрузки $n_n = 1,1$; для подвижной нагрузки $n_{под} = 1,4$.

Значения расчетных усилий определяются для всех стержней панели и сводятся в таблицу А.1.

2.5 Определение сечений стержней

Сечения стержней подбираются в зависимости от расчетных усилий. Если растягивающее расчетное усилие в стержне больше сжимающих (по абсолютной величине), то сечение подбирается по формуле центрального растяжения из условия прочности и жесткости:

$$A = \frac{F_{расч}^p}{R},$$

где $F_{расч}^p$ – расчетное растягивающее усилие, Н;

R – расчетное сопротивление материала стержня. Для стержней из стали $R = 210$ Па;

A – площадь сечения, м².

Жесткость растянутых стержней ограничивается предельной гибкостью, которая не должна превышать значений, указанных в таблице А.2.

Если же сжимающее расчетное усилие больше растягивающего, то сечение подбирается по формуле центрального сжатия из условия прочности и устойчивости:

$$A = \frac{F_{сж}^p}{\varphi \cdot m \cdot R},$$

где $F_{сж}^p$ – расчетное сжимающее усилие, кН;

φ – коэффициент продольного изгиба, принимаемый по таблице 7.2 в зависимости от гибкости стержня λ ;

m – коэффициент условий работы. При двухстороннем креплении уголков к фасонке $m = 1$ и при одностороннем креплении $m = 0,75$.

В случае, когда растягивающее и сжимающее расчетные усилия по абсолютной величине незначительно отличаются друг от друга, расчет ведется как на растяжение, так и на сжатие, и выбирается наибольшая площадь сечения. По выбранным площадям сечений по сортаменту подбираются два равнобоких или неоднобоких уголка. Если стержень работает на растяжение и прикрепляется к фасонке заклепками, то расчетная площадь сечения увеличивается в 1,15 раза ввиду ослабления сечения отверстиями под заклепки.

Сечение центрально-сжатых стержней подбирается путем последовательных приближений. Вначале задаются коэффициентом $\varphi_0 = 0,5 \dots 0,6$ и определяют требуемую площадь двух уголков. Затем из сортамента выбирают ближайший большой по сечению уголок, рассчитывают гибкость λ принятого стержня и по таблице А.3 находят действительное значение коэффициента продольного изгиба φ_1 . Если коэффициент φ_1 значительно отличается от принятого значения φ_0 , то задаются новым значением коэффициента продольного изгиба $\varphi_2 = (\varphi_0 + \varphi_1)/2$ и расчет повторяют до тех пор, пока значения будут отличаться не более чем на 5 %.

Расчетная длина сжатого стержня l зависит от способа закрепления его концов:

$$l_p = \mu \cdot l,$$

где μ – коэффициент, учитывающий способ закрепления концов;

l – геометрическая длина стержня.

Для раскосов (кроме опорного) и стоек при потере устойчивости в плоскости ферм $\mu = 1,0$, для остальных стержней $\mu = 0,7$.

Расчетная гибкость стержня определяется как

$$\lambda = \frac{l_p}{i_{\min}},$$

где i_{\min} – минимальный радиус инерции сечения, выбранного из сортамента уголка.

2.6 Определение параметров сварных и заклепочных соединений

Выбранные уголки соединяются в узлах фермы при помощи сварки и заклепок. Сварные соединения стержней с фасонками обычно осуществляются фланговыми швами, работающими на срез. В этом случае длина шва

$$l_{шв} = \frac{F^p}{0,7 \cdot h_{шв} \cdot R_{ср}},$$

где F^p – расчетное усилие, воспринимаемое уголком;

$h_{шв}$ – катет шва, принимаемый из таблицы А.4 или равным толщине полки уголка;

$R_{ср}$ – расчетное сопротивление на срез сварного шва, $R_{ср} = 130$ МПа.

Так как усилие, воспринимаемое уголком, приложено по линии, проходящей через центр тяжести площади сечения, то требуемая длина сварного шва распределяется между «пером» и «обушком» уголка и обратно пропорциональна их расстоянию от центра тяжести сечения.

Практически при расчетах можно принимать

$$l_{шв}^{об} = \frac{2}{3} l_{шв};$$

$$l_{шв}^{перо} = \frac{1}{3} l_{шв}.$$

При расчете клепаного соединения число заклепок определяется из условия прочности на срез и на смятие и принимается наибольшее:

$$n_{ср} = \frac{4 \cdot F_{расч}}{\pi \cdot d^2 \cdot m \cdot R_{ср}^{закл}};$$

$$n_{см} = \frac{F_{расч}}{\sum \delta_{\min} \cdot d \cdot R_{см}^{закл}},$$

где m – число площадок среза одной заклепки; для стержней из двух уголков $m = 2$, из одного – $m = 1$;

$\sum \delta_{\min}$ – наименьшая суммарная толщина сминаемых элементов в одном направлении;

d – диаметр заклепки;

$R_{cp}^{закл}$ – расчетное сопротивление на срез материала заклепки,

$R_{cp}^{закл} = 180$ МПа;

$R_{см}^{закл}$ – расчетное сопротивление на смятие материала заклепки,

$R_{см}^{закл} = 420$ МПа.

Диаметр заклепок и их размещение на полке уголка рекомендуется принимать из таблицы А.5.

Шаг заклепок обычно принимают $t = 4d$, а расстояние от оси заклепки до свободной кромки уголка равным половине шага.

Толщина фасовки принимается из таблицы А.6 в зависимости от предельного усилия. При конструировании узлов ферм должны соблюдаться следующие правила:

- узлы фермы должны иметь простую форму и содержать минимальное количество вспомогательных промежуточных элементов;

- все оси стержней, сходящиеся в узле, должны пересекаться в центре узла. В этом случае работа конструкция будет соответствовать расчетной схеме;

- необходимо стремиться к тому, чтобы продольная ось присоединяемого элемента располагалась как можно ближе к центру тяжести фасовки;

- сечения сжатых поясов рекомендуется подбирать из двух неравнобоких уголков широкими полками наружу для обеспечения достаточной жесткости из плоскости фермы;

- растянутый пояс фермы может иметь тавровое сечение из равнобоких или неравнобоких уголков, составляемых узкими полками вместе;

- для сжатых и растянутых стержней рациональнее принимать уголки с более тонкими поясами как наиболее экономичные;

- наименьшая толщина рабочих элементов в узле не должна быть менее 4 мм;

- наиболее употребительные диаметры заклепок 14, 17, 20 и 23 мм. Заклепки диаметром менее 14 мм и более 23 мм применяются редко;

- наименьшая ширина полки уголка в клепаных фермах – 50 мм, в сварных – 45 мм.

После расчетов сварных и клепаных узлов в масштабе вычерчиваются сварная и клепаная панели с указанием необходимых размеров, а также один из узлов панели с соответствующими размерами.

2.7 Построение диаграммы Максвелла – Кремоны

При построении диаграммы Максвелла – Кремоны подвижная нагрузка F

и $F/2$ устанавливается в невыгодное положение в отношении прогиба фермы. Для ферм мостовых, козловых кранов и перегрузочных мостов это будет середина пролета, а для консольных кранов – конец консоли.

Построение диаграмм производится в следующей последовательности:

- определяются реакции опор при невыгодном положении подвижной нагрузки;

- вычерчивается в масштабе схема фермы с указанием нагрузки и реакций опор;

- поля между внешними силами обозначаются буквами, а между внутренними усилиями в стержнях – цифрами;

- строится замкнутый многоугольник внешних сил, т. е. план сил, поскольку рассматриваемая ферма находится в равновесии. Причем силы откладываются в той последовательности, в которой они встречаются при обходе фермы по часовой стрелке;

- на базе многоугольника внешних сил для каждого узла фермы, начиная с узла, где сходятся не более двух стержней с неизвестными усилиями, строится замкнутый многоугольник сил. Узлы обходятся в направлении движения часовой стрелки;

- перенеся направление усилий из диаграммы на соответствующие элементы фермы, получают знаки усилий: растяжение, если усилие направлено от узла, и сжатие, если усилие направлено к узлу;

- при переносе усилий обход узлов сохраняется тот же, который был принят при построении диаграммы, т. е. по часовой стрелке. На диаграмме усилия сжатия обозначаются жирными линиями, а усилия растяжения – тонкими;

- определяются модули усилий как произведение масштаба на длину измеренных отрезков диаграммы, составляется таблица усилий.

Диаграмма усилий обладает следующими свойствами:

- число сторон диаграммы равно числу сторон фермы;

- линии на диаграмме параллельны соответствующим осям стержней фермы;

- каждому узлу фермы соответствует на диаграмме замкнутый многоугольник сил.

2.8 Построение линии прогибов

Линия прогибов ездового пояса строится при невыгодном положении подвижной нагрузки.

При использовании расчетной схемы фермы с шарнирным соединением стержней в узлах в стержнях возникают только продольные силы и перемещение j -го узла определяется по формуле

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^k \frac{F_{li} \cdot F_{ni}}{E \cdot A_i} l_i,$$

где F_{ji} – усилие в i -м стержне фермы от единичной силы $F = 1$, расположенной в j -м узле;

F_{ni} – усилие в n -м стержне фермы от подвижной нагрузки F и $F/2$, расположенной в невыгодном положении;

E – модуль упругости материала стержня, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа;

A_i – площадь сечения i -го стержня;

l_i – длина i -го стержня;

k – количество стержней фермы.

По формуле видно, что для определения перемещения i -го узла необходимо в этом узле расположить единичную силу $F = 1$ и определить усилия во всех стержнях фермы от этой силы. Дополнительно необходимо определить усилия во всех стержнях фермы от подвижной нагрузки, расположенной в невыгодном положении.

Усилия в стержнях ферм от единичной силы и от подвижной нагрузки определяются по единичной и грузовой диаграммам Максвелла – Кремоны.

Количество узлов, для которых определяется прогиб ездового пояса, принимается три-четыре. Все вычисления сводятся в таблицу А.7.

Площади сечений стержней поясов, стоек и раскосов принимаются реальными и соответствующими площадям сечений рассчитываемой панели.

Для определения прогибов каждого из четырех узлов ездового пояса составляются отдельные таблицы, в которых колонки 1–4 будут одинаковыми.

По полученным прогибам узлов под фермой в масштабе строится линия прогибов ездового пояса.

3 Защита курсовой работы

Курсовая работа допускается к защите после проверки ее и соответствующего разрешения руководителя. Защита курсовой работы проводится перед комиссией с участием руководителя в установленные сроки. Для защиты студент готовит краткий доклад, в котором освещаются основные вопросы разработки. После доклада студент отвечает на вопросы, поставленные членами комиссии.

Оценка выставляется на основе анализа пояснительной записки, доклада и ответов на вопросы.

Список литературы

- 1 **Смирнов, В. А.** Строительная механика : учебник для вузов / Под ред. В. А. Смирнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2018. – 423 с.
- 2 **Трушин, С. И.** Строительная механика: метод конечных элементов: учебное пособие / С. И. Трушин. – Москва : ИНФРА-М, 2019. – 305 с.

Приложение А (справочное)

Таблица А.1 – Расчетное усилие в стержнях панели

Номер стержня	Усилие от постоянной нагрузки (со своим знаком) $F_n \cdot n_n$	Усилие от подвижной нагрузки $(F \cdot Y_1 + F/2 \cdot Y_2) \cdot n_{под}$		Расчетное усилие $F_{расч}$	
		растягивающее $F_{раст}$	сжимающее $F_{сжим}$	растягивающее $F_{раст}^p$	сжимающее $F_{сжим}^p$
D_{4-5}					
D_{4-6}					
D_{6-7}					
D_{4-7}					

Таблица А.2 – Предельные гибкости элементов ферм

Тип элементов ферм	Сжатые	Растянутые
Пояса главных ферм	120	150
Элементы решетки	150	200

Таблица А.3 – Коэффициент φ центрального сжатия стержней

Гибкость λ	Марка стали		
	Ст. 3кп, Ст. 3пс, Ст. 3сп	15 ХСНД, 10Г2С	10ХСНД
1	2	3	4
0	1,00	1,00	1,00
10	0,99	0,98	0,99
20	0,97	0,95	0,95
30	0,95	0,92	0,92
40	0,92	0,89	0,88
50	0,89	0,89	0,88
60	0,86	0,78	0,77
70	0,81	0,71	0,68
80	0,75	0,63	0,59
90	0,69	0,54	0,50
100	0,60	0,46	0,43
110	0,52	0,39	0,36

Окончание таблицы А.3

1	2	3	4
120	0,45	0,33	0,31
130	0,40	0,29	0,27
140	0,36	0,25	0,23
150	0,32	0,23	0,21
160	0,29	0,21	0,19
170	0,26	0,19	0,17
180	0,23	0,17	0,15
190	0,21	0,15	0,13
200	0,19	0,13	0,12

Примечание – При гибкостях $\lambda > 200$ проверка устойчивости ведется по формуле Эйлера

Таблица А.4 – Катет сварного шва

Толщина элементов, мм	4...9	10...14	15...25	26...40	40
Катет шва, мм	4	6	8	10	12

Таблица А.5 – Схемы расположения заклепок

Диаметр и расположение заклепок										
однорядное			шахматное				двухрядное			
b	e	$d_{закл}$	b	e_1	e_2	$d_{закл}$	b	e_1	e_2	$d_{закл}$
50	30	14	120	55	85	23	180	70	140	23
55	30	14	130	55	90	23	200	70	150	26
60	35	17	150	65	110	26	–	–	–	–
65	35	20	180	70	130	29	–	–	–	–
75	40	20	200	90	150	29	–	–	–	–
80	45	23	–	–	–	–	–	–	–	–
90	50	23	–	–	–	–	–	–	–	–
100	60	27	–	–	–	–	–	–	–	–
120	65	29	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица А.6 – Рекомендуемые толщины узловых фасонок

Усилие, кН	До 200	200...500	500...750	750...1100	1100...1600	1600...2200	2200...3500
Толщина фасонки, мм	8	10	12	14	16	18	20

Таблица А.7 – Перемещение узла фермы

Номер стержня	ℓ , м	A , см ²	F_{n1} , ед.	$F_{n.n.}$, кН	$F_{n1} \cdot F_{n.n.}$	$F_{n1} \cdot F_{n.n.} \cdot \lambda$	$\frac{F_{n1} \cdot F_{n.n.} \cdot \lambda}{A}$
D_{4-5}							
D_{4-6}							
D_{6-7}							
D_{4-7}							