

УДК 69.04

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РАСЧЕТОВ ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРМ

Евсеев Александр Евгеньевич,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г.Пенза,*

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».

Аннотация

В статье описана история развития методов расчета плоских металлических ферм, проведен анализ современного состояния вопроса, указаны недостатки существующих методов.

Ключевые слова: стальные фермы, стержневые системы, расчет шарнирно-стержневых систем, прочность, устойчивость.

OBTAINING THE INCREMENTAL EQUATIONS OF THE METHOD OF FINITE ELEMENTS OF THE ROD SYSTEM

Yevseyev Aleksandr Yevgenyevich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department "Mechanics".

Abstract

The article describes the history of the development of methods for calculating flat metal trusses, analyzes the current state of the issue, and indicates the disadvantages of existing methods.

Keywords: steel trusses, rod systems, calculation of articulated-rod systems, strength, stability.

Металлические фермы широко используются в современном строительстве. Это обусловлено тем, что при необходимости перекрытия

больших пролетов применение стержней сплошного сечения приводит к существенному утяжелению конструкции. При этом собственный вес конструкции растет значительно быстрее увеличения перекрываемого пролета. Считается что для пролетов свыше 18-ти метров экономически обосновано применение стропильных ферм. Это связано с тем, что несмотря на трудоемкость их изготовления по сравнению с ригелями сплошного сечения имеется существенное сокращение массы самой несущей конструкции, что как следствие приводит к снижению затрат на материал. В случае же пролетов, превышающих 36 метров, конструкции решетчатого сечения остаются практически безальтернативными. При таких пролетах несущей способности балок сплошного сечения едва достаточно для восприятия собственного веса. Таким образом металлические фермы совершенно необходимы в строительных большепролётных конструкциях, типа мостов, стропильных систем промышленных зданий, спортивных сооружений, а также при возведении небольших лёгких строительных и декоративных конструкций: павильонов, сценических конструкций, тентов и т.п.

Как известно, первые цельнометаллические фермы были построены в США в 1840 году. Верхние пояса были выполнены из чугуна, а нижние пояса и раскосы из сварочного железа. Сечения всех элементов ферм назначались эмпирически без всякого обоснования расчета.

Благодаря работам Д.И. Журавского, Шведлера, Максвелла, Лямэ, Кремоны были разработаны методы определения внутренних усилий в элементах шарнирно-стержневых ферм, однако сечения их сжатых элементов по-прежнему назначались полуэмпирически. Попытки инженеров назначать сечения сжатых элементов фермы путем их расчета на устойчивость привели к нескольким тяжелейшим катастрофам вследствие потери устойчивости сжатых раскосов конструкций.

Так в 1891 году в Швейцарии у деревни Менхенштейн обрушился железнодорожный мост через реку Бирс длиной 42 м из-за потери устойчивости одного из сжатых раскосов несущей фермы. Сечение средних сжатых раскосов,

составленных из двух расположенных крестообразно уголков, и их эксцентрическое, а не центровое присоединение к поясам, игнорирование знакопеременности нагрузки (чередующиеся напряжения на растяжение и на сжатие) и слабое сопротивление тонких сжатых стержней продольному изгибу привели к тому, что запас прочности снизился до 75% от требуемой в те времена нормы. В катастрофе погибло 74, и было ранено более 200 человек.

В 1907 году обрушился большой Квебекский мост пролетом 549 м через реку Святого Лаврентия в США. Причиной катастрофы явился неправильный расчет сжатого составного стержня на устойчивость. Погибло 75 человек, 19000 тонн металлических конструкций пришло в негодность.

Ряд аварий на мостовых переходах железных дорог Западной Европы был связан с потерей устойчивости нераскрепленных (открытых) поясов из плоскости несущей конструкции. В России такая авария имела место на мосту через реку Кевду на бывшей Моршанско-Сызранской железной дороге.

Все эти обстоятельства привели к появлению многочисленных исследований, посвященных устойчивости сжатых конструкций металлических ферм. Большой вклад в обоснование причин продольного изгиба сделал наш соотечественник, инженер Ф.С. Ясинский. Исследуя происшедшие тогда крушения открытых мостов, т. е. мостов, не имевших верхних горизонтальных связей, он заинтересовался влиянием растянутых раскосов на сжатие в многорешетчатых мостах, имевших две системы раскосов, одна из которых работала на сжатие, а другая на растяжение. Результаты своих исследований он опубликовал в 1893 г. в труде «Опыт развития теории продольного изгиба». Ф.С. Ясинский составил таблицы, которые использовались до 1939 г., когда академик А. Н. Динник предложил новые.

Впоследствии благодаря работам С.П. Тимошенко [6,7], Ф. Блейха [2] и других авторов удалось получить решение задачи устойчивости сжатого пояса из плоскости при дискретном расположении упругих опор, переменных по длине пояса моментах инерции и сжимающих силах. Во всех этих работах рассматривалась лишь изгибная форма потери устойчивости сжатого пояса

фермы. Впоследствии Хренников, а вслед за ним и Тимошенко рассмотрели задачу выпучивания стержня в упругой среде вследствие не только изгиба, но и кручения.

Широкое использование для покрытия зданий и сооружений стропильных и подстропильных металлических ферм, в которых верхние пояса раскреплены из плоскости, привело к многочисленным исследованиям, посвященным изучению устойчивости сжатых элементов в плоскости конструкции.

В 1919 году Ф. Блейх сделал, по-видимому, первую попытку оценить расчетную длину сжатого элемента в плоскости фермы. Достигал он этого, разделив ферму на небольшие группы стержней, примыкающих к рассматриваемому. Впоследствии в 30^{-е} годы эти идеи Ф. Блейха развивались С.Н. Никифоровым [4], Н.В. Корноуховым [3], Боркманом, Кассенсем, самим Ф. Блейхом и др.

С.Н. Никифоров предложил определять расчетную длину сжатого элемента как упруго-закрепленного по концам стержня, причем степень жесткости упругих заделок определялась с учетом действия продольных сил в примыкающих стержнях с шарнирным опиранием их на противоположных от рассматриваемого концах, которые вычислялись по формулам

$$r_c = \frac{3EI}{l} \frac{1}{t_v}, \text{ для сжатых элементов;}$$

$$r_p = \frac{3EI}{l} \frac{1}{t'_v}, \text{ для растянутых элементов,}$$

где t_v и t'_v — функции Н.Е. Жуковского.

Ф. Блейх определял коэффициент приведения длины, рассматривая устойчивость части фермы, состоящей из трех групп стержней в своей плоскости. Как и у С.Н. Никифорова, предполагалось, что стержни фермы жестко соединены с рассматриваемым элементом и шарнирно закреплены на противоположных концах. Им разработаны таблицы коэффициентов приведения длины в плоскости фермы отдельно для раскосов раскосной фермы,

раскосов полураскосной фермы и для элементов сжатого пояса с постоянным поперечным сечением. Значения коэффициентов приведенной длины элементов фермы могут изменяться по Ф. Блейху от 0,57 до 1.

В 60-70^е годы А.Н. Раевский [5], используя метод перемещений Н.В. Корноухова, рассмотрел устойчивость ферм с треугольной решеткой в своей плоскости. При этом А.Н. Раевский исходил из следующих предпосылок:

- до потери устойчивости все стержни центрально сжаты и усилия в них определяются по шарнирной схеме;
- при определении критического параметра нагрузки узлы фермы считаются жесткими и неподвижными.

В 1958 году с целью изучения поведения сложных статически неопределимых конструкций в упруго-пластической стадии работы в ЦНИИСКе АСИА СССР совместно с кафедрой строительных конструкций Московского инженерно-строительного института проводилось масштабное экспериментальное исследование поперечных рам стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий под руководством Е.И. Беленя [1]. Данное исследование проводилось на опытном каркасе в 1/2 действительной величины с двухпролетными рамами, конструктивные элементы и сопряжения которых близки к натурным. На основе результатов испытаний был произведен анализ физических явлений, сопровождающих переход конструкции в предельные состояния. В частности отмечалось, что предельное состояние много раз статически неопределимой комбинированной рамы при загрузении ригеля наступает мгновенно в случае потери несущей способности одним из сжатых стержней фермы; принимаемая в расчете свободная длина средних сжатых раскосов оказывается завышенной, вследствие чего они имеют избыточные запасы устойчивости; при деформировании стержни ригеля изгибаются и закручиваются, что влечет за собой потерю несущей способности всей статически неопределимой решетчатой системы.

В конце 70^{-х} лабораторией металлических конструкций НИИ "Уральский Промстройинипроект" под руководством Б.Я. Володарского проводились

натурные испытания эксплуатируемых конструкций. Целью исследования было создание на базе теории статистических решений математической модели действительной работы металлической фермы, осуществить с ее помощью деформационный расчет конструкции, а также уточнить расчетные схемы стропильных ферм. Так как испытания проводились на эксплуатируемых конструкциях, т.е. при нагрузках меньших критических, элементы фермы работали в упругой стадии. При определении внутренних усилий и деформаций отмечалось появление дополнительных напряжений от изгибающих моментов.

Практически все исследователи, проводившие экспериментальные исследования стержневых металлических конструкций, указывали на появление в процессе деформирования элементов изгиба и закручивания, что объяснялось начальными несовершенствами конструкции (эксцентриситетами, погибью и т.д.).

Современные нормы проектирования предполагают оценивать несущую способность сжатых элементов ферм исходя из следующих предпосылок:

1) если высота сечения стержня в плоскости фермы h меньше $1/10$ межузловой длины, то все элементы фермы считаются центрально-сжатыми и продольные усилия вычисляются по шарнирно-стержневой схеме;

2) несущая способность сжатого элемента фермы определяется как для центрально-сжатого стержня по формуле

$$N = \varphi A \cdot R_y \gamma_c,$$

где коэффициент продольной длины φ определяется по большей из двух гибкостей $\lambda = l_{ef}/i$ в плоскости или из плоскости фермы. Расчетная длина элемента l_{ef} определяется исходя из следующих рекомендаций: в плоскости фермы для поясов и опорных раскосов она равна расстоянию между центрами узлов, для прочих элементов решетки $0,8 \dots 0,9$ (в зависимости от прикрепления к поясам) геометрической длины; в направлении, перпендикулярном плоскости фермы — расстоянию между узлами, закрепленными от смещения из плоскости фермы.

Нетрудно видеть, что исследования Ф. Блейха, С.Н. Никифорова, Н.В. Корноухова, Боркмана, Кассенса, А.Н. Раевского посвящены по существу уточнению коэффициента приведенной длины μ . По нашему мнению, рекомендации норм проектирования нуждаются в серьезных уточнениях.

Во-первых, рекомендация о переходе к шарнирно-стержневой расчетной схеме при $h/l \leq 1/10$, вполне экспериментально и теоретически обоснованная, для определения внутренних усилий мало приемлема при оценке устойчивости фермы, поскольку даже небольшие изгибающие моменты в элементах фермы могут существенно снизить несущую способность сжатых элементов.

Во-вторых, потеря устойчивости элементов даже плоской фермы может иметь изгибно-крутильную форму, что в СП никак не учитывается.

В-третьих, рекомендации СП относительно расчетных длин весьма приблизительны и нуждаются в уточнениях.

Наконец, в-четвертых, несущая способность существующих ферм с начальными и приобретенными в процессе эксплуатации несовершенствами никак не может быть оценена в соответствии со СП, в особенности, если эти несовершенства характеризуются пространственными искривлениями стержней.

Библиографический список:

1. Беленя, Е.И. Предельные состояния поперечных рам одноэтажных промышленных зданий [Текст] /ЦНИИСК / Научное сообщение / Выпуск 6. М.: Госстройиздат. 1958.
2. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций [Текст]. М.: Физматгиз. 1959. 544 с.
3. Корноухов, Н.В. Прочность и устойчивость стержневых систем [Текст]. М.: Стройиздат, 1949. 376 с.
4. Никифоров, С.Н. Устойчивость сжатых стержней сварных ферм [Текст]. М.-Л.: Госстройиздат. 1938. – 83 с.

5. Раевский, А.Н. Определение рациональных жесткостей элементов решетки балочных ферм [Текст] / А.Н. Раевский // Строит. механика и расчет сооружений. – 1971. – № 5. – С. 23-28.

6. Тимошенко, С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек: Избр. работы / Под ред. Э.Н. Григолюка [Текст] / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1971. – 808 с.

7. Тимошенко, С.П. Устойчивость упругих систем [Текст] / С.П. Тимошенко / Под ред. В.З. Власова. – М.: ОГИЗ, 1946. – 534 с.