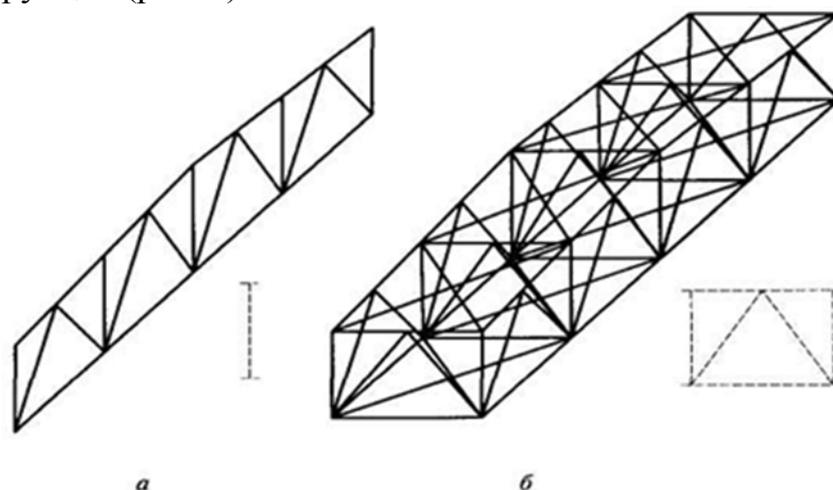


Фермы. Общая характеристика и классификация

Ферма - система стержней, соединенных между собой в узлах и образующих геометрически неизменяемую конструкцию. Фермы бывают плоскими (все стержни лежат в одной плоскости) и пространственными.

Плоские фермы (рис. а) могут воспринимать нагрузку, приложенную только в их плоскости, и нуждаются в закреплении из своей плоскости связями или другими элементами. Пространственные фермы (рис. б, в) образуют жесткий пространственный брус, способный воспринимать нагрузку, действующую в любом направлении. Каждая грань такого бруса представляет собой плоскую ферму. Примером пространственного бруса может служить башенная конструкция (рис. г).



Плоская (а) и пространственная (б) фермы

Рис. Плоская (а) и пространственные (б, в, г) фермы

Основными элементами ферм являются пояса, образующие контур фермы, и решетка, состоящая из раскосов и стоек (рис.).

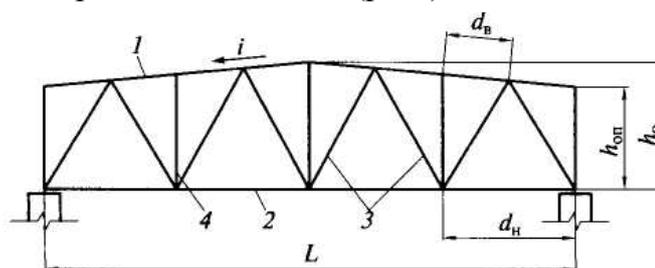


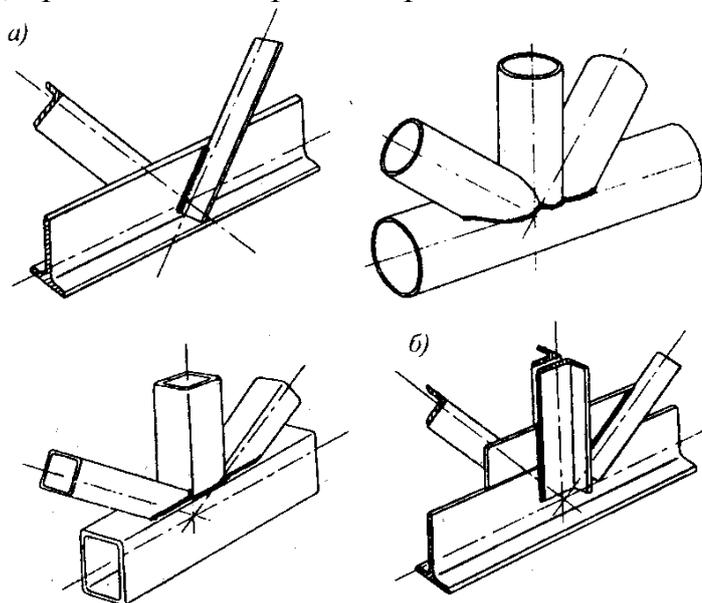
Рис. 9.2. Элементы ферм:

1 — верхний пояс; 2 — нижний пояс; 3 — раскосы; 4 — стойка

Расстояние между узлами пояса называют панелью (d), расстояние между опорами - пролетом (L), расстояние между осями (или наружными гранями) поясов - высотой фермы ($h_{ф}$).

Пояса ферм работают в основном на продольные усилия и момент (аналогично поясам сплошных балок); решетка ферм воспринимает в основном поперечную силу.

Соединения элементов в узлах осуществляют путем непосредственного примыкания одних элементов к другим (рис. а) или с помощью узловых фасонок (рис. б). Для того чтобы стержни ферм работали в основном на осевые усилия, а влиянием моментов можно было пренебречь, элементы ферм центрируют по осям, проходящим через центры тяжести.



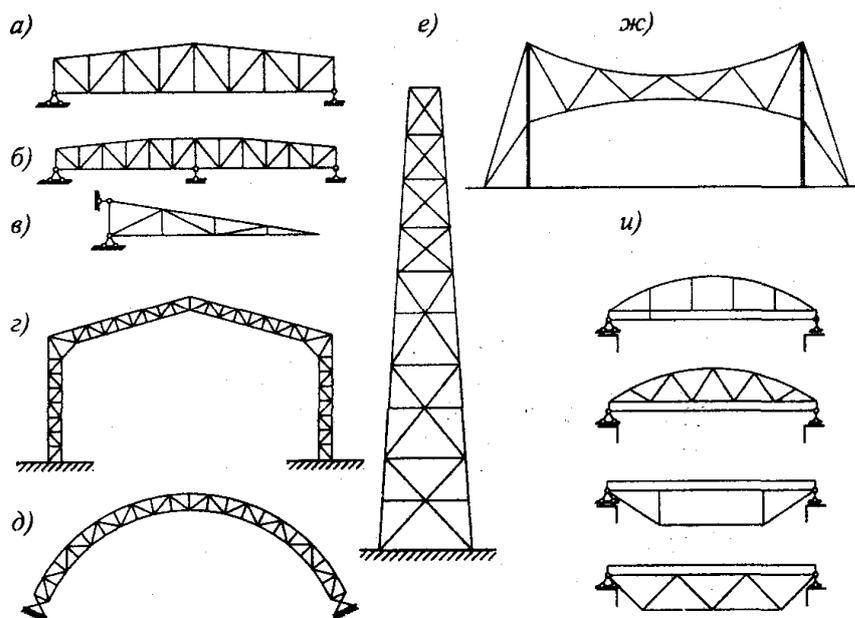
а – при непосредственном примыкании элементов решетки к поясу;
б – при соединении элементов с помощью фасонки

Рис. Узлы ферм

Фермы классифицируют по статической схеме, очертанию поясов, системе решетки, способу соединения элементов в узлах, величине усилия в элементах. **По статической схеме** фермы бывают (рис.): балочные (разрезные, неразрезные, консольные), арочные, рамные и вантовые.

Балочные разрезные системы (рис.а) применяются в покрытиях зданий, мостах. Они просты в изготовлении и монтаже, не требуют устройства сложных опорных узлов, но весьма металлоемки. При больших пролетах (более 40 м) разрезные фермы получаются негабаритными и их приходится собирать из отдельных элементов на монтаже. При числе перекрываемых пролетов два и более применяют **неразрезные** фермы (рис. б). Они экономичнее по расходу металла и обладают большей жесткостью, что позволяет уменьшить их высоту. Но при осадке опор, в неразрезных фермах возникают дополнительные усилия, поэтому их применение при слабых просадочных основаниях не рекомендуется. Кроме того, усложнен монтаж таких конструкций.

Консольные фермы (рис. в, е) используют для навесов, башен, опор воздушных линий электропередач. **Рамные** системы (рис. д) экономичны по расходу стали, имеют меньшие габариты, однако более сложны при монтаже. Их применение рационально для большепролетных зданий. Применение **арочных** систем (рис. д), хотя и дает экономию стали, приводит к увеличению объема помещения и поверхности ограждающих конструкций. Их применение вызвано в основном архитектурными требованиями.



а - балочная разрезная; б - балочная неразрезная; в, е - консольная;
г - рамная; д - арочная; ж - вантовая; з - комбинированные:

Рис. Системы ферм

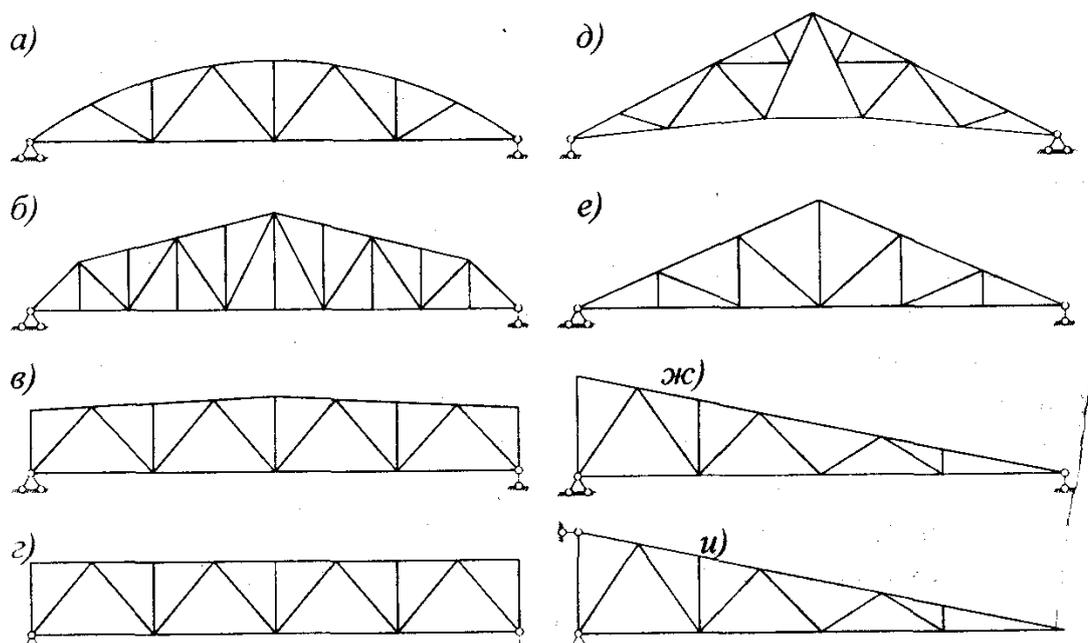
В **вантовых** фермах (рис. ж) все стержни работают только на растяжение и могут быть выполнены из гибких элементов, например стальных тросов. Растяжение всех элементов таких ферм достигается выбором очертания поясов и решетки, а также созданием предварительного напряжения. Работа только на растяжение позволяет полностью использовать высокие прочностные свойства стали, поскольку снимаются вопросы устойчивости. Вантовые фермы рациональны для большепролетных перекрытий и в мостах. Применяются также комбинированные системы, состоящие из балки, подкрепленной снизу шпренгелем или раскосами, либо сверху аркой (рис. з). Эти системы просты в изготовлении (вследствие меньшего числа элементов) и рациональны в тяжелых конструкциях, а также в конструкциях с подвижными нагрузками. Весьма эффективно применение комбинированных систем при усилении конструкций, например, подкрепление балки, при недостаточной ее несущей способности, шпренгелем или подкосами.

В зависимости от **очертания поясов** фермы подразделяют на сегментные, полигональные, трапециевидальные, с параллельными поясами и треугольные (рис.).

Наиболее экономичной по расходу стали является ферма, очерченная по эпюре моментов. Для однопролетной балочной системы с равномерно распределенной нагрузкой это **сегментная** ферма с параболическим поясом (рис. а). Однако криволинейное очертание пояса повышает трудоемкость изготовления, поэтому такие фермы в настоящее время практически не применяют.

Более приемлемым является **полигональное** очертание (рис. б) с переломом пояса в каждом узле. Оно достаточно близко соответствует параболическому очертанию эпюры моментов, не требует изготовления

криволинейных элементов. Такие фермы иногда применяют для перекрытия больших пролетов и в мостах.



а - сегментное; б - полигональное; в - трапецеидальное; г - с параллельными поясами; д, е, ж, и - треугольное

Рис. Очертания поясов ферм:

Фермы *трапецеидального* очертания (рис. в) имеют конструктивные преимущества прежде всего за счет упрощения узлов. Кроме того, применение таких ферм в покрытии позволяет устроить жесткий рамный узел, что повышает жесткость каркаса.

Фермы с *параллельными поясами* (рис. г) имеют равные длины элементов решетки, одинаковая схема узлов, наибольшая повторяемость элементов и деталей и возможность их унификации, что способствует индустриализации их изготовления.

Фермы *треугольного* очертания (рис. д, е, ж, и) рациональны для консольных систем, а также для балочных систем при сосредоточенной нагрузке в середине пролета (подстропильные фермы). При распределенной нагрузке треугольные фермы имеют повышенный расход металла. Кроме того, они имеют ряд конструктивных недостатков. Острый опорный узел сложен и допускает только шарнирное сопряжение с колоннами. Средние раскосы получаются чрезвычайно длинными, и их сечение приходится подбирать по предельной гибкости, что вызывает перерасход металла.

По способу соединения элементов в узлах фермы подразделяют на сварные и болтовые. В конструкциях, изготовленных до 50-х годов, применялись также клепаные соединения. Основными типами ферм являются сварные. Болтовые соединения, как правило, на высокопрочных болтах применяют в монтажных узлах.

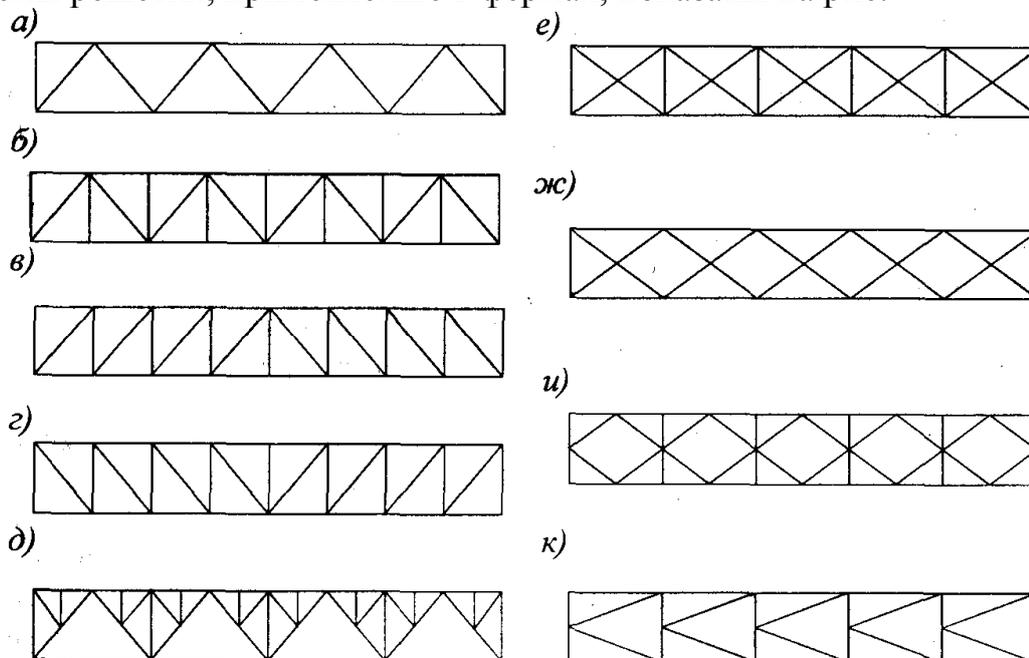
По величине максимальных усилий условно различают легкие фермы с сечениями элементов из простых прокатных или гнутых профилей (при

усилиях в стержнях $N < 3000$ кН) и тяжелые фермы с элементами составного сечения ($N > 3000$ кН).

Эффективность ферм может быть повышена при создании в них предварительного напряжения.

Системы решеток ферм

Системы решетки, применяемые в фермах, показаны на рис.



а - треугольная; б - треугольная со стойками; в, г - раскосная; д - шпренгельная; е - крестовая; ж - перекрестная; и - ромбическая; к - полураскосная

Рис. Системы решеток ферм

Выбор типа решетки зависит от схемы приложения нагрузок, очертания поясов и конструктивных требований. Для обеспечения компактности узлов угол между раскосами и поясом желательно иметь в пределах $30...50^\circ$.

Треугольная система решетки (рис. а) имеет наименьшую суммарную длину элементов и наименьшее число узлов. Различают фермы с **восходящими** и **нисходящими** опорными раскосами.

В местах приложения сосредоточенных нагрузок (например, в местах опирания прогонов кровли) можно установить дополнительные стойки или подвески (рис. б). Эти стойки служат также для уменьшения расчетной длины пояса. Стойки и подвески работают только на местную нагрузку.

Недостатком треугольной решетки является наличие длинных сжатых раскосов, что требует дополнительного расхода стали для обеспечения их устойчивости.

В **раскосной** решетке (рис. в, г) все раскосы имеют усилия одного знака, а стойки - другого. Раскосная решетка более металлоемка и трудоемка по сравнению с треугольной, так как общая длина элементов решетки больше и в

ней больше узлов. Применение раскосной решетки целесообразно при малой высоте ферм и больших узловых нагрузках.

Шпренгельную решетку (рис. д) применяют при внеузловом приложении сосредоточенных нагрузок к верхнему поясу, а также при необходимости уменьшения расчетной длины пояса. Она более трудоемка, но может обеспечить снижение расхода стали.

Крестовую решетку (рис. е) применяют при действии нагрузки на ферму как в одном, так и в другом направлении (например, ветровая нагрузка). В фермах с поясами из тавров можно применить **перекрестную** решетку (рис. ж) из одиночных уголков с креплением раскосов непосредственно к стенке тавра.

Ромбическая и полураскосная решетки (рис. и, к) благодаря двум системам раскосов обладают большой жесткостью; эти системы применяют в мостах, башнях, мачтах, связях для уменьшения расчетной длины стержней.

Типы сечений стержней ферм

По расходу стали для сжатых стержней ферм наиболее эффективным является тонкостенное трубчатое сечение (рис. а). Круглая труба обладает наиболее благоприятным для сжатых элементов распределением материала относительно центра тяжести и при равной с другими профилями площади сечения имеет наибольший радиус инерции ($i \approx 0,355d$), одинаковый во всех направлениях, что позволяет получить стержень наименьшей гибкости. Применение труб в фермах дает экономию стали до 20...25 %.

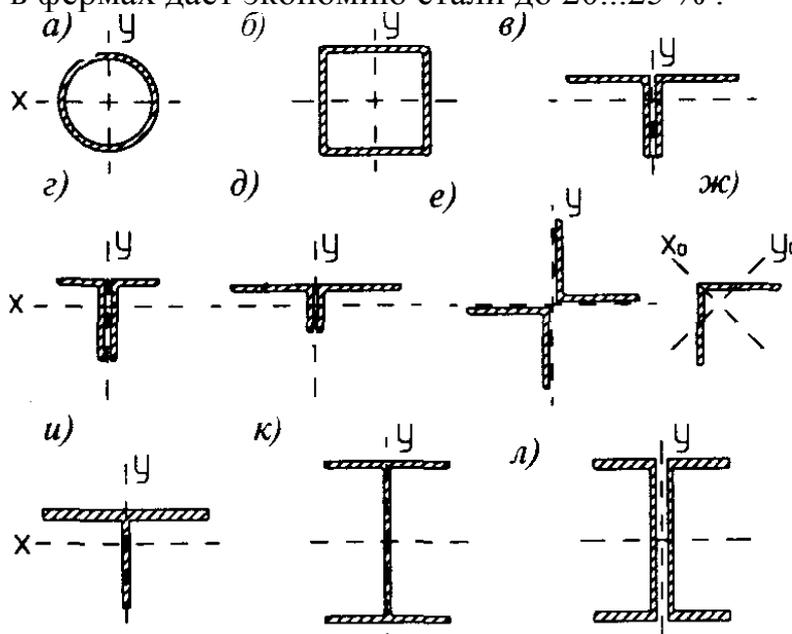


Рис. Типы сечений элементов легких ферм

Большим преимуществом круглых труб является хорошая обтекаемость. Благодаря этому ветровое давление на них меньше, что особенно важно для высоких открытых сооружений (башен, мачт, кранов). На трубах мало задерживается иней и влага, поэтому они более стойки против коррозии, их легко очищать и окрашивать. Все это повышает долговечность трубчатых конструкций. Для предотвращения коррозии внутренние полости трубы следует герметизировать.

Прямоугольные гнуто-замкнутые сечения (рис. б), позволяют упростить узлы сопряжения элементов. Однако, фермы из гнутозамкнутых профилей с бесфасоночными узлами требуют высокой точности изготовления и могут быть выполнены только на специализированных заводах.

До последнего времени легкие фермы проектировали в основном из двух уголков (рис. в, г, д, е). Такие сечения имеют большой диапазон площадей, удобны для конструирования узлов на фасонках и прикрепления примыкающих к фермам конструкций (прогонов, кровельных панелей, связей). Существенным недостатком такой конструктивной формы являются; большое количество элементов с различными типоразмерами, значительный расход металла на фасонки и прокладки, высокая трудоемкость изготовления и наличие щели между уголками, что способствует коррозии. Стержни с сечением из двух уголков, составленных тавром, не эффективны при работе на сжатие.

При относительно небольшом усилии стержни ферм можно выполнять из одиночных уголков (рис. ж). Такое сечение проще в изготовлении, особенно при бесфасоночных узлах, поскольку имеет меньше сборочных деталей, не имеет щелей, закрытых для очистки и окраски.

Использование для поясов ферм тавров (рис. и) позволяет значительно упростить узлы. В такой ферме уголки раскосов и стоек можно приварить непосредственно к стенке тавра без фасонки. Это в два раза уменьшает количество сборочных деталей и снижает трудоемкость изготовления.

Если пояс ферм работает, помимо осевого усилия, и на изгиб (при внеузловой передаче нагрузки), рационально сечение из двутавра или двух швеллеров (рис. к, л).

Весьма часто сечения элементов фермы принимают из разных видов профилей: пояса из двутавров, решетка из гнутозамкнутых профилей, или пояса из тавров, решетка из парных или одиночных уголков. Такое комбинированное решение оказывается более рациональным.

Сжатые элементы ферм следует проектировать равноустойчивыми в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При одинаковых расчетных длинах $l_x = l_y$ этому условию отвечают сечения из круглых труб и квадратных гнутозамкнутых профилей/.

В фермах из парных уголков близкие радиусы инерции ($i_x \approx i_y$) имеют неравнополочные уголки, поставленные большими полками вместе (рис. г). Если расчетная длина в плоскости фермы в два раза меньше, чем из плоскости (например, при наличии шпренгеля), рационально сечение из неравнополочных уголков, составленных вместе малыми полками (рис. д), так как в этом случае $i_y \approx 2i_x$.

Стержни тяжелых ферм отличаются от легких более мощными и развитыми сечениями, составленными из нескольких элементов (рис.).

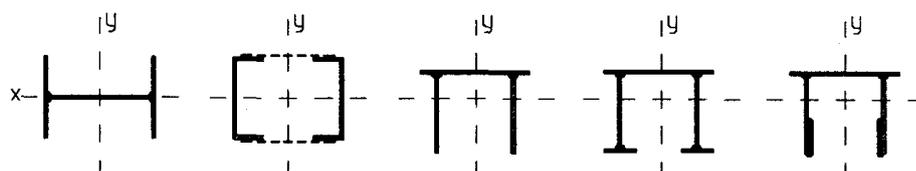


Рис. Типы сечений элементов тяжелых ферм

Расчет ферм

Рекомендуется определять усилия в стержнях ферм отдельно для каждого вида нагрузки. Так, в стропильных фермах усилия следует определять для следующих нагрузок:

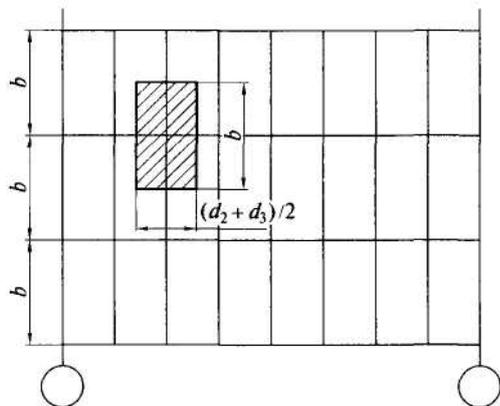
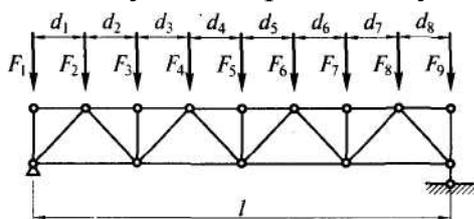


Рис. 9.13. Расчетная схема фермы

постоянной, в которую входит собственная масса фермы и всей поддерживаемой конструкции (кровли с утеплением, фонарей и т.п.);

временной — нагрузки от подвешенного подъемно-транспортного оборудования, полезной нагрузки, действующей на подвешенное к ферме чердачное перекрытие, и т.п.;

кратковременной (например, атмосферной) — снег, ветер.

Расчетная постоянная нагрузка, действующая на любой узел стропильной фермы, зависит от грузовой площади, с которой она собирается (заштрихована), и

определяется по формуле:

$$F_{gi} = (g_{\text{ф}} + g_{\text{кр}} / \cos \alpha) b [(d_{i-1} + d_i) / 2] \gamma_g$$

где $g_{\text{ф}}$ — собственная масса фермы и связей, кН/м^2 горизонтальной проекции кровли;

$g_{\text{кр}}$ — масса кровли, кН/м^2 ;

α — угол наклона верхнего пояса к горизонту;

b — расстояние между фермами;

d_{i-1}, d_i — примыкающие к узлу панели;

γ_g — коэффициент надежности для постоянных нагрузок.

Расчетную узловую нагрузку от снега определяют по формуле:

$$F_{si} = S_g b [(d_{i-1} + d_i) / 2]$$

где S_g — масса снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной проекции кровли.

Расчет ферм обычно выполняют на ЭВМ, что позволяет рассчитать любую схему фермы на статические и динамические нагрузки с учетом, если надо, моментов от жесткости узлов и смещения осей стержней.

Определение расчетной длины стержней фермы

Несущая способность сжатых элементов зависит от их расчетной длины:

$$l_{\text{ef}} = \mu \cdot l, \quad (1)$$

где μ — коэффициент приведения длины, зависящий от способа закрепления концов стержня;

l — геометрическая длина стержня (расстояние между центрами узлов или точками закрепления от смещения).

Заранее мы не знаем, в каком направлении произойдет выпучивание

стержня при потере устойчивости: в плоскости фермы или в перпендикулярном направлении. Поэтому для сжатых элементов необходимо знать расчетные длины и проверить устойчивость в обоих направлениях. Гибкие растянутые стержни могут провисать под действием собственного веса, их легко повредить при транспортировке и монтаже, а при действии динамических нагрузок они могут вибрировать, поэтому их гибкость ограничена. Для проверки гибкости необходимо знать и расчетную длину растянутых стержней.

На примере стропильной фермы производственного здания с фонарем (рис.) рассмотрим приемы определения расчетных длин. Возможное искривление поясов фермы при потере устойчивости в ее плоскости может произойти между узлами (рис. а).

Поэтому расчетная длина пояса в плоскости фермы равна расстоянию между центрами узлов ($\mu = 1$). Форма потери устойчивости из плоскости фермы зависит от того, в каких точках пояс закреплен от смещения. Если по верхнему поясу уложены жесткие металлические или железобетонные панели, приваренные или закрепленные к поясу на болтах, то ширина этих панелей (как правило, равная расстоянию между узлами) и определяет расчетную длину пояса. Если в качестве кровельного покрытия используется профилированный настил, прикрепленный непосредственно к поясу, то пояс закреплен от потери устойчивости по всей длине. При кровле по прогонам расчетная длина пояса из плоскости фермы равна расстоянию между прогонами, закрепленными от смещения в горизонтальной плоскости. Если прогоны не закрепили связями, то они не могут препятствовать смещению пояса фермы и расчетная длина пояса будет равна всему пролету фермы. Для того чтобы прогоны обеспечивали закрепление пояса, необходимо поставить горизонтальные связи (рис. б) и связать с ними прогоны. На участке покрытия под фонарем необходимо поставить распорки.

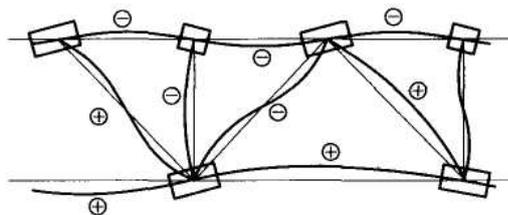


Рис. 9.14. Схема деформаций стержней при потере устойчивости сжатого стержня

а - деформации верхнего пояса при потере устойчивости в плоскости фермы;
б, в - то же, из плоскости фермы; г - деформации решетки

Рис. К определению расчетных длин элементов ферм

Таким образом, расчетная длина пояса из плоскости фермы в общем случае равна расстоянию между точками, закрепленными от смещения. Элементами, закрепляющими пояс, могут служить кровельные панели, прогоны, связи и распорки. В процессе монтажа, когда элементы кровли еще не установлены для закрепления фермы, из их плоскости могут использоваться временные связи или распорки.

При определении расчетной длины элементов решетки можно учесть жесткость узлов. При потере устойчивости сжатый элемент стремится повер-

нуть узел (рис.г). Примыкающие к этому узлу стержни сопротивляются изгибу. Наибольшее сопротивление повороту узла оказывают растянутые стержни, поскольку их деформация от изгиба ведет к сокращению расстояния между узлами, между тем как от основного усилия это расстояние должно увеличиваться. Сжатые же стержни слабо сопротивляются изгибу, так как деформации от поворота и осевого усилия направлены у них в одну сторону и, кроме того, они сами могут терять устойчивость. Таким образом, чем больше растянутых стержней примыкает к узлу и чем они мощнее, т.е. чем больше их погонная жесткость, тем больше степень защемления рассматриваемого стержня и меньше его расчетная длина. Влиянием сжатых стержней на защемление можно пренебречь.

Сжатый пояс слабо защемлен в узлах, поскольку погонная жесткость растянутых элементов решетки, примыкающих к узлу, невелика. Поэтому при определении расчетной длины поясов мы не учитывали жесткость узлов. Аналогично и для опорных раскосов и стоек. Для них расчетные длины, как и для поясов, равны геометрической, т.е. расстоянию между центрами узлов.

Для прочих элементов решетки принимается следующая схема. В узлах верхнего пояса большинство элементов сжаты и мера защемления мала. Эти узлы можно считать шарнирными. В узлах нижнего пояса большинство сходящихся в узле элементов растянуты. Эти узлы являются упруго защемленными.

Степень защемления зависит не только от знака усилий стержней, примыкающих к сжатому элементу, но и от конструкции узла. При наличии фасонки, ужесточающей узел, защемление больше, поэтому, согласно нормам, в фермах с узловыми фасонками (например, из парных уголков) расчетная длина в плоскости фермы равна $0,8 \cdot l$, а в фермах с примыканием элементов впритык, без узловых фасонок - $0,9 \cdot l$.

При потере устойчивости из плоскости фермы степень защемления зависит от крутильной жесткости поясов. Фасонки из своей плоскости гибкие и могут рассматриваться как листовые шарниры. Поэтому в фермах с узлами на фасонках расчетная длина элементов решетки равна расстоянию между узлами l_1 . В фермах с поясами из замкнутых профилей (круглых или прямоугольных труб), имеющих высокую крутильную жесткость, коэффициент приведения расчетной длины может быть принят равным 0,9.

В таблице приведены расчетные длины элементов для наиболее распространенных случаев плоских ферм.

Таблица - Расчетные длины элементов ферм

Направление потери устойчивости	Расчетная длина l_{ef}	
	поясов, опорных раскосов и	прочих элементов решетки

1. В плоскости фермы: а) для ферм, кроме указанных в поз. 1,б б) для ферм из одиночных уголков и ферм с прикреплением элементов решетки к поясам впритык	l	$0,8 \cdot l$ $0,9 \cdot l$
2. Из плоскости фермы: а) для ферм, кроме указанных в поз. 2,б б) для ферм с поясами из замкнутых профилей с прикреплением элементов решетки к поясам впритык	l_1 l_1	l_1 $0,9 \cdot l_1$

Примечание. l - геометрическая длина элемента (расстояние между центрами узлов); l_1 - расстояние между центрами узлов, закрепленных от смещения из плоскости фермы (поясами ферм, связями, плитами покрытия и т.д.).

Подбор сечения сжатых и растянутых элементов ферм

Подбор сечений сжатых элементов ферм начинается с определения требуемой площади из условия устойчивости

$$\frac{N}{\varphi \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (2)$$

откуда

$$A_{\text{тр}} = \frac{N}{\varphi \cdot R_y \cdot \gamma_c}.$$

1) Предварительно можно принять для поясов легких ферм $\lambda = 60 - 90$ и для решетки $\lambda = 100 - 120$. Большие значения гибкости принимаются при меньших усилиях.

2) По требуемой площади подбирают из сортамента подходящий профиль, определяют его фактические геометрические характеристики A , i_x , i_y .

3) Находят $\lambda_x = l_x/i_x$ и $\lambda_y = l_y/i_y$, по большей гибкости уточняют коэффициент φ .

4) Делают проверку устойчивости по формуле (2).

Если гибкость стержня предварительно была задана неправильно и проверка показала перенапряжение или значительное (больше 5-10 %) недонапряжение, то проводят корректировку сечения, принимая промежуточное между предварительно заданной и фактической значение гибкости. Обычно второе приближение достигает цели.

Примечание. Местную устойчивость сжатых элементов, выполненных из прокатных сечений, можно считать обеспеченной, поскольку из условий прокатки толщина полок и стенок профилей больше, чем требуется из условий устойчивости.

При выборе типа профилей нужно помнить, что рациональным является сечение, имеющее одинаковые гибкости как в плоскости, так и из плоскости фермы (принцип равноустойчивости), поэтому при назначении профилей

необходимо обратить внимание на соотношение расчетных длин. Например, если проектируем ферму из уголков и расчетные длины элемента в плоскости и из плоскости одинаковы, то рационально выбрать неравнополочные уголки и поставить их большими полками вместе, так как в этом случае $i_x \approx i_y$, и при $l_x = l_y$ $\lambda_x \approx \lambda_y$. Если расчетная длина из плоскости l_y в два раза больше расчетной длины в плоскости l_x (например, верхний пояс на участке под фонарем), то более рациональным будет сечение из двух неравнополочных уголков, поставленных вместе малыми полками, так как в этом случае $i_x \approx 0,5 \cdot i_y$ и при $l_x = 0,5 \cdot l_y$ $\lambda_x \approx \lambda_y$. Для элементов решетки при $l_x = 0,8 \cdot l_y$ наиболее рациональным будет сечение из равнополочных уголков. Для поясов ферм лучше запроектировать сечение из неравнополочных уголков, поставленных вместе меньшими полками, чтобы при подъеме фермы обеспечить большую жесткость из плоскости.

Требуемую площадь сечения растянутого стержня фермы определяем по формуле

$$A_{\text{тр}} = \frac{N}{R_y \cdot \gamma_c} \quad (3)$$

Затем по сортаменту выбирают профиль, имеющий ближайшее большее значение площади. Проверка принятого сечения в этом случае не требуется.

Подбор сечения стержней по предельной гибкости

Элементы ферм следует проектировать, как правило, из жестких стержней. Особенно существенное значение жесткость имеет для сжатых элементов, предельное состояние которых определяется потерей устойчивости. Поэтому для сжатых элементов ферм в СНиПе установлены требования по предельной гибкости более жесткие, чем в зарубежных нормативных документах. Предельная гибкость для сжатых элементов ферм и связей зависит от назначения стержня и степени его загруженности: $\frac{N}{\varphi \cdot R_y \cdot \gamma_c}$, где N - расчетное усилие,

$\varphi \cdot R_y \cdot \gamma_c$ - несущая способность.

Растянутые стержни также не должны быть слишком гибкими, особенно при воздействии динамических нагрузок. При статических нагрузках гибкость растянутых элементов ограничивается только в вертикальной плоскости. Если растянутые элементы предварительно напряжены, то их гибкость не ограничивается.

Ряд стержней легких ферм имеют незначительные усилия и, следовательно, небольшие напряжения. Сечения этих стержней подбирают по предельной гибкости. К таким стержням обычно относят дополнительные стойки в треугольной решетке, раскосы в средних панелях ферм, элементы связей и т.п.

Зная расчетную длину стержня l_{ef} и значение предельной гибкости $\lambda_{\text{пр}}$, определяем требуемый радиус инерции $i_{\text{тр}} = l_{\text{ef}} / \lambda_{\text{пр}}$. По нему в сортаменте выбираем сечение, имеющее наименьшую площадь.