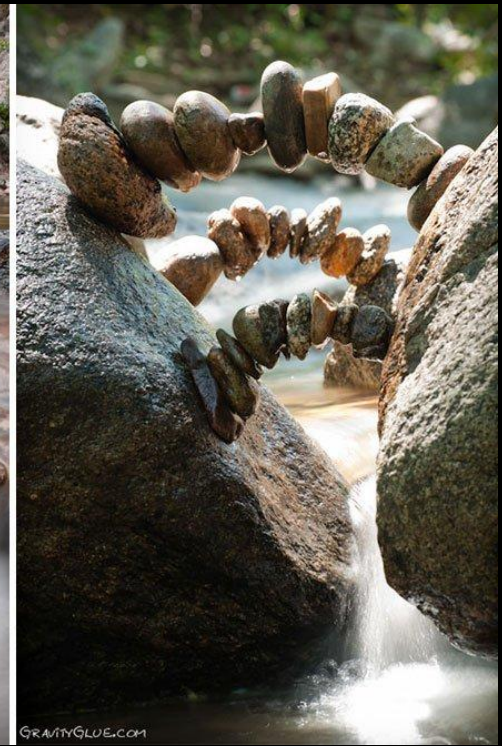


Преподаватель
Юдина Евгения Васильевна

Расчет ферм



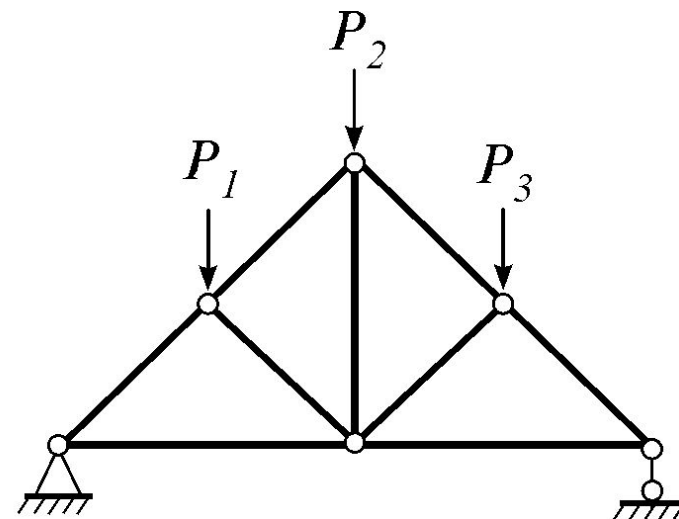
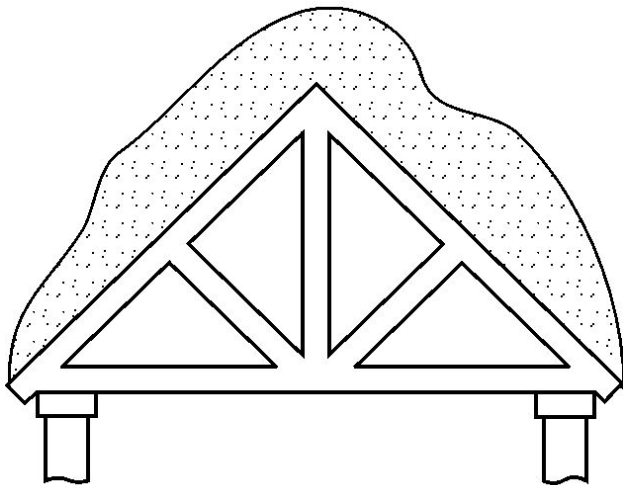
Определение усилий и подбор сечений элементов

ФЕРМА



Ферма – это геометрически неизменяемая система, состоящая из прямых стержней, соединенных по концам жестко или шарнирно.

Замена жестких узлов шарнирами превращает их в шарнирную ферму. При узловой нагрузке стержни шарнирной фермы работают на растяжение или сжатие.



ФЕРМА

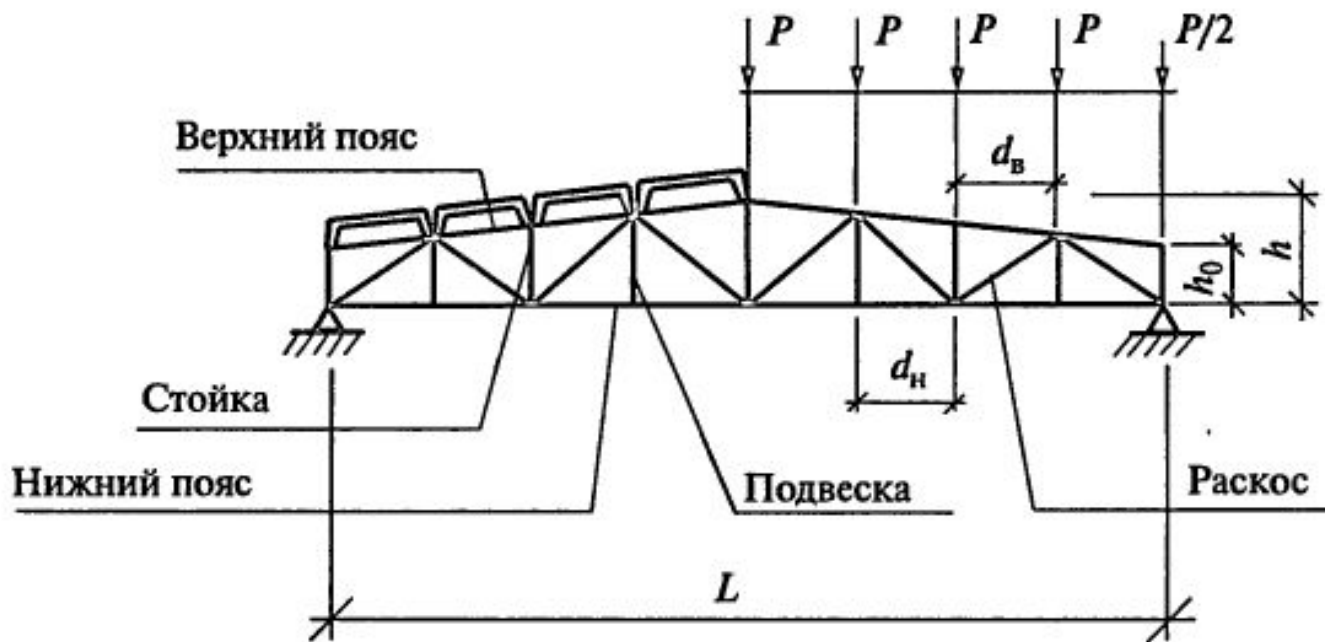
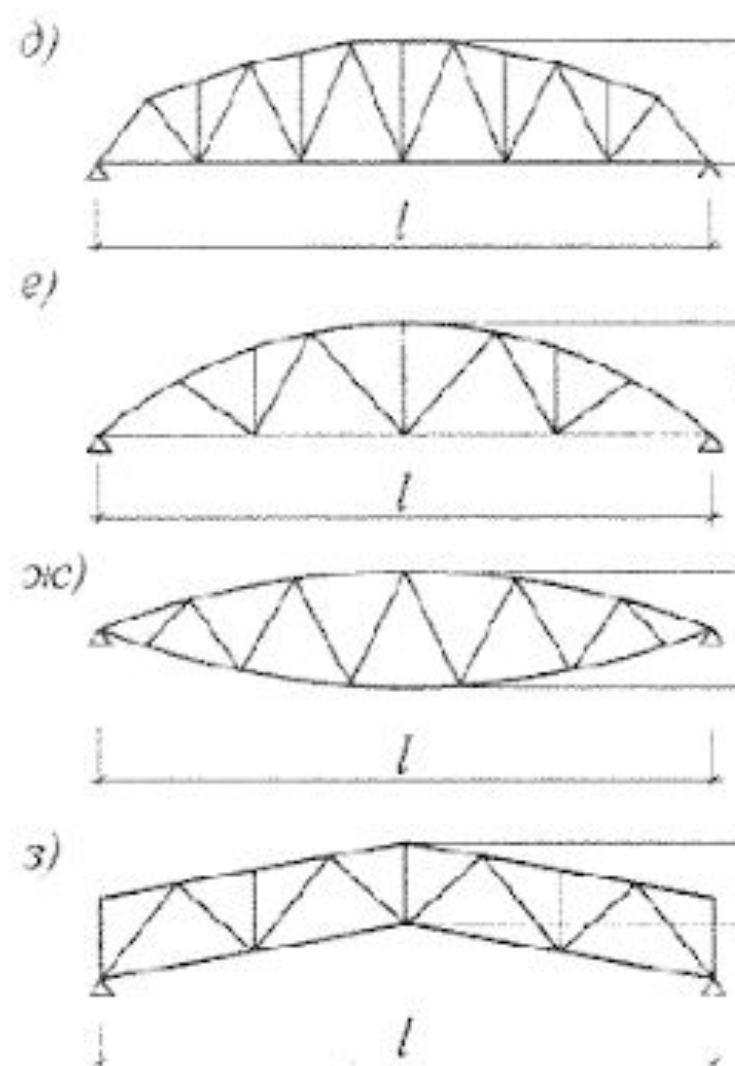
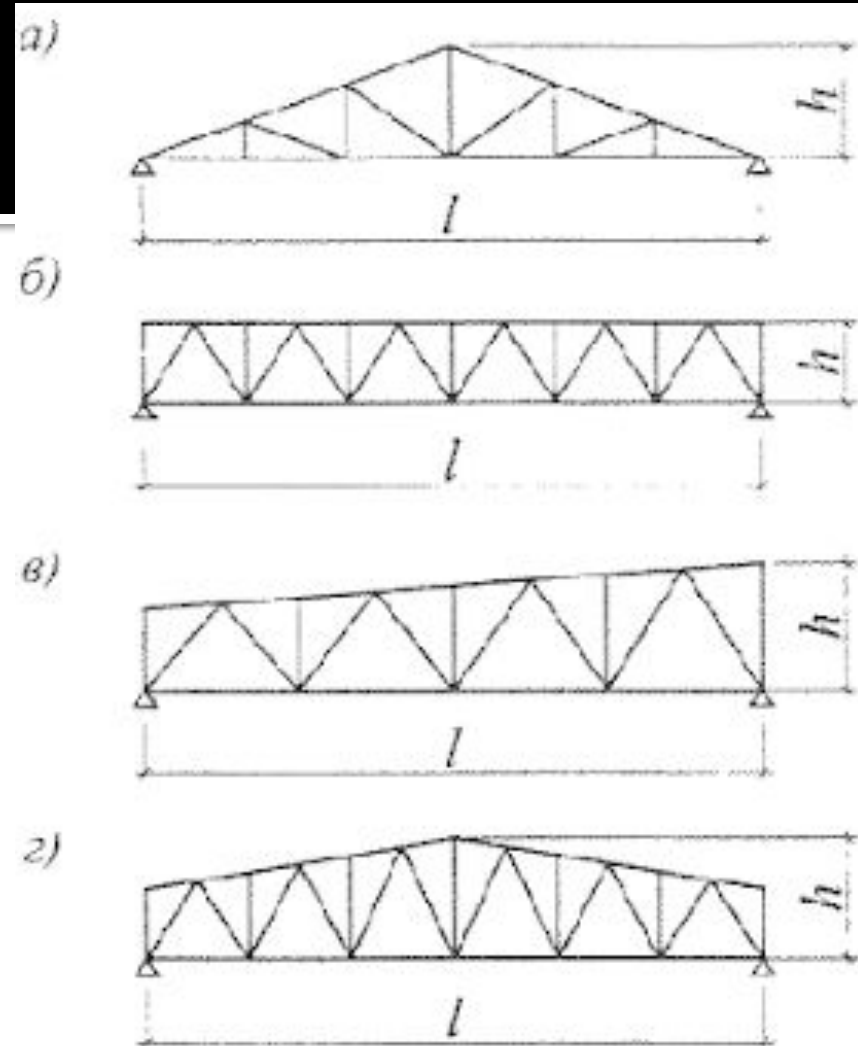


Рис. 9.1. Элементы фермы и генеральные размеры



а — треугольная; б, в — четырехугольная с параллельными и непараллельными поясами; г — пятиугольная (трапециевидная); д — многоугольная (полигональная); е — сегментная (арочная); ж — линзообразная (рыбчатая); з — вварушенная

Порядок расчета



1. Находим нагрузку от покрытия
2. Прикладываем нагрузку в узлы фермы
3. Считаем ферму, получаем эпюры усилий N (тс) в элементах фермы
4. Подбираем сечение поясов, раскосов, стоек фермы по полученным усилиям
5. Унифицируем сечения

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

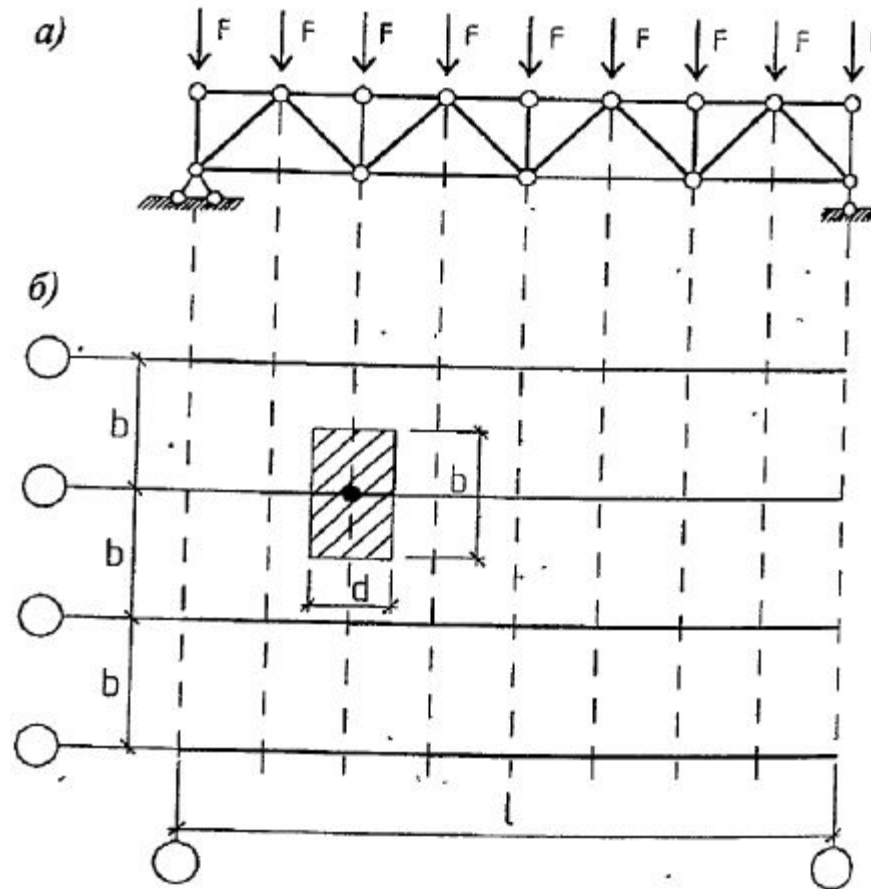
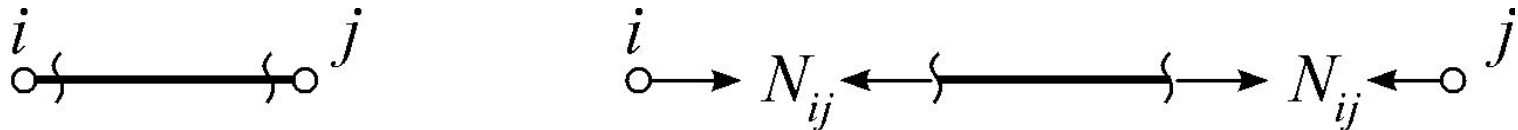


Рис. 7.10. Расчетная схема фермы (а) и определение узловых нагрузок (б)

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

Вследствие принятой расчетной схемы в стержнях фермы моменты и поперечные силы отсутствуют, действуют только продольные усилия.

Положительное (растягивающее) усилие N_{ij} в стержне фермы между узлами i и j следует направить в сторону от шарнира:



При расчете простых ферм используются методы:

- вырезания узлов,
- сквозных сечений,
- совместных сечений,
- замены стержней и др.

Рассмотрим два из них.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

метод вырезания узлов

Основан на последовательном вырезании и рассмотрении равновесия узлов фермы.

В этом способе необходимо установить порядок вырезания узлов.

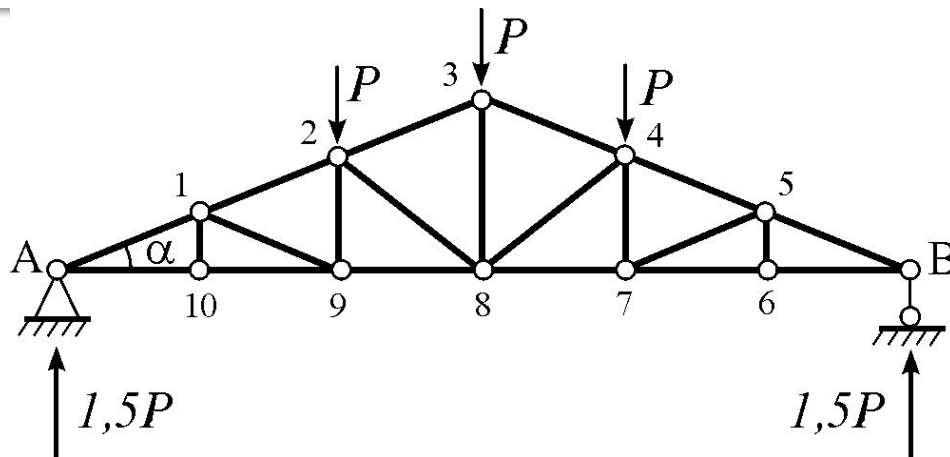
Сущность метода:

- 1) вырезается узел, в котором не более двух неизвестных; составляются уравнения равновесия $\sum X=0$ и $\sum Y=0$;
- 2) из них определяются два неизвестных продольных усилия. После этого можно вырезать следующий узел и продолжить расчет.

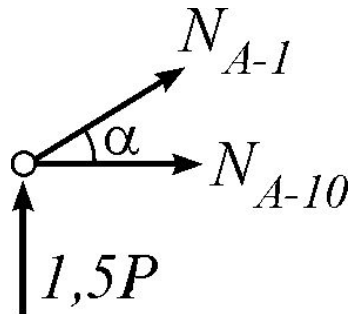
В этом способе необходимо установить порядок вырезания узлов.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

метод вырезания узлов



Вначале вырежем узел А и запишем два уравнения равновесия:



$$\Sigma X = N_{A-10} + N_{A-1} \cos \alpha = 0;$$

$$\Sigma Y = N_{A-1} \sin \alpha + 1,5P = 0.$$

Из них определяем:

$$N_{A-1} = -1,5P / \sin \alpha; \quad N_{A-10} = 1,5P / \operatorname{tg} \alpha.$$

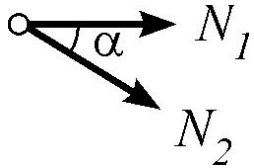
После этого можно вырезать узлы 10, 1, 9, 2, 3, 8, 4, 7, 6, 5.

У метода вырезания узлов **есть один недостаток**: ошибка (неточность), допущенная при расчете одного узла, влияет на последующие вычисления. Поэтому полученные результаты надо контролировать.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

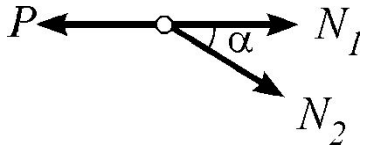
метод вырезания узлов

Из этого метода вытекают некоторые частные случаи (*признаки*) :



1. Если в узле сходятся два стержня и внешняя нагрузка не приложена, то оба усилия равны нулю:

$$N_1 = N_2 = 0.$$



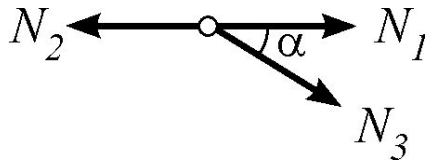
2. Если в узле сходятся два стержня, а внешняя нагрузка действует в направлении одного стержня,

$$N_1 = P, N_2 = 0.$$

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

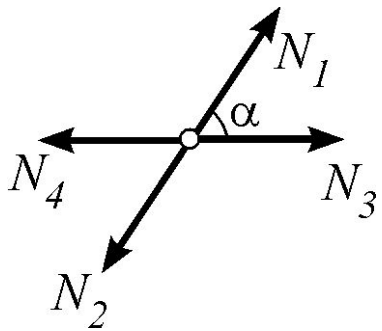
метод вырезания узлов

Из этого метода вытекают некоторые ЧАСТНЫЕ случаи (*признаки*):



3. Если в трехстержневом узле два стержня лежат на одной прямой, а внешней нагрузки нет,

$$N_1 = N_2, N_3 = 0.$$



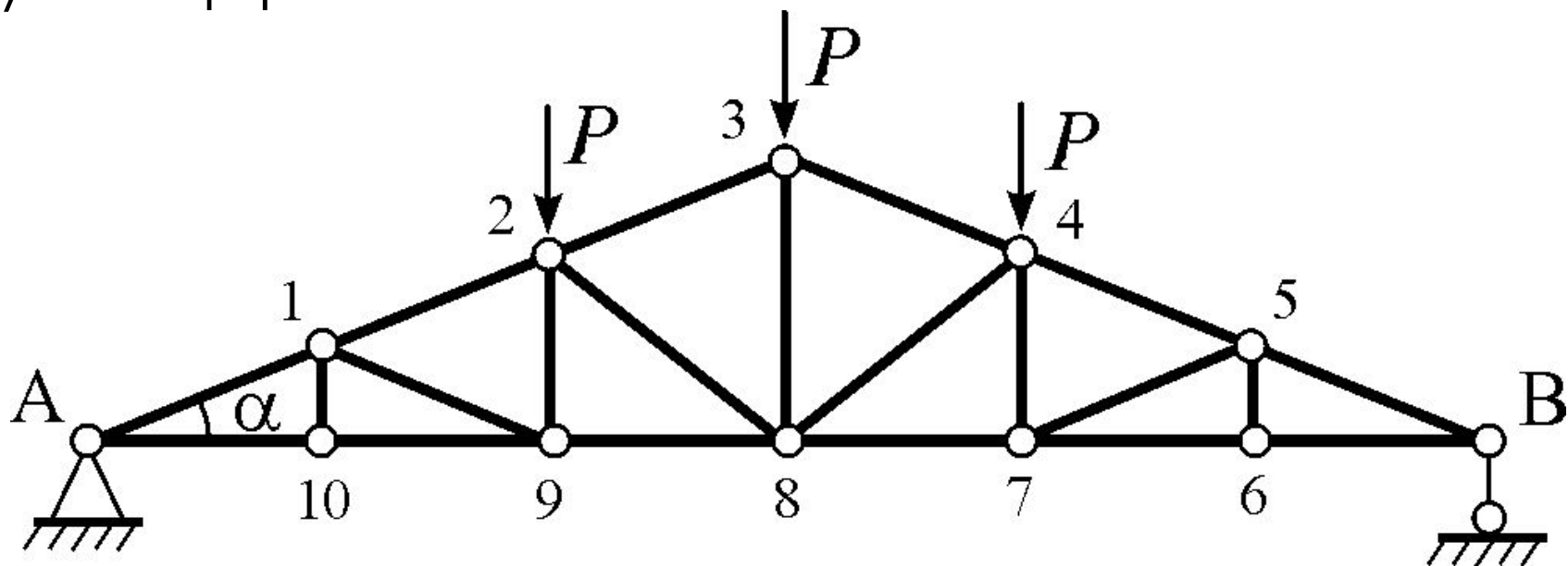
4. Если в четырехстержневом узле стержни попарно лежат на одной прямой, а внешней нагрузки нет, то усилия также попарно равны между собой:

$$N_1 = N_2, N_3 = N_4.$$

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

метод вырезания узлов

Используя эти признаки, легко определяются некоторые усилия фермы:



– по 2-му признаку:

$$N_{1-10} = N_{1-9} = N_{2-9} = 0, \quad N_{5-6} = N_{5-7} = N_{4-7} = 0.$$

– по 3-му признаку:

$$N_{A-10} = N_{9-10} = N_{8-9}, \quad N_{B-6} = N_{6-7} = N_{7-8}, \quad N_{A-1} = N_{1-2}, \quad N_{B-5} = N_{4-5}.$$

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

МЕТОД СКВОЗНЫХ СЕЧЕНИЙ

Позволяет определять усилие в стержне лишь из одного уравнения.

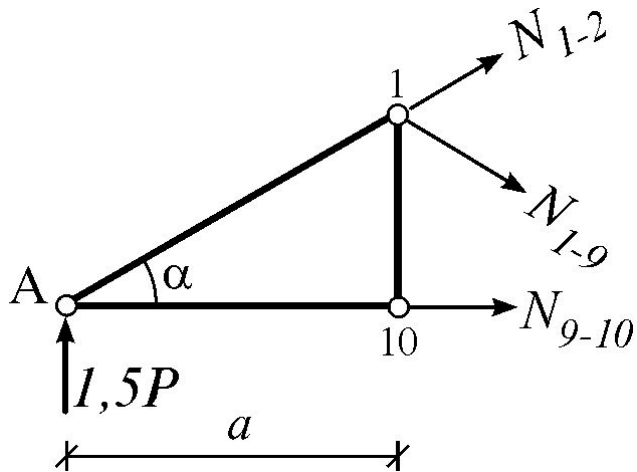
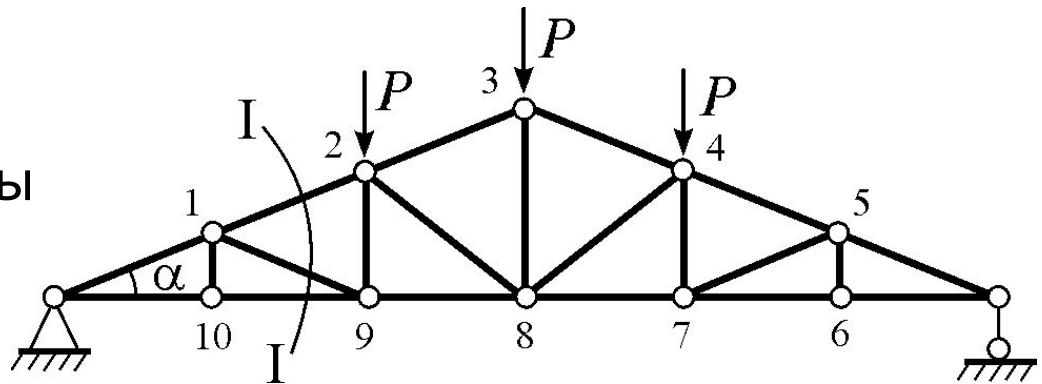
Сущность метода:

- 1) поперек фермы проводится такое сквозное сечение, чтобы появилось не более трех неизвестных усилий;
- 2) в точке пересечения направлений двух из них составляется уравнение момента;
- 3) из этого уравнения определяется третье усилие.

Точка составления уравнения момента называется *моментной точкой*.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ МЕТОД СКВОЗНЫХ СЕЧЕНИЙ

Например, поперек фермы
проведем сечение $I-I$:



Из равновесия левой части
(точка **1** – моментная точка) имеем:

$$\sum M_1 = N_{9-10} \cdot \frac{a}{3} - 1,5P \cdot a = 0.$$

Отсюда $N_{9-10} = 4,5P$.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРМЫ

МЕТОД СКВОЗНЫХ СЕЧЕНИЙ

Когда два стержня параллельны, моментной точки нет.

В таком случае надо составлять уравнение проекции на ось, перпендикулярную этим параллельным стержням.

У метода сквозных сечений **есть один недостаток**: иногда не удастся провести сквозное сечение так, чтобы появились только три неизвестные.

В таком случае одно из усилий необходимо определить заранее.

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Характеристики материала



- Назначаем сталь см. табл. В.3

СП 16.13330.2017

- Выписываем расчетное сопротивление по пределу текучести

$$R_y (C345) = R_{yn} / \gamma_m = 3450 / 1.025 = 3366 \text{ кгс/см}^2$$

- Модуль упругости

$E = 210000 \text{ МПа} = 2140 \text{ т/см}^2$

(СП 16.13330.2017 Приложение Б)

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ



Два вида стержней:

1. Растянутые

$$A_n = \frac{N}{R_y \gamma_c};$$

2. Сжатые

$$A = \frac{N}{\varphi R_y \gamma_c}.$$

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Растянутые стержни



- Определить требуемую площадь растянутого элемента
- Подобрать по сортаменту профиль (ближайшее большее значение площади)
- Проверка принятого сечения не требуется

$$A_n = \frac{N}{R_y \gamma_c};$$

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Растянутые стержни



Пример 7.2. Требуется подобрать сечение растянутого раскоса фермы по расчетному усилию $N = 535 \text{ кН}$; сталь С245; $R_y = 24 \text{ кН / см}^2$; $\gamma_c = 0,95$.

Требуемая площадь сечения: $A_{\text{тр}} = \frac{535}{24 \cdot 0,95} = 23,5 \text{ см}^2$. Принимаем два равнополочных уголка 90×7 ; $A = 12,3 \times 2 = 24,6 \text{ см}^2 > A_{\text{тр}}$.

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Сжатые стержни



Несущая способность
сжатых стержней
зависит от их
расчетной длины:

$$l_0 = \mu l,$$

Подбор сечений Сжатые стержни



Расчетная длина l_0 : $l_0 = \mu l$,

l – геометрическая длина стержня
 μ - коэффициент, зависящий от
способов закрепления концов
стержня

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Сжатые стержни



Таблица 30

| | | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|
| Схема закрепления колонны (стойки) и вид нагрузки | | | | | | | | |
| μ | 1,0 | 0,7 | 0,5 | 2,0 | 1,0 | 2,0 | 0,725 | 1,12 |

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Сжатые стержни

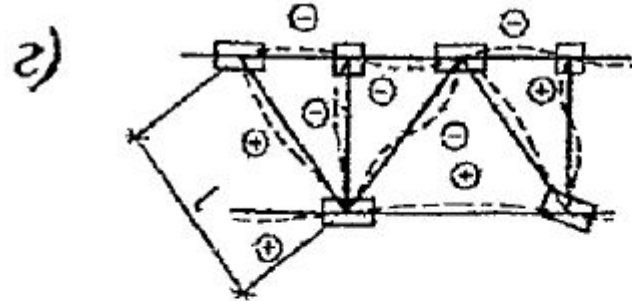
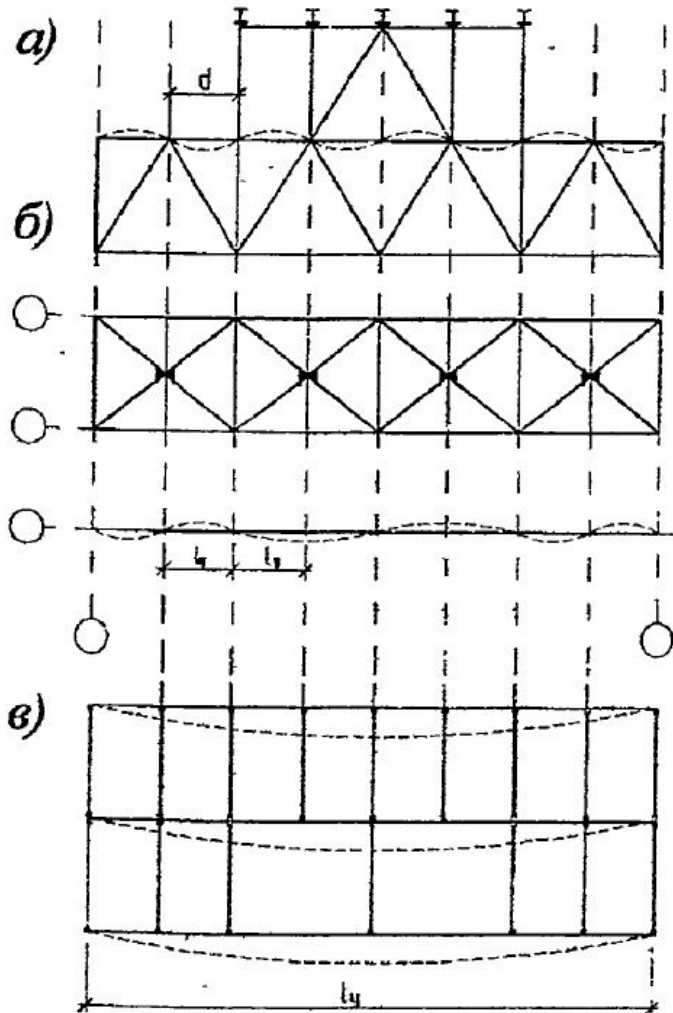


Рис. 7.12. К определению расчетных длин элементов ферм:

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

Подбор сечений Сжатые стержни

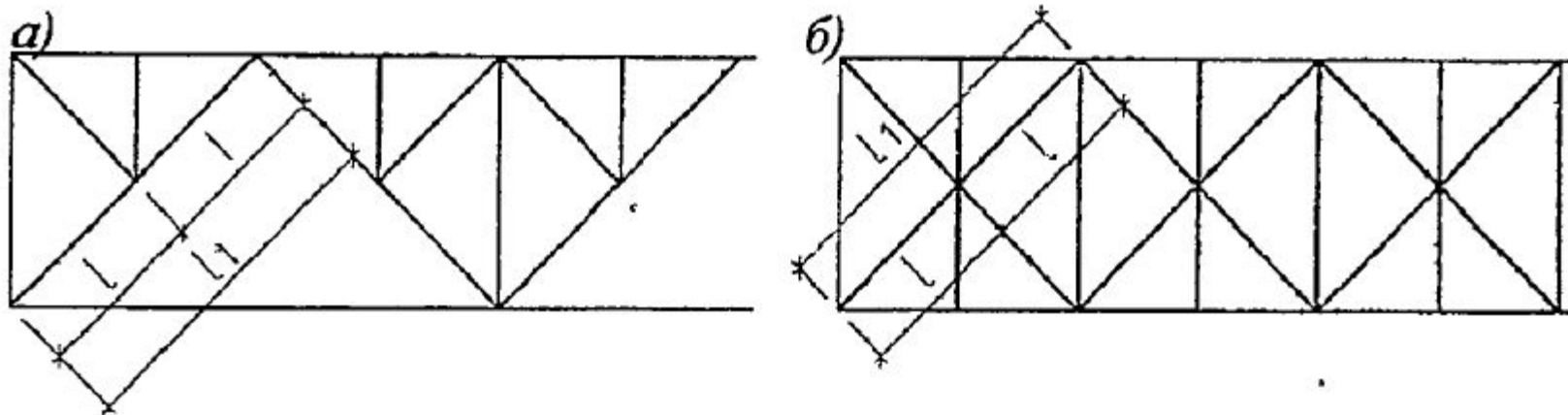


Рис. 7.13. Определение расчетной длины элементов шпренгельной (а) и крестовой (б) решеток

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Сжатые стержни



Таблица 7.1. Расчетные длины элементов ферм

| Направление потери устойчивости | Расчетная длина l_{ef} | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------|
| | поясов, опорных раскосов и стоек | прочих элементов решет- ки |
| 1. В плоскости фермы: а) для ферм, кроме ука- занных в поз. 1,б б) для ферм из одиноч- ных уголков и ферм с при- креплением элементов ре- шетки к поясам впритык | l | $0,8l$ |
| | l | $0,9l$ |
| 2. Из плоскости фермы: а) для ферм, кроме ука- занных 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 | $0,9l_1$ |

П р и м е ч а н и е. 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 сечений Сжатые стержни



Таблица 7.2. Расчетные длины из плоскости фермы элементов решетки при промежуточных закреплениях

| Конструкция узла пересечения решетки | Поддерживающий элемент | | |
|---|------------------------|--------------|----------|
| | растянут | неработающий | сжат |
| Оба элемента не прерываются | l | $0,7l_1$ | l_1 |
| Поддерживающий элемент прерывается и перекрывается фасонкой: | | | |
| • рассматриваемый элемент не прерывается | $0,7l_1$ | l_1 | $1,4l_1$ |
| • рассматриваемый элемент прерывается и не перекрывается фасонкой | $0,7l_1$ | - | - |

Примечание. Обозначение см. на рис. 7.13.

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Сжатые стержни



- Назначаем гибкость:
для поясов- $\lambda = 60 - 90$
для решетки- $\lambda = 100 - 120$
- По требуемой площади подбираем по сортаменту профиль
- Определяем его фактические геометрические характеристики
- Находим гибкости $\lambda_x = l_x / i_x$ $\lambda_y = l_y / i_y$
- По большей гибкости уточняем коэффициент Φ
- Проводим проверку подобранного сечения

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Сжатые стержни



Находим ϕ - коэффициент устойчивости при центральном сжатии (принимаем наименьшее):

- По таблице Д.1 СП 16.13330.2017
- Или по формулам 6.32 учебника «Металлические конструкции. Том 1» под ред. В.В. Горев

$$\text{при } 0 < \bar{\lambda} \leq 2,5 \quad \phi = 1 - 0,066\bar{\lambda}\sqrt{\bar{\lambda}};$$

$$\text{при } 2,5 < \bar{\lambda} \leq 4,5 \quad \phi = 1,46 - 0,34\bar{\lambda} + 0,021\bar{\lambda}^2; \quad (6.32)$$

$$\text{при } \bar{\lambda} > 4,5 \quad \phi = 332 / \bar{\lambda}^2 (51 - \bar{\lambda}).$$

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Сжатые стержни



Условная гибкость

$$\bar{\lambda} = \lambda \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}$$

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Сжатые стержни



Пример 7.1. Требуется подобрать сечение сжатого верхнего пояса фермы из двух уголков по расчетному усилию $N=840$ кН. Расчетные длины стержней в плоскости фермы - 3 м; из плоскости - 6 м. Материал - сталь С245; $R_y=24$ кН/см²; $\gamma_c=0,95$ (сжатые элементы стержневых конструкций покрытий при расчетах на устойчивость, приложение 4); толщина фасонки - 12 мм. Поскольку $l_y = 2l_x$, принимаем сечение

из неравнополочных уголков, расположенных узкими полками вместе. Задаемся гибкостью в пределах, рекомендуемых для поясов: $\lambda = 80$; $\varphi = 0,686$; $A_{тр} = \frac{N}{\varphi R_y \gamma_c} =$

$$= \frac{840}{0,686 \cdot 24 \cdot 0,95} = 53,7 \text{ см}^2. \text{ Принимаем сечение из двух уголков } 180 \times 110 \times 10;$$

$A=28,3 \cdot 2=56,6$ см²; $i_x=3,12$ см; $i_y=8,7$ см (следует обратить внимание, что индексы расчетных осей и осей по сортаменту для неравнополочных уголков могут не совпадать):

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

Сжатые стержни



Сечение подобрано неудачно и имеет перенапряжение на 14%. Принимаем гибкость (между предварительно заданной и фактической)

$$\lambda' = 90; \quad \varphi = 0,612; \quad A_{\text{тр}} = \frac{840}{0,612 \cdot 24 \cdot 0,95} = 60 \text{ см}^2.$$

Принимаем два уголка $180 \times 110 \times 12$; $A = 33,7 \cdot 2 = 67,4 \text{ см}^2$; $i_x = 3,1 \text{ см}$, $i_y = 8,75 \text{ см}$;

$$\lambda_x = 300/3,1 = 97 \quad (\lambda_y \text{ не лимитирует сечение}), \quad \varphi = 0,563; \quad \frac{N}{\varphi A R_{y,c}} =$$

$$= \frac{840}{0,563 \cdot 24 \cdot 67,4 \cdot 0,95} = 0,97 < 1, \quad \lambda = 97 < [\lambda] = 120. \text{ Сечение из двух уголков } 180 \times 110 \times 12$$

принято.

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ По предельной гибкости



- Ряд стержней ферм имеют незначительные усилия:
- Дополнительные стойки в треугольной решетке;
 - Раскосы в средних панелях ферм
 - Элементы связей и т.п.

Сечения таких стержней подбирают по предельной гибкости

$$i_{\min} = \frac{L_0}{[\lambda]}$$

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ По предельной гибкости



Таблица 32

| Элементы конструкций | Предельная гибкость сжатых элементов $\lambda_{\text{л}}$ |
|---|---|
| 1 Пояса, опорные раскосы и стойки, передающие опорные реакции: а) плоских ферм, структурных конструкций и пространственных конструкций из труб или парных уголков высотой до 50 м | 180-60 α |
| б) пространственных конструкций из одиночных уголков, а также пространственных конструкций из труб и парных уголков высотой св. 50 м | 120 |
| 2 Элементы, кроме указанных в позициях 1 и 7: | |
| а) плоских ферм, сварных пространственных и структурных конструкций из одиночных уголков, пространственных и структурных конструкций из труб и парных уголков | 210-60 α |
| б) пространственных и структурных конструкций из одиночных уголков с болтовыми соединениями | 220-40 α |
| 3 Верхние пояса ферм, не закрепленные в процессе монтажа (предельную гибкость после завершения монтажа следует принимать по позиции 1) | 220 |
| 4 Основные колонны | 180-60 α |
| 5 Второстепенные колонны (стойки фахверка, фонарей и т.п.), элементы решетки колонн, элементы вертикальных связей между колоннами (ниже балок крановых путей) | 210-60 α |
| 6 Элементы связей, кроме указанных в позиции 5, а также стержни, служащие для уменьшения расчетной длины сжатых стержней, и другие ненагруженные элементы, кроме указанных в позиции 7 | 200 |
| 7 Сжатые и ненагруженные элементы пространственных конструкций таврового и крестового сечений, подверженные воздействию ветровых нагрузок, при проверке гибкости в вертикальной плоскости | 150 |
| <p>Обозначение, принятое в таблице 32:</p> $\alpha = \frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c}$ <p>- коэффициент, принимаемый не менее 0,5 (в соответствующих случаях вместо φ следует принимать φ_g).</p> | |

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ По предельной гибкости



Пример 7.5. Требуется подобрать сечение сжатого раскоса фермы по расчетному усилию $N = 10$ кН. Расчетные длины раскоса $l_x = 3,2$ м; $l_y = 4,0$ м. Материал - сталь С245.

Поскольку усилие в элементе мало, определим его сечения по предельной гибкости. В соответствии с табл. П9.1 для сжатого раскоса фермы $[\lambda] = 210 - 60\alpha$. Примем $\alpha = 0,5$, тогда $[\lambda] = 180$. Требуемые радиусы инерции $i_x = \frac{l_x}{[\lambda]} = \frac{320}{180} = 1,78$ см ;

$$i_y = \frac{l_y}{[\lambda]} = \frac{400}{180} = 2,22 \text{ см.}$$

Принимаем сечение из двух уголков 63×5 ; $i_x = 1,94$ см; $i_y = 3,04$ см ;

$$A = 2 \times 6,13 = 12,26 \text{ см}^2 ; \lambda_{\max} = 320 / 1,94 = 165 < [\lambda] = 180; \varphi = 0,23;$$

$$\frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c} = \frac{10}{0,23 \cdot 12,26 \cdot 24 \cdot 0,95} = 0,16 \ll 1 .$$

Сечение удовлетворяет условиям устойчивости и предельной гибкости.

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ



Расчетные сечения стержней фермы

| Номер элемента | Расчетное усилие, N, кН | Сечение | Площадь, A, см ² | Радиус инерции, см | | Расчетная длина, см | | λ_{max} | Ω | φ_{min} | γ_c | Проверка сечения | |
|----------------|-------------------------|---------------|-----------------------------|--------------------|-------|---------------------|-----------|-----------------|----------|-----------------|------------|--|--|
| | | | | i_x | i_y | l_{efx} | l_{efy} | | | | | $N/A \leq R_c / \gamma_c$ | $N/A \leq \varphi R_c / \gamma_c$ |
| | | | | | | | | | | | | | |
| B20 | +192,4 | ГГ 56x36x5 | 8,82 | 1,77 | 1,55 | 280 | 280 | 158 | 400 | - | 0,95 | $192,4/8,82 = 21,81 < 27 \cdot 0,95 = 25,65$ | - |
| B21 | -972,5 | ГГ 180x110x10 | 56,66 | 5,8 | 4,42 | 300 | 300 | 52 | 120 | 0,832 | 0,95 | - | $972,5/0,832 \cdot 56,66 = 20,38 < 27 \cdot 0,95 = 25,65$ |
| B22 | -972,5 | ГГ 180x110x10 | 56,66 | 5,8 | 4,42 | 300 | 300 | 52 | 120 | 0,832 | 0,95 | - | $972,5/0,832 \cdot 56,66 = 20,63 < 27 \cdot 0,95 = 25,65$ |
| B23 | -1475,8 | ГГ 200x125x14 | 87,74 | 6,41 | 5,2 | 300 | 300 | 47 | 120 | 0,816 | 0,95 | - | $1475,8/0,816 \cdot 87,74 = 20,61 < 27 \cdot 0,95 = 25,65$ |
| B24 | -1475,8 | ГГ 200x125x14 | 87,74 | 6,41 | 5,2 | 300 | 300 | 47 | 120 | 0,816 | 0,95 | - | $1475,8/0,816 \cdot 87,74 = 20,61 < 27 \cdot 0,95 = 25,65$ |
| B25 | -1612,1 | ГГ 200x125x14 | 87,74 | 6,41 | 5,2 | 300 | 300 | 47 | 120 | 0,816 | 0,95 | - | $1612,1/0,816 \cdot 87,74 = 22,52 < 27 \cdot 0,95 = 25,65$ |
| B26 | -1612,1 | ГГ 200x125x14 | 87,74 | 6,41 | 5,2 | 300 | 300 | 47 | 120 | 0,816 | 0,95 | - | $1612,1/0,816 \cdot 87,74 = 22,52 < 27 \cdot 0,95 = 25,65$ |
| B27 | -1475,8 | ГГ 200x125x14 | 87,74 | 6,41 | 5,2 | 300 | 300 | 47 | 120 | 0,816 | 0,95 | - | $1475,8/0,816 \cdot 87,74 = 20,61 < 27 \cdot 0,95 = 25,65$ |

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

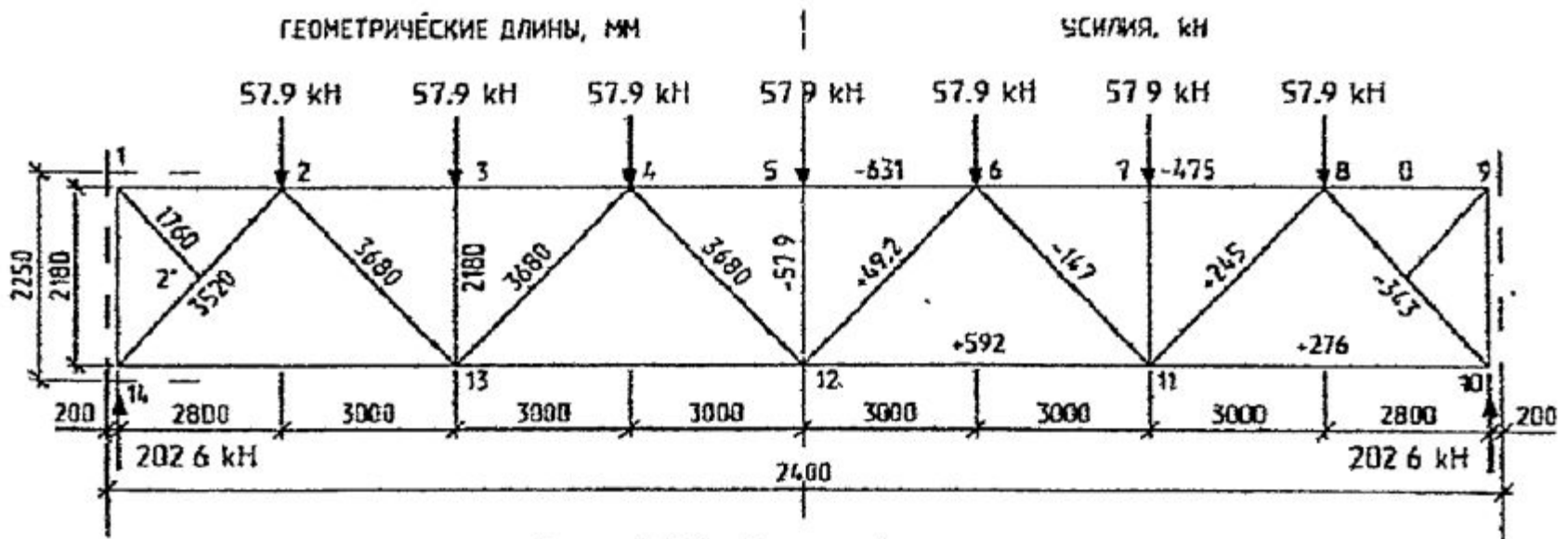


Рис. 7.29. Схема фермы

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

