

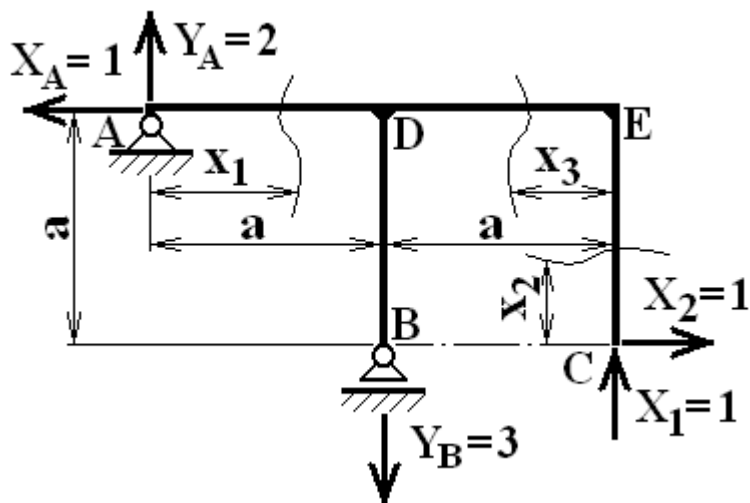
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИМЕРОВ»

Кафедра основ конструирования машин

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ РАМЫ

Методические указания
для выполнения курсовой работы



Санкт-Петербург
2014

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ РАМЫ: методические указания для выполнения курсовой работы / сост.: П. В. Кауров, Я. М. Фераро; СПбГТУРП. – СПб., 2014. – 20 с.

Целью настоящих методических указаний является развитие навыков самостоятельного расчета статически неопределимых рам методом сил.

Методические указания содержат общие требования к выполнению курсовой работы, краткие сведения по теории, варианты заданий и пример расчета.

Предназначаются для студентов механических специальностей дневной формы обучения, выполняющих курсовую работу по сопротивлению материалов.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой основ конструирования машин СПбГТУРП (протокол № 1 от 02.09.2014 г.).

Утверждены к изданию методической комиссией факультета механики автоматизированных производств СПбГТУРП (протокол № 1 от 11.09.2014 г.).

Рецензент:

зав. кафедрой инженерной графики и автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, канд. техн. наук, профессор И. А. Шумейко.

Редактор и корректор В. А. Басова

Техн. редактор Л. Я. Титова

Темплан 2014 г., поз. 90.

Подп. к печати 30.09.14. Формат 60×84/16. Бумага тип. №1. Печать офсетная. Печ. л. 1,25. Уч.- изд. л. 1,25. Тираж 100 экз. Изд № 90. Цена "С". Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, СПб., 198095, ул. Ивана Черных, 4.

© Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Студенты дневной формы обучения, изучающие курс сопротивления материалов, выполняют курсовую работу "Расчет статически неопределимой рамы методом сил". Выполнение курсовой работы прививает студентам навыки самостоятельной творческой работы, рационализации, пользования справочной литературой и таблицами, а также навыки выполнения расчётов и составления расчётно-пояснительной записки

Работа выполняется согласно трехзначному шифру, получаемому студентом от преподавателя, ведущего практические занятия в группе.

Первая цифра шифра указывает схему сечения по рис. 10. Заданная схема состоит из нескольких стержней с постоянной изгибной жесткостью **EJ**, длина каждого участка стержня равна **a**. Вторая и третья цифры шифра указывают на величину приложенной силы **F** и внешнего изгибающего момента **M** из табл. 1.

Курсовая работа "Расчет статически неопределимой рамы методом сил" должна содержать в себе следующие пункты:

1. Исходные данные.
2. Определение степени статической неопределимости и выбор основной системы.
3. Определение коэффициентов канонических уравнений и их проверка.
4. Определение величин неизвестных усилий.
5. Построение расчетных эпюр.

Работа выполняется на одной стороне стандартного листа формата А4 (210 × 297 мм) вертикального расположения и брошюруется по левому полю бумаги. Текст и выполняемые расчёты пишутся чернилами, рисунки выполняются карандашом с обязательным соблюдением масштаба, который выбирается самостоятельно из соображений наилучшей выразительности чертежа.

На последнем листе работы необходимо привести расчетные схемы и построенные эпюры. Для чертежа на последнем листе работы допускается использование формата А3.

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕОРИИ

1.1. Статически неопределимые системы

Под статически неопределимой системой понимается система, для которой определение внешних реакций и всех внутренних силовых факторов не может быть произведено при помощи уравнений равновесия статики.

По сравнению со статически определимыми системами они имеют дополнительные связи, которые называют "лишними" или избыточными. В балке, показанной на рис. 1, две "лишние" связи.

Усилия в “лишних” связях называются “лишними” неизвестными; их число совпадает с числом “лишних” связей, которое определяет степень статической неопределимости системы.

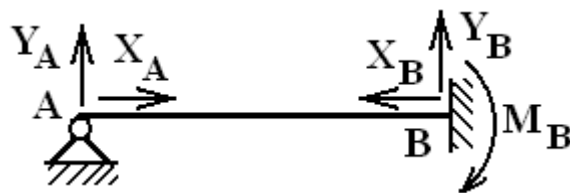


Рис. 1

1.2. Степень статической неопределимости

Степень статической неопределимости можно найти как разность между числом искомых усилий и числом независимых уравнений равновесия статики, которые можно составить для их нахождения. Для балки, показанной на рис. 2, число неизвестных реакций, возникающих под действием внешних нагрузок, равно пяти (Y_A, X_A, Y_B, X_B, M_B), а число уравнений равновесия статики – трем. Следовательно, балка является дважды статически неопределимой системой.

Степень статической неопределимости плоской рамы

$$C_H = O_{\Pi} - 3 + 3 \cdot K - Ш,$$

где O_{Π} – число опорных связей; K – число замкнутых контуров; $Ш$ – число простых шарниров.

Число опорных связей O_{Π} напрямую зависит от типа опорных закреплений в рассматриваемой системе.

При наличии заделки число опорных связей равно трем ($O_{\Pi} = 3$), так как в заделке могут возникать две реакции (вертикальная и горизонтальная) и один реактивный момент.

При наличии шарнирно-неподвижной опоры число опорных связей равно двум ($O_{\Pi} = 2$), так как в шарнирно-неподвижной опоре могут возникать две реакции (вертикальная и горизонтальная).

При наличии шарнирно-подвижной опоры число опорных связей равно единице ($O_{\Pi} = 1$), так как в шарнирно-подвижной опоре может возникнуть только одна реакция, направленная перпендикулярно плоскости, по которой может перемещаться подвижный шарнир.

Следовательно, для рамы, изображенной на рис. 2, при любой внешней нагрузке, общее число опорных связей $O_{\Pi} = 3 + 2 + 1 = 6$, а степень статической неопределимости $C_H = O_{\Pi} - 3 = 6 - 3 = 3$.

Наличие одного простого шарнира понижает степень статической неопределимости на единицу, так как в месте шарнирного соединения стержни могут свободно поворачиваться относительно друг друга, при этом не изгибаясь, т.е. ограничения связью нет, и изгибающий момент на шарнире равен нулю.

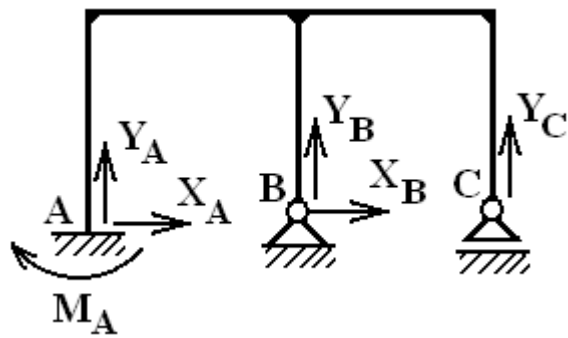


Рис. 2

Таким образом, при наличии простого шарнира в раме определение внешних реакций сводится не только к решению трех уравнений системы статического равновесия тела на плоскости, но и к непосредственному решению составленных уравнений изгибающих моментов на участках, границей которых является простой шарнир, относительно неизвестных реакций, входящих в эти выражения.

Наличие замкнутого контура увеличивает степень статической неопределимости на три, так как при определении в нем внутренних усилий методом сечений необходимо снять дополнительные связи, т. е. позволить сечениям поворачиваться и смещаться в двух направлениях.

Следовательно, для рамы, изображенной на рис. 3, при любой внешней нагрузке, общее число опорных связей $O_{\Pi} = 4$ (Y_A, X_A, Y_B, X_B), число замкнутых контуров $K = 1$ (контур **DEFG**), число простых шарниров $\Pi = 1$ (шарнир **C**), степень статической неопределимости $C_H = O_{\Pi} - 3 + 3 \cdot K - \Pi = 4 - 3 + 3 \cdot 1 - 1 = 3$.

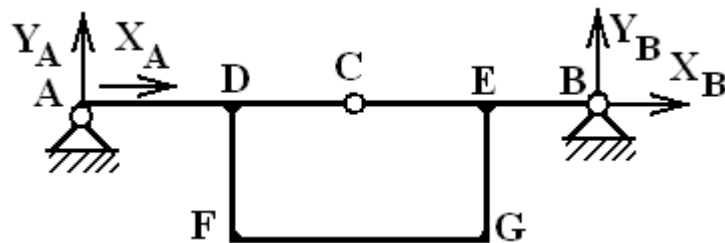


Рис. 3

1.3. Основная система метода сил

В заданной системе отбрасываются “лишние” связи, а вместо них прикладываются “лишние” неизвестные X_1, X_2, \dots, X_n . При отбрасывании “лишних” связей нужно следить за тем, чтобы новая система была геометрически неизменяемой и статически определимой. Геометрически неизменяемой называется такая система, в которой перемещения точек или элементов возможны только за счет деформации стержней. Полученная таким образом статически определимая и геометрически неизменяемая система носит

название основной системы метода сил. Для каждой статически неопределимой системы можно получить несколько различных вариантов основной системы.

На рис. 4б, в, г представлены возможные варианты основной системы для статически неопределимой рамы, изображенной на рис. 4а.

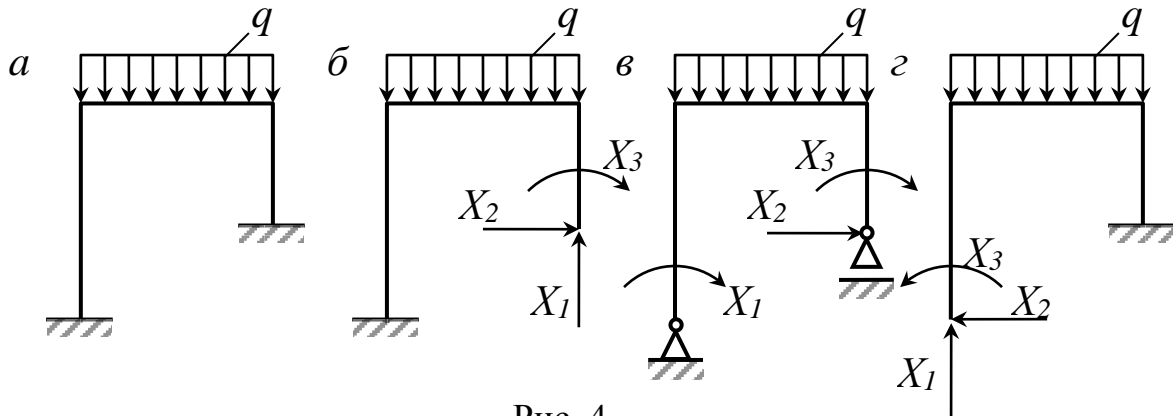


Рис. 4

Для рам, имеющих жесткие закрепления, можно рекомендовать основную систему в виде консоли, рассматривая остальные опорные закрепления как лишние (рис. 4б, г). Исключения составляют симметричные рамы с защемленными концами. Здесь выбор основной системы удобно производить, разрезая раму на две симметричные консоли (рис. 5).

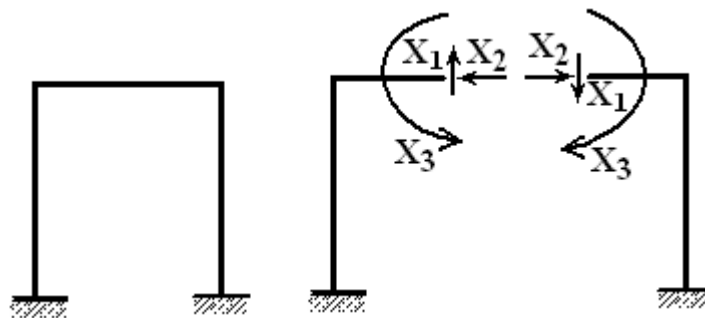


Рис. 5

1.4. Канонические уравнения метода сил

Для нахождения “лишних” неизвестных составляются дополнительные уравнения, которые носят название уравнений совместности деформаций. Смысл их заключается в том, что перемещения в основной системе, вызванные внешними нагрузками и “лишними” неизвестными, должны быть такими же, как и в заданной системе.

Суммарные перемещения в основной системе, вызванные внешней нагрузкой и “лишними” неизвестными, по направлению самих неизвестных должны быть равны нулю.

Перемещения δ_{ij} и Δ_{1P} проще всего определяются по методу Максвелла-Мора с использованием способа Верещагина:

$$\delta_{ij} = \delta_{ji} = \sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \frac{\overline{M}_i \overline{M}_j}{EI} dx = \sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \frac{\overline{M}_j \overline{M}_i}{EI} dx,$$

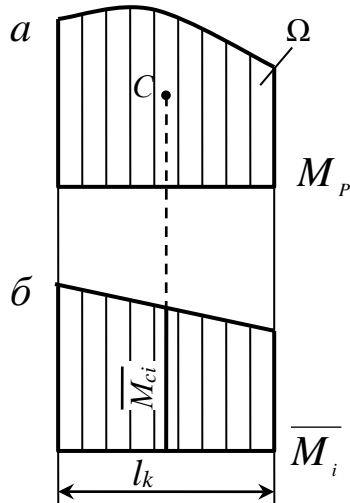
$$\Delta_{ip} = \sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \frac{\overline{M}_i M_p}{EI} dx,$$

где \overline{M}_i , \overline{M}_j , M_p - алгебраические выражения изгибающих моментов на этом участке основной системы, вызванных, соответственно, действием только одной единичной силы $\overline{X}_i = 1$ или $\overline{X}_j = 1$ или внешней нагрузкой, EI - изгибная жесткость стержня.

Для стержневых систем интегралы Мора удобно вычислять по способу Верещагина. При этом операция интегрирования аналитических выражений изгибающих моментов заменяется перемножением эпюр.

Способ Верещагина применяется в случае, когда эпюры от единичных силовых факторов на прямолинейных участках оказываются линейными, а грузовая эпюра имеет следующие очертания: прямоугольник, трапеция или парабола. В связи с этим, согласно способу Верещагина, интеграл вида

$$\int \overline{M}_i M_p dx$$



равен произведению площади криволинейной эпюры Ω (рис. 6а) на ординату линейной эпюры \overline{M}_i , расположенную под центром тяжести криволинейной эпюры (рис. 6б). Следовательно, величины δ_{ij} и Δ_{ip} можно определить по формулам

$$\delta_{ij} = \sum_{i=1}^n \frac{\Omega_i \overline{M}_{cj}}{EJ},$$

$$\Delta_{ip} = \sum_{i=1}^n \frac{\Omega_p \overline{M}_{ci}}{EJ},$$

Рис. 6

где Ω_p - площадь грузовой эпюры момента на участке; \overline{M}_{ci} - ордината прямолинейной (единичной) эпюры, взятая под центром тяжести с грузовой эпюры M_p .

Если обе эпюры (единичная и грузовая) линейные, то безразлично, площадь какой из эпюр подсчитывается, но ордината момента обязательно берется с другой эпюры.

Далее приведены площади и координаты центров тяжести некоторых фигур (рис. 7).

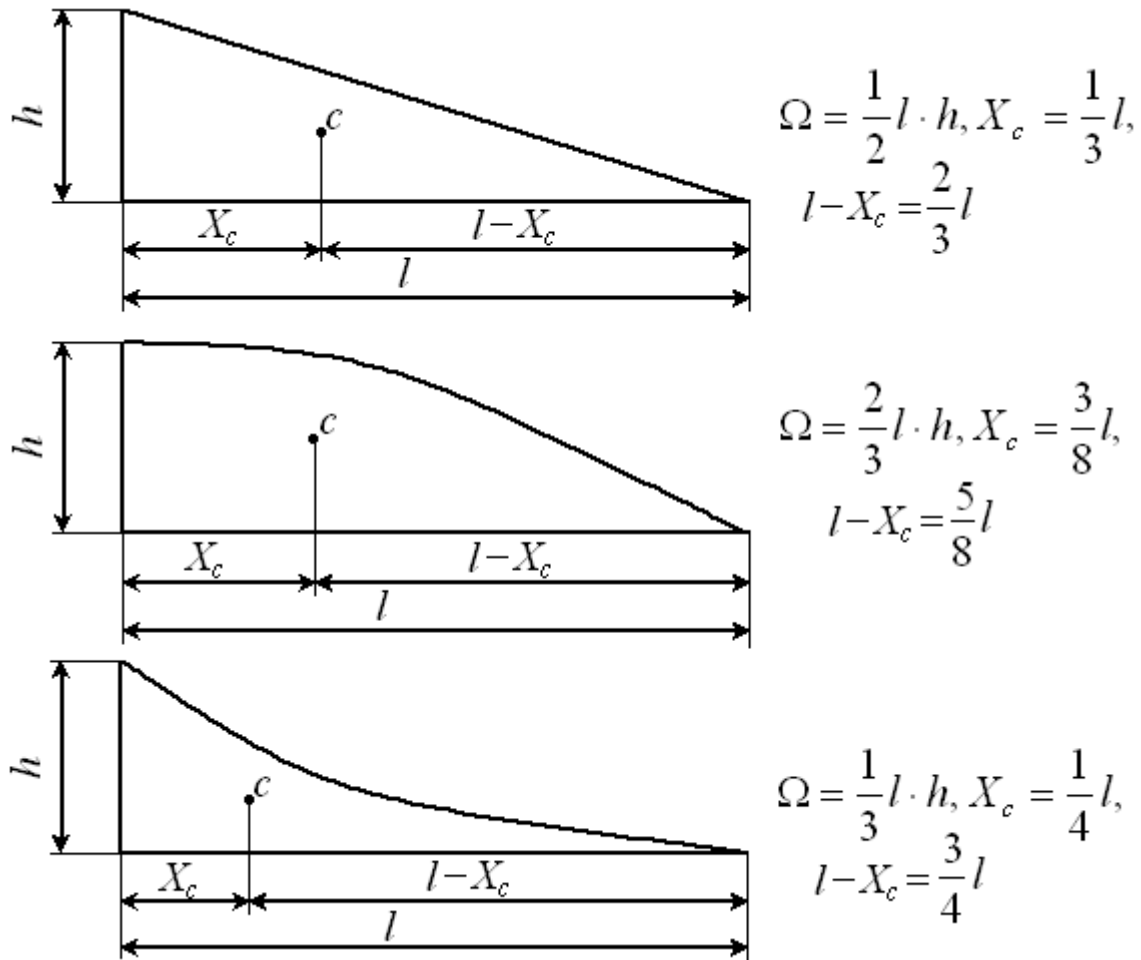


Рис. 7

В тех случаях, когда перемножаются две эпюры, имеющие вид трапеций, или когда одна эпюра имеет вид трапеции, а другая – квадратичной параболы, можно использовать формулу Симпсона. Знаки определяются следующим образом: если эпюры направлены в одну сторону, то ставится знак «+», а если в разные, то «-». Результатом перемножения будут выражения, приведенные на рис. 8.

1.7. Определение величин “лишних” неизвестных и построение эпюр внутренних силовых факторов

Подставив величины найденных перемещений в систему канонических уравнений и решив ее, находим значения неизвестных X_i . Положительные значения “лишних” неизвестных X_i свидетельствует о том, что направление реакций совпадает с их направлением, принятым в единичном состоянии. К основной системе прикладываем заданную нагрузку и найденные “лишние” неизвестные X_i , после чего строим эпюры внутренних усилий. В общем случае нагружения в поперечных сечениях элементов рамы будут возникать три внутренних силовых фактора: изгибающий момент M , поперечная сила Q и продольная сила N .

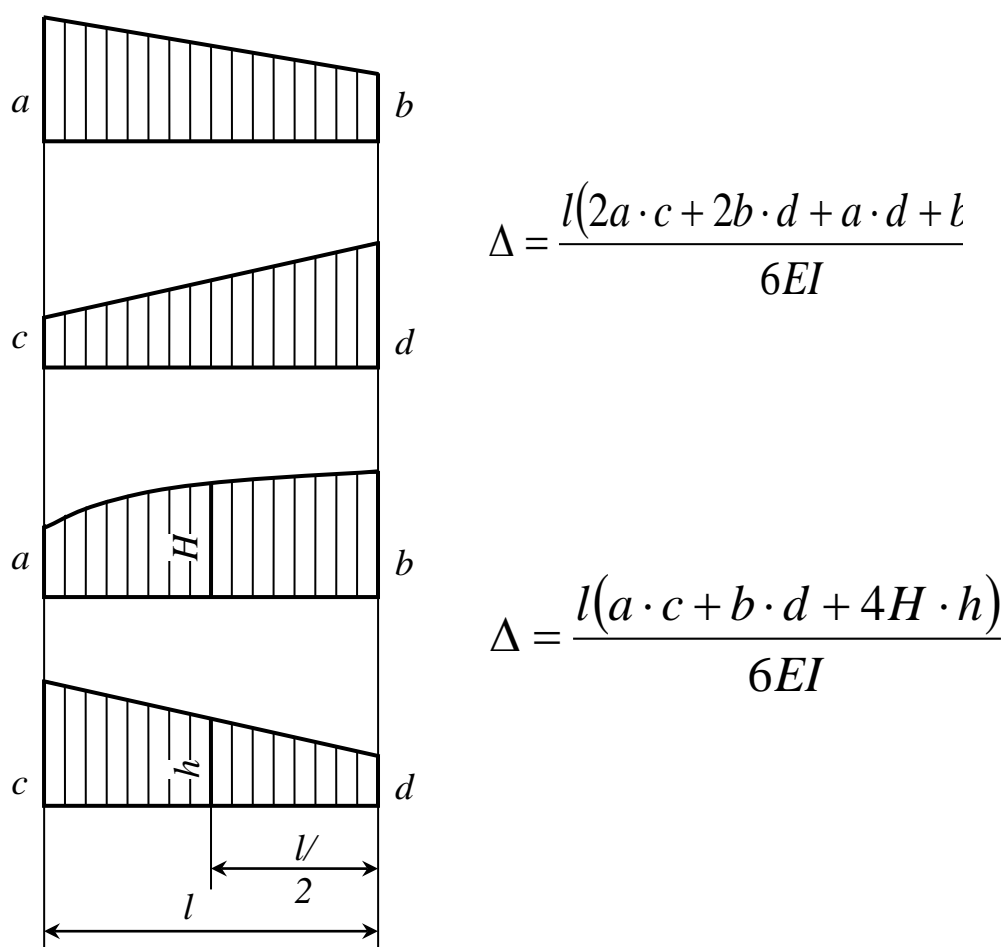


Рис. 8

1.8. Учет симметрии при расчете статически неопределимых рам

При учете свойства симметрии расчет статически неопределимой рамы существенно упрощается, так как количество “лишних” уменьшается. На рис. 9а изображена геометрически симметричная рама. Геометрически симметричная рама может быть также симметрично нагружена (рис. 9б). Нагрузка на симметричной раме также может иметь свойство так называемой косо-

симметрии (рис. 9в). Аналогичным образом свойства симметрии и кососимметрии относятся к внутренним силовым факторам в поперечных сечениях рамы, которые становятся лишними неизвестными при рассечении рамы по линии симметрии (рис. 9г). Так, поперечные силы X_1 называются кососимметричными силовыми факторами, а продольные силы X_2 и изгибающие моменты X_3 называются симметричными силовыми факторами.

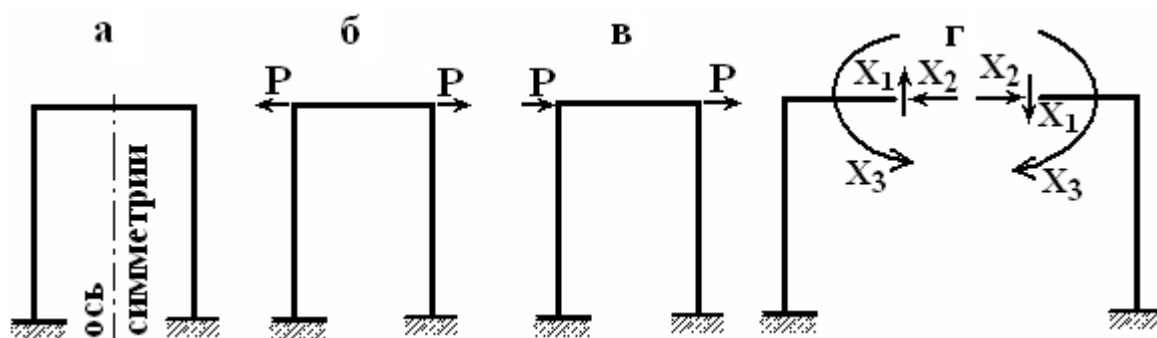


Рис. 9

При расчете симметричной рамы можно руководствоваться следующим: при симметричной внешней нагрузке кососимметричные силовые факторы равны нулю, а при кососимметричной внешней нагрузке симметричные силовые факторы равны нулю. Это происходит потому, что если перемножить симметричную и кососимметричную эпюры, то в ответе будет получаться ноль, так как результат перемножения эпюр на левой половине рамы равен результату перемножения эпюр на правой половине, но с обратным знаком, что в сумме дает ноль.

2. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Таблица 1

Первая цифра шифра, № схемы по рис. 10	Вторая цифра шифра, сила F	Третья цифра шифра, момент M
1	2 P	3 P a
2	4 P	2 P a
3	3 P	2 P a
4	3 P	4 P a
5	2 P	4 P a
6	5 P	2 P a
7	4 P	3 P a

8	1 P	3 P a
9	2 P	1 P a
10	3 P	5 P a

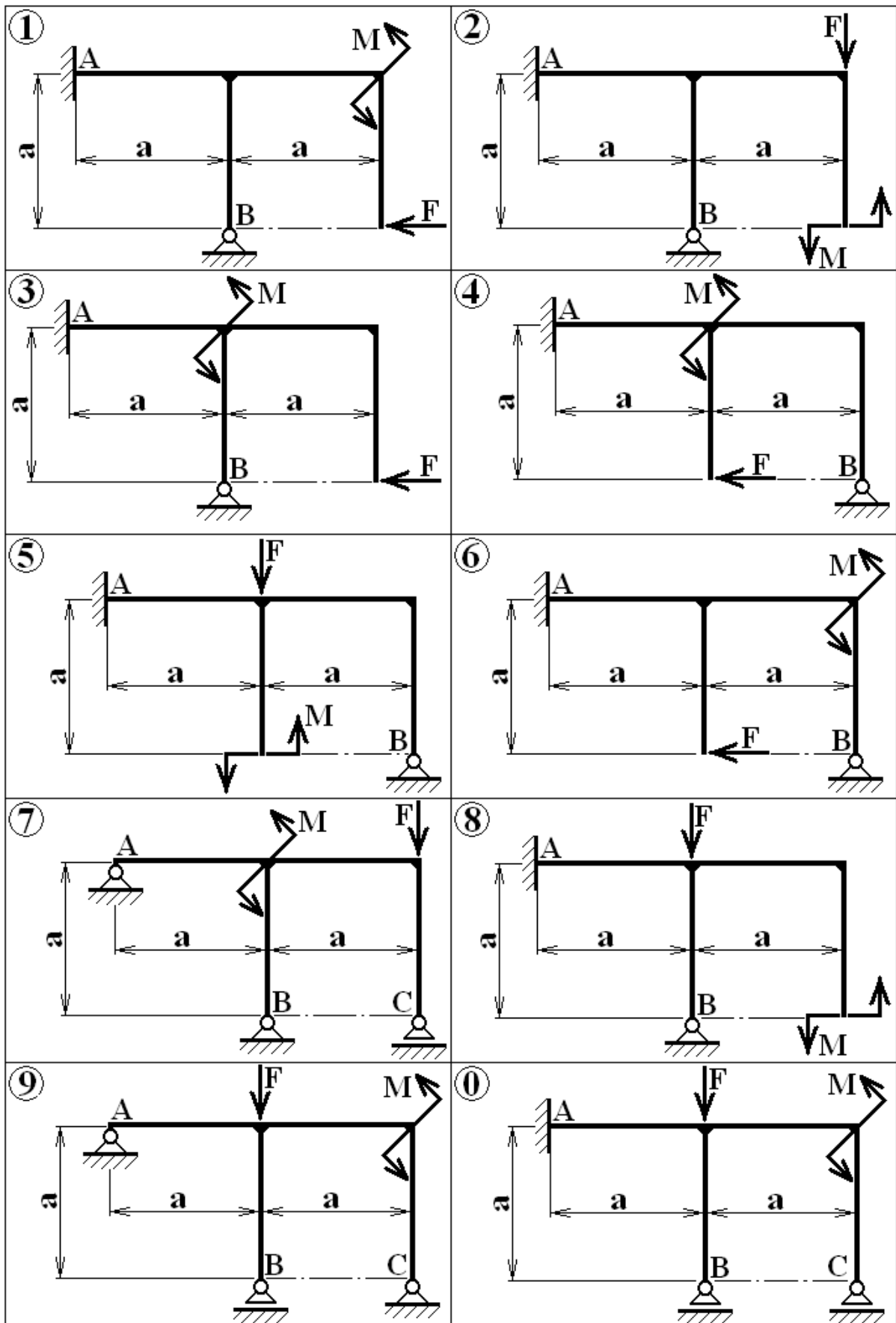


Рис. 10

3. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

3.1. Исходные данные

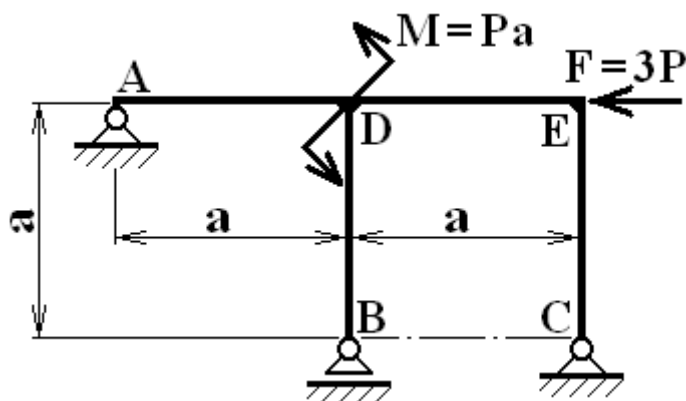


Рис. 11

3.2. Определение степени статической неопределимости и выбор основной системы

Данная рама является два раза статически неопределимой:

$$C_{\text{H}} = O_{\text{H}} = 5 - 3 = 2.$$

Основная система показана на рис. 12.

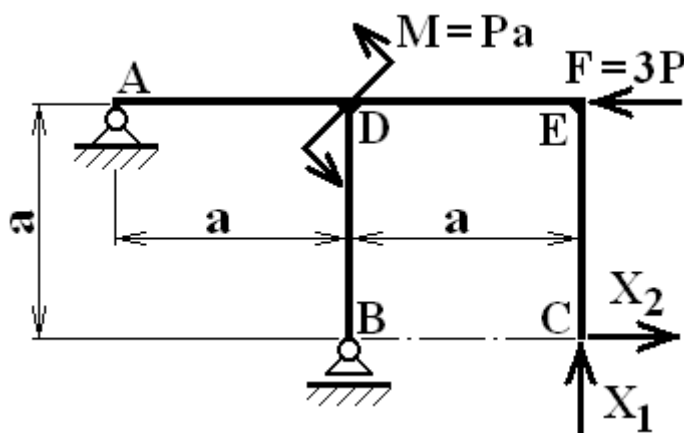


Рис. 12

3.3. Составление системы канонических уравнений

Так как число канонических уравнений всегда равно степени статической неопределимости, то для дважды статически неопределимой системы записываются два канонических уравнения:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1P} = 0; \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2P} = 0. \end{cases}$$

3.4. Построение эюр изгибающих моментов от внешней нагрузки и от единичных сил

На рис. 13 построена эюра изгибающих моментов M_P от внешней нагрузки $F = 3P$ и $M = Pa$.

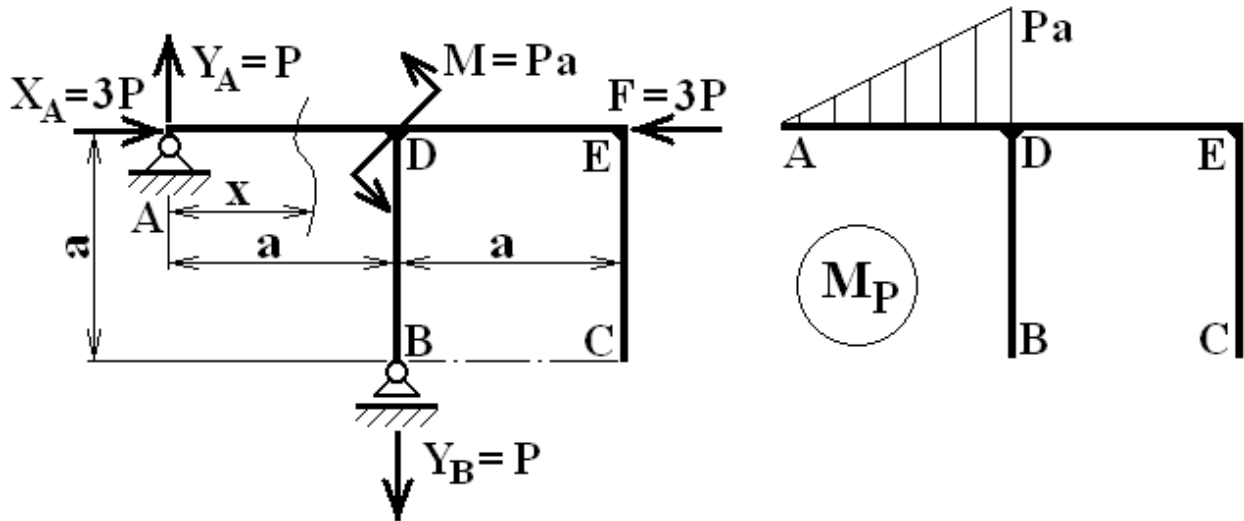


Рис. 13

Определим опорные реакции:

$$\Sigma X = 0; X_A - 3P = 0; X_A = 3P;$$

$$\Sigma M_A = 0; M_A - Y_B a = Pa - Y_B a = 0; Y_B = P;$$

$$\Sigma Y = 0; Y_A - Y_B = Y_A - P = 0; Y_A = P.$$

Границы участка: $0 \leq x \leq a$.

$$M_P = Y_A x = Px;$$

$$x = 0; M_P = 0;$$

$$x = a; M_P = Pa.$$

На рис. 14 построена эюра изгибающих моментов M_1 от единичной нагрузки $X_1 = 1$.

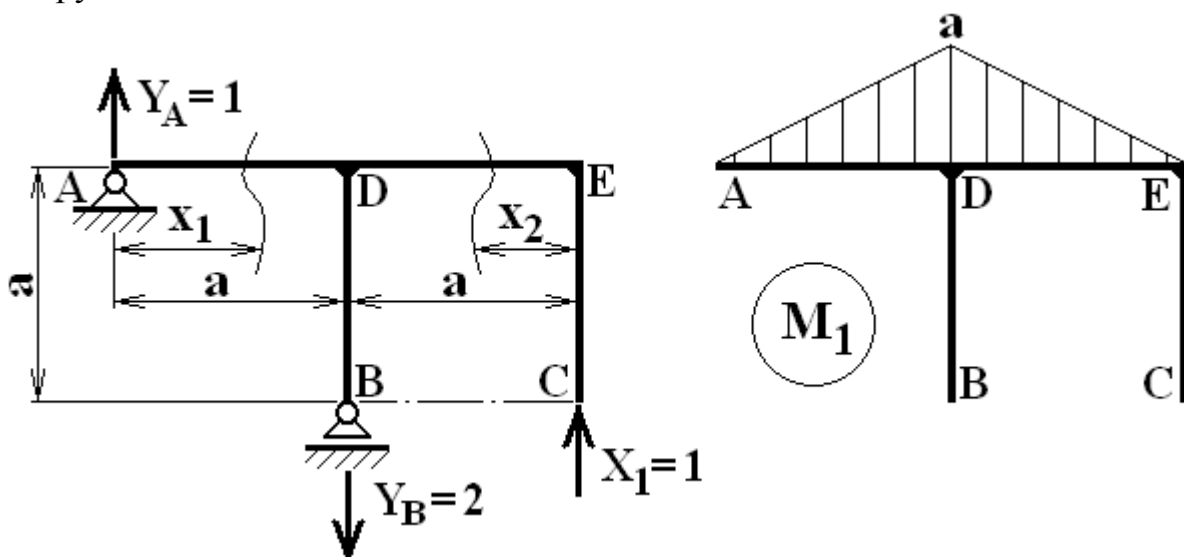


Рис. 14

Определим опорные реакции:

$$\Sigma X = 0; X_A = 0;$$

$$\Sigma M_A = 0; X_1 2a - Y_B a = 0; Y_B = 2;$$

$$\Sigma Y = 0; Y_A - Y_B + X_1 = 0; Y_A = 1.$$

Границы первого участка: $0 \leq x_1 \leq a$.

$$M_{11} = Y_A x_1 = 1 x_1;$$

$$x_1 = 0; M_{11} = 0;$$

$$x_1 = a; M_{11} = a.$$

Границы второго участка: $0 \leq x_2 \leq a$.

$$M_{12} = X_1 x_2 = 1 x_2;$$

$$x_2 = 0; M_{12} = 0;$$

$$x_2 = a; M_{12} = a.$$

На рис. 15 построена эпюра изгибающих моментов M_2 от единичной нагрузки $X_2 = 1$.

Определим опорные реакции:

$$\Sigma X = 0; X_A - X_2 = X_A - 1 = 0; X_A = 1;$$

$$\Sigma M_A = 0; X_2 a - Y_B a = 0; Y_B = 1;$$

$$\Sigma Y = 0; Y_A - Y_B = Y_A - 1 = 0; Y_A = 1.$$

Границы первого участка: $0 \leq x_1 \leq a$.

$$M_{21} = Y_A x_1 = 1 x_1;$$

$$x_1 = 0; M_{21} = 0;$$

$$x_1 = a; M_{21} = a.$$

Границы второго участка: $0 \leq x_2 \leq a$.

$$M_{22} = X_2 x_2 = 1 x_2;$$

$$x_2 = 0; M_{22} = 0;$$

$$x_2 = a; M_{22} = a.$$

Границы третьего участка: $0 \leq x_3 \leq a$.

$$M_{23} = X_2 a = a.$$

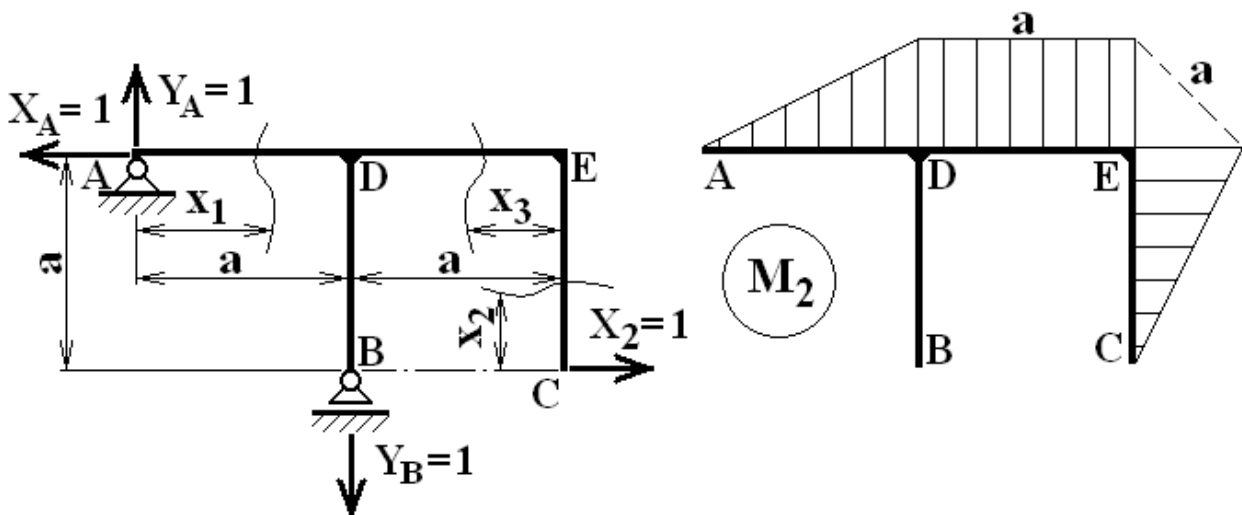


Рис. 15

На рис. 16 построена суммарная эпюра M_S от единичных нагрузок $X_1=1$ и $X_2=1$.

Определим опорные реакции:

$$\Sigma X = 0; X_A - X_2 = X_A - 1 = 0; X_A = 1;$$

$$\Sigma M_A = 0; X_2 a + X_1 2a - Y_B a = 0; Y_B = 3;$$

$$\Sigma Y = 0; Y_A - Y_B + X_1 = 0; Y_A = 2.$$

Границы первого участка: $0 \leq x_1 \leq a$.

$$M_{S1} = Y_A x_1 = 2 x_1;$$

$$x_1 = 0; M_{S1} = 0;$$

$$x_1 = a; M_{S1} = 2a.$$

Границы второго участка: $0 \leq x_2 \leq a$.

$$M_{S2} = X_2 x_2 = 1 x_2;$$

$$x_2 = 0; M_{S2} = 0;$$

$$x_2 = a; M_{S2} = a.$$

Границы третьего участка: $0 \leq x_3 \leq a$.

$$M_{S3} = X_1 x_3 + X_2 a = x_3 + a;$$

$$x_3 = 0; M_{S3} = a;$$

$$x_3 = a; M_{S3} = 2a.$$

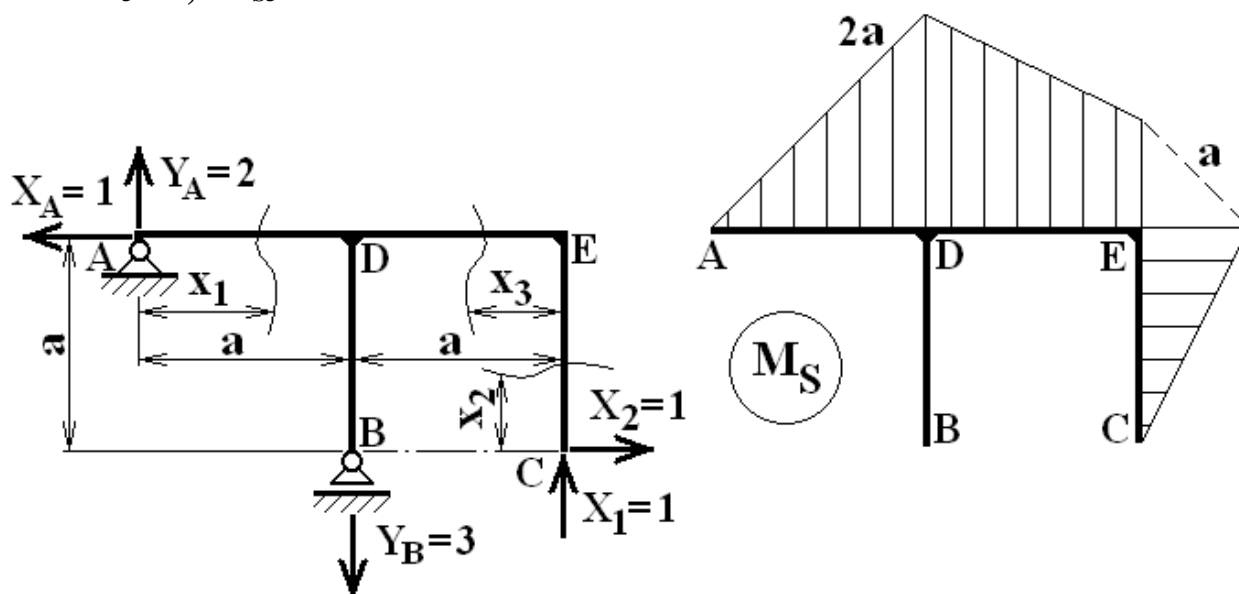


Рис. 16

3.5. Определение перемещений

Величины перемещений определим, используя способ Верещагина:

$$\delta_{11} = \frac{a^2}{2} \frac{2}{3} \frac{a}{EJ} + \frac{a^2}{2} \frac{2}{3} \frac{a}{EJ} = \frac{2 a^3}{3 EJ}; \quad \delta_{12} = \delta_{21} = \frac{a^2}{2} \frac{2}{3} \frac{a}{EJ} + \frac{a^2}{2} \frac{a}{EJ} = \frac{5 a^3}{6 EJ};$$

$$\delta_{22} = \frac{2 a^3}{3 EJ} + \frac{a^3}{EJ} = \frac{5 a^3}{3 EJ}; \quad \Delta_{1P} = \frac{a^2}{2} \frac{2}{3} \frac{Pa}{EJ} = \frac{P a^3}{3 EJ}; \quad \Delta_{2P} = \frac{P a^3}{3 EJ}.$$

Выполним проверку найденных перемещений:

$$\Delta_{SS} = \frac{2a^2}{2} \frac{2}{3} \frac{2a}{EJ} + \frac{a}{6EJ} (2 \cdot 2a2a + 2aa + a2a + a2a) + \frac{a^2}{2} \frac{2}{3} \frac{a}{EJ} = 4 \frac{a^3}{EJ};$$

$$\delta_{11} + \delta_{22} + 2\delta_{12} = \frac{2}{3} \frac{a^3}{EJ} + \frac{5}{3} \frac{a^3}{EJ} + 2 \frac{5}{6} \frac{a^3}{EJ} = 4 \frac{a^3}{EJ} = \Delta_{SS};$$

$$\Delta_{SP} = 2a \frac{a}{2} \frac{2}{3} \frac{Pa}{EJ} = \frac{2}{3} \frac{Pa^3}{EJ} = \Delta_{1P} + \Delta_{2P}.$$

3.6. Определение величин лишних неизвестных

Подставив вычисленные величины перемещений в систему канонических уравнений, получим:

$$\begin{cases} \frac{2}{3} \frac{a^3}{EJ} X_1 + \frac{5}{6} \frac{a^3}{EJ} X_2 + \frac{P}{3} \frac{a^3}{EJ} = 0; \\ \frac{5}{6} \frac{a^3}{EJ} X_1 + \frac{5}{3} \frac{a^3}{EJ} X_2 + \frac{P}{3} \frac{a^3}{EJ} = 0. \end{cases}$$

Домножив оба уравнения на **6 EJ** и поделив на **a³**, получим:

$$\begin{cases} 4X_1 + 5X_2 + 2P = 0; \\ 5X_1 + 10X_2 + 2P = 0. \end{cases}$$

Вычтя из второго уравнения системы первое, получим **X₁ + 5 X₂ = 0**, откуда **X₁ = -5X₂**, подставив в первое уравнение, имеем: **-20X₂ + 5X₂ + 2P = 0**, откуда **X₂ = 2P/15 > 0**, следовательно **X₂** направлен вправо; **X₁ = -10P/15 < 0**, следовательно **X₁** направлен вниз и равен **X₁ = 10 P/15**.

3.7. Построение эпюр внутренних силовых факторов M, N и Q

Нагруженная рама показана на рис. 17.

Определим опорные реакции:

$$\Sigma X = 0; X_A - F + X_2 = 0; X_A = 43/15 P;$$

$$\Sigma M_A = 0; X_2 a - X_1 2a + Y_B a + M = 0; Y_B = 3/15 P;$$

$$\Sigma Y = 0; Y_A + Y_B - X_1 = 0; Y_A = 7/15 P.$$

Границы первого участка: **0 ≤ x₁ ≤ a**.

$$N_1 = -X_A = -43/15 P;$$

$$Q_1 = Y_A = 7/15 P;$$

$$M_1 = Y_A x_1 = 7/15 P x_1;$$

$$x_1 = 0; M_1 = 0;$$

$$x_1 = a; M_1 = 7/15 Pa.$$

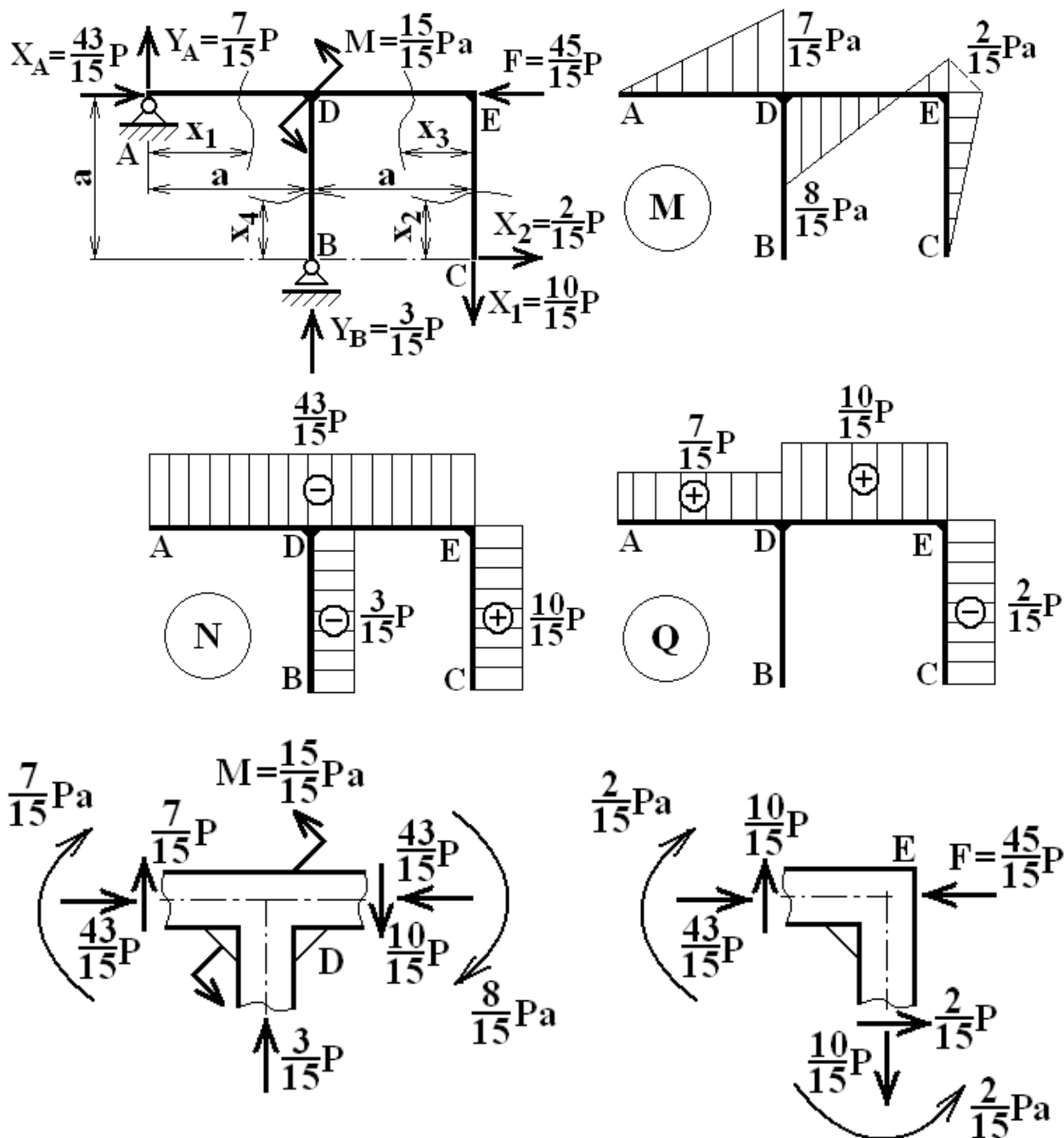


Рис. 17

Границы второго участка: $0 \leq x_2 \leq a$.

$$N_2 = X_1 = 10/15 P;$$

$$Q_2 = -X_2 = -2/15 P;$$

$$M_2 = X_2 x_2 = 2/15 P x_2;$$

$$x_2 = 0; M_2 = 0;$$

$$x_2 = a; M_2 = 2/15 Pa.$$

Границы третьего участка: $0 \leq x_3 \leq a$.

$$N_3 = -F_A + X_2 = -43/15 P;$$

$$Q_3 = X_1 = 10/15 P;$$

$$M_3 = -X_1 x_3 + X_2 a = -10/15 P x_3 + 2/15 Pa;$$

$$x_3 = 0; M_3 = 2/15 Pa;$$

$$x_3 = a; M_3 = -8/15 Pa.$$

Границы четвертого участка: $0 \leq x_4 \leq a$.

$$N_4 = -Y_B = -3/15 P;$$

$$Q_4 = 0;$$

$$M_4 = 0.$$

Показанные на рис. 17 узлы **D** и **E** рамы находится в равновесии при действии внешней нагрузки и внутренних усилий.

Так как перемещений по направлению лишних связей нет, то:

$$M M_s = M M_1 + M M_2 = 0;$$

$$M M_1 = \frac{a^2}{2} \frac{2}{3} \frac{7}{15} \frac{Pa}{EJ} + \frac{a}{6EJ} \left[2a \left(-\frac{8}{15} Pa \right) + a \frac{2}{15} Pa \right] = 0;$$

$$M M_2 = \frac{7}{3 \cdot 15} \frac{Pa^3}{EJ} + \frac{a^2}{2EJ} \left[-\frac{8}{15} + \frac{2}{15} \right] Pa + \frac{a^2}{2} \frac{2}{3} \frac{2}{15} \frac{Pa}{EJ} = 0.$$

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем сущность способа Верещагина?
2. Что называется «основной системой»?
3. Что означают величины δ_{11} и Δ_{1P} ?
4. Каков физический смысл произведений $X_1 \cdot \delta_{11}$ и $X_2 \cdot \delta_{12}$?
5. Какая мысль выражается при помощи уравнения $X_1 \delta_{11} + X_2 \delta_{12} + \Delta_{1P} = 0$?
6. Что означает термин “лишние связи”?
7. Как определить степень статической неопределимости?
8. Что такое основная система?
9. Что устанавливает каноническое уравнение метода сил?
10. Какие существуют проверки правильности выполнения этапов расчета рам методом сил?

Библиографический список

Волосухин В.А., Евтушенко С.И., Логвинов В.Б. Сопротивление материалов: учебник. – М.: РИОР, 2014.– 543 с.

Степин П.А. Сопротивление материалов: учебник. – СПб: Лань, 2010.– 320 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Краткие сведения по теории.....	-
2. Варианты заданий	11
3. Пример выполнения задания.....	13
4. Контрольные вопросы для самопроверки.....	19
Библиографический список.....	-
