

Глава 2. ОЦЕНКА ДЕФОРМАТИВНЫХ КАЧЕСТВ (ЖЁСТКОСТИ) СООРУЖЕНИЙ

2.1. Концепция сил в формировании количественных критериев оценки жёсткости

Предельные нагрузки, внутренние усилия и напряжения называют несущей способностью соответственно сооружения, сечения и связи. Работа сооружения за пределами несущей способности приводит к качественному изменению свойств связей (первому предельному состоянию), выражающемуся в нарушении сплошности (появлении и развитии трещин и пор), хрупком, пластичном, вязком и усталостном разрушениях, потере устойчивости формы и положения конструкций (опрокидывание, скольжение, всплытие), разрушении от агрессивного воздействия среды и климата. Критерии прочностной группы, по которым определяется несущая способность, построены на расчетах сооружений без среды. Среда, в том числе и функциональная, заменяется системой сил (нагрузкой) в связях ее с сооружением. При этом расчетчика не интересует состояние среды и, более того, определение максимальной нагрузки связывается с ее разрушением.

Чтобы обеспечить выполнение сооружением своих функций, часто необходимо сохранять и функциональную среду. Трудности в оценке сохранности этой среды связаны с тем, что связи между нею и сооружением имеют не только механический, но и другой характер не измеряемый силами, а обеспечивающий эстетичность или комфортность обслуживания и проживания. Функционирование среды обитания, например, требует ограничивать чрезмерные раскачивания высотных зданий, приводящие к нарушению комфортности, плохому самочувствию и даже болезням работающих или проживающих в зданиях людей. К функциональным средам относятся защитные и облицовочные покрытия, которые защищают сами сооружения от агрессивного воздействия и придают вид соответствующий их эстетическому назначению. Значительные отклонения подкрановых или железнодорожных путей в расстоянии между ними по вертикали или горизонтали неизбежно приводят к крушению кранов и поездов. Поверхности антенн не должны отличаться от идеального параболоида обеспечивающего качественный прием и передачу радио или телевизионных сигналов. Читатель может привести и другие примеры функциональных сред, сохранение которых обязательно при проектировании сооружений.

Для сохранности среды необходимо не допустить переход свойств функциональных связей среды в другое качество. То есть условие

сохранения среды в отношении связей внутри ее формулируется так же, как и условия прочности для сооружений. Поэтому необходимо изучить предельное состояние среды и не допустить его наступление при эксплуатации. Это состояние, называемое вторым предельным, проявляется раньше исчерпания несущей способности сооружения, но тесно связано с его допредельным - рабочим состоянием. Оценка сохранности среды проводят двумя способами.

В одном из них сохраняется процедура оценки прочности, которую можно проводить на уровне нагрузки, усилий или напряжений. Оценка прочности и проектирование по нагрузке (усилиям в связях сооружения и среды) основаны на банке предельных характеристик типовых сооружений, при конструировании которых учтены многие факторы связанные с их назначением, включая и ограничения по сохранению функциональной среды. Поэтому при оценке прочности по нагрузке или при проектировании по ней нет необходимости заботиться об оценке сохранности среды (она выполняется автоматически). Проверка необходима только в том случае, когда изменяются условия эксплуатации по сравнению с теми, которые оговорены в банке предельных нагрузок.

Оценка прочности сооружения по усилиям и напряжениям в нем не может быть использована для оценки сохранности среды. Но иногда с целью сохранения в процедуре оценки сохранности среды привычных представлений об оценке прочности, предельные напряжения (усилия) снижаются (ввиду того, что разрушение среды происходит раньше потери несущей способности). Это снижение не всегда можно достаточно обосновать, так как оно зависит от практически неограниченного числа факторов (назначения, размеров и формы сооружения, физико-механических характеристик материалов, характеристик функциональной среды и других эксплуатационных и конструктивных особенностей).

Второй способ связывается с ограничением отклонений сооружения от идеальной формы, обеспечивающей надежное сохранение среды. Эти отклонения вызываются перемещениями несущих конструкций, несущая способность которых гарантирована. То есть предполагается, что обеспечение несущей способности конструкций не может полностью гарантировать нормальное функционирование сооружения. Поэтому возникает потребность в построении методики количественной оценки деформативности или жесткости сооружений. Как правило, потеря деформационных качеств (второе предельное состояние) наступает задолго до исчерпания несущей способности, оно проявляется в разрушении функциональной среды без качественного изменения свойств связей внутри сооружения, а характеризуется отклонением сооружения или его отдельных точек и деталей от идеальной формы.

Количественные критерии жесткости (деформативности) должны обеспечить работу сооружений без значительных перемещений, (прогибов, просадок, перекосов, поворотов) нарушающих его нормальное функционирование при отклонении от идеальной формы. Оценивая жесткость, необходимо сравнить перемещения рабочего состояния и предельно допустимые отклонения от идеальной формы, то есть проверить выполнение неравенства

$$\delta_{раб} \leq \delta_{пр}, \quad (2.1)$$

где $\delta_{раб}$ - максимальное отклонение сооружения от идеальной формы, $\delta_{пр}$ - предельное отклонение, допускаемое функциональной средой.

2.2. Характеристика предельного деформированного состояния

Предельные характеристики деформативности должны регламентировать (устанавливать) допустимые отклонения от идеальной формы сооружения. Величина отклонения ограничивается условиями выполнения сооружением своих функций. Они складываются из отклонений при изготовлении, при монтаже и эксплуатации. Часть этих отклонений связана с деформацией внутренних связей. Изменение длины каждой связи при действии напряжений в ней влияет на перемещение всех точек сооружения (степень влияния изменения длин связей на перемещения обсуждается в главе 3 настоящего приложения). Покажем на характерных примерах, что форма сооружения слабо зависит от распределения нагрузки и от ее положения на сооружении, банк предельных характеристик по жесткости поэтому может содержать рекомендации по ограничению максимального перемещения одной характерной точки, которая определяет форму сооружения во всем объеме.

Сравним форму изогнутой оси однопролетной балки при действии сосредоточенной силы и распределенной нагрузки (рис. 2.1) при регламентации прогиба ее середины - f .

Получим формулу для вычисления точек кривой - изогнутой оси стержня, используя известную зависимость изменения кривизны от изгибающего момента

$$1/\rho = M/EI \text{ или } y'' = M/EI, \quad (2.2)$$

где $1/\rho$ - изменение кривизны стержня при изгибе, y - прогиб балки, M - изгибающий момент, EI - жесткость балки (двумя штрихами показана вторая производная прогиба по оси z - вдоль балки, см. рис. 2.1).

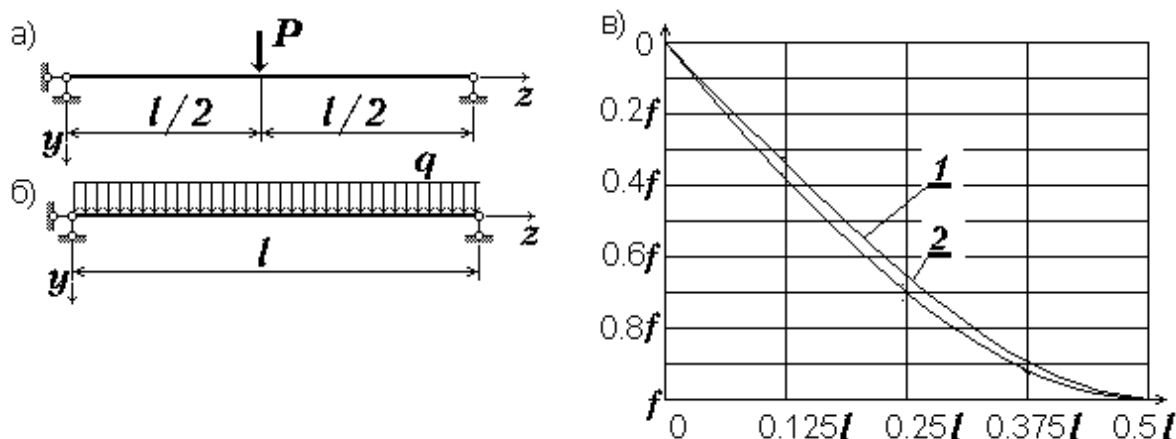


Рис. 2.1. Схема нагружения балки (а, б) и зависимость величины относительных прогибов (в) от нагружения (кривые 1, 2 - соответствуют нагружениям а и б).

При нагружении сосредоточенной силой

$$M = Pz / 2 \quad (\text{при } z \leq l/2). \quad (2.3)$$

При нагружении распределенной нагрузкой

$$M = qz(l - z) / 2. \quad (2.4)$$

Подставив (2.3) и (2.4) в (2.2) и проинтегрировав, соответственно получим

$$\left. \begin{aligned} y &= f(4z^2 - 3l^2) / l^3, \quad \text{где } f = Pl^3 / (48EI); \\ y &= f16z(2lz^2 - z^3 - l^3) / (5l^4), \quad f = 5ql^4 / (384EI). \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

На рисунке 2.1, в изображены кривые прогибов по длине балки при двух видах нагружения, которые показывают слабую зависимость формы изогнутой оси балки от вида нагружения (наибольшая ошибка не превосходит 3%) и поэтому форма балки определяется прогибом ее середины.

Если построить зависимость прогибов по длине консольной балки, нагруженной сосредоточенной силой на конце консоли (рис. 2.2,а) и распределенной нагрузкой по всей длине (рис. 2.2,б) (предлагаем проделать это самостоятельно), то также заметим слабую зависимость прогиба от нагрузки и форма балки определяется прогибом ее конца.

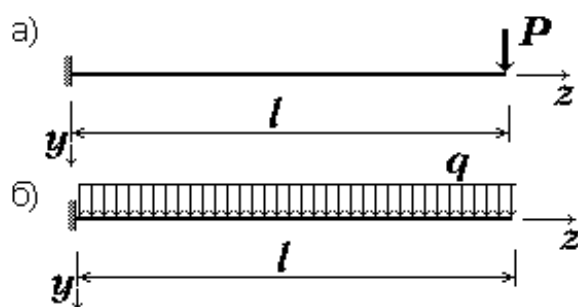


Рис. 2.2. Консольная балка, нагруженная сосредоточенной силой (а) и распределенной нагрузкой (б)

Предельные характеристики жесткости (например, прогибы) как и характеристики прочности устанавливаются с учетом технологических требований по эксплуатации оборудования на основе обобщения опыта строительства и специально поставленных экспериментов. Выражаются эти характеристики чаще в относительных¹, реже в абсолютных величинах. Некоторые из нормируемых предельных величин жесткости приводятся в таблицах 2.1, 2.2.

Таблица 2.1

Предельные отклонения верха одноэтажных колонн
в зданиях оборудованных кранами
в долях высоты колонны (h)

Направление отклонения	На открытых эстакадах	Внутри зданий и сооружений
поперечное	$1/4000 h$	$1/4000 h$
продольное	$1/4000 h$	$1/2000 h$

2.3. Форма сооружения в рабочем состоянии

Форму сооружения, вернее его отклонение от идеальной формы, после приложения нагрузок, возможно определить по характерным перемещениям конечного количества точек (сечений) ввиду того, что деформативная форма слабо зависит от нагрузки (см. примеры 2.1 и 2.2). В балке на двух опорах, например, определяющим является прогиб посередине, в консольной балке - прогиб ее конца. В простейших стержневых и тонкостенных конструкциях характерное перемещение

¹ Можно показать, что отношением прогиба к пролету оценивается кривизна стержня в отношении к пролету. Действительно, из известной теоремы Пифагора $R^2 = (R-f)^2 + (l/2)^2$ получаем $1/R = (f/l)(8/l)$.

можно найти в справочной литературе² (см. таблицы 2.3, 2.4), а в более сложных случаях воспользоваться процедурой Отто Мора по определению перемещений (см. главу 3).

Таблица 2.2

Предельные прогибы балок и балочных ферм
по отношению к пролету (l)

Функциональное назначение конструкций	Предельный прогиб
1. Крановые пути	
легкого режима	1/400 l
среднего режима	1/500 l
тяжелого режима	1/600 l
2. Рабочие площадки при наличии крановых путей	
ширококолейных	1/600 l
узкоколейных	1/400 l
3. Рабочие площадки без крановых путей	
главные балки	1/400 l
прочие балки	1/250 l
настил	1/150 l
4. Покрытия и чердачные перекрытия	
несущие подвесное оборудование	1/400 l
не несущие подвесное оборудование	1/250 l
прогоны	1/200 l
настил	1/150 l
5. Междуэтажные перекрытия	
главные балки	1/400 l
прочие	1/250 l
6. Элементы фахверка	
стойки, ригели	1/300 l
прогоны остекления	1/200 l
7. Оштукатуренные поверхности	1/350 l
П р и м е ч а н и е. Прогибы определяются от нормативной нагрузки без учета ослаблений сечений, а при наличии штукатурки - только от временной нагрузки	

Зная как отыскать перемещения, мы сможем оценить деформированную форму, если ответим на два вопроса, которые не зависят от методики определения перемещений, а имеют инженерный характер.

² Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический том. В двух книгах. - М.: Стройиздат, 1973.

Первый из них: в каком месте (точке, сечении) находить характерные перемещения, каковы они по качеству (линейные, или угловые перемещения, или взаимные смещения) и по направлению. Второй: от какой нагрузки необходимо определять эти перемещения.

В решении первого вопроса для простейших сооружений можно опираться на существующий опыт, который вошел в практику расчётов и кажется очевидным. Так в простых балках на двух опорах характерной точкой является середина пролета, а характерное смещение - линейное смещение по вертикали. В консольной балке - конец консоли и вертикальное смещение его. Действительно, в простой балке на основе решения уравнения (2.2) в зависимости от положения силы (рис. 2.3) получим, что наибольшие отклонения положения максимального прогиба от середины составляет 16 %, но по величине максимальный прогиб отличается от прогиба в середине всего на 3 %. В консольной балке³ решение более простое и очевидное.

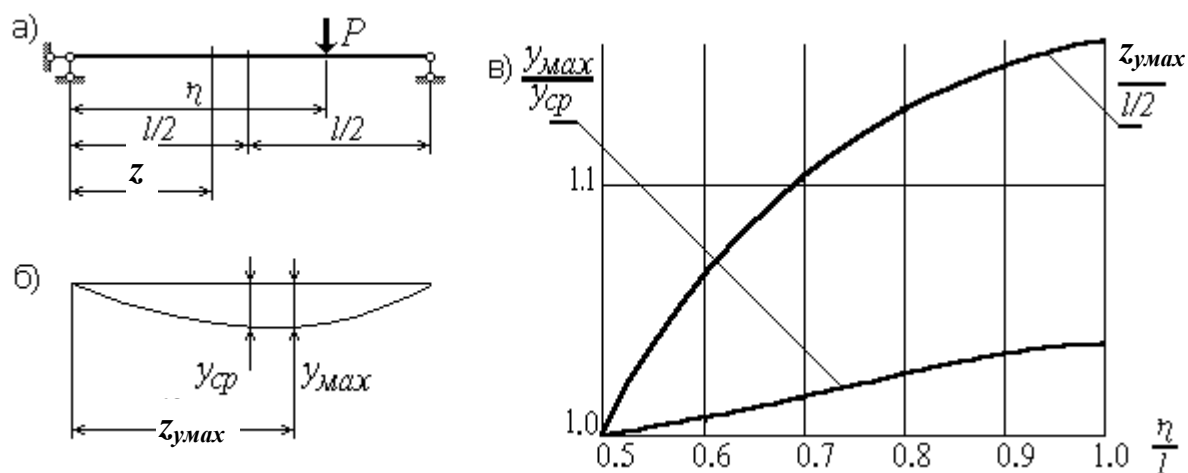


Рис. 2.3. Деформация балки на двух опорах

а - схема балки и нагрузки, б - изогнутая ось балки, в - зависимости максимального прогиба отнесенного к прогибу середины балки и положение его

В более сложных случаях мы рекомендуем использовать приближенное представление об изогнутой оси сооружения как системе сопряженных полувогн (простейших элементов) с тремя степенями свободы: перемещения элемента как жесткого целого (y_0), угла поворота хорды полувогны (φ) и прогиба середины полувогны (f) (рис. 2.4).

³ Читатель может с помощью формул, помещенных в таблице 2.4, самостоятельно получить решения для балок и проверить наши выводы.

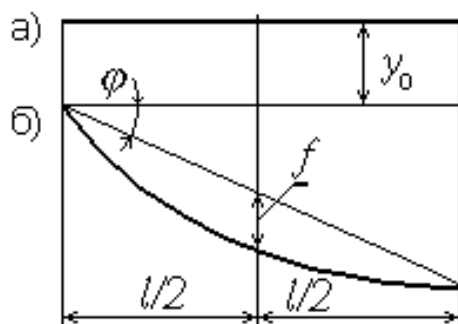


Рис. 2.4. Простейший элемент изогнутой оси стержня

Представление об изогнутой оси стержня может быть произведено на основе построения изогнутой оси по эпюре изгибающих моментов, которая показывает направление изгиба (знак кривизны) и точки перегиба (нулевые точки на эпюре M). Если добавить условия закрепления сооружения и свойства узловых соединений, то при соответствующем навыке построения изогнутых осей стержневых систем кажется не такой уж сложной задачей.

Таблица 2.3

Прогибы середины плиты $-w$ при действии равномерно распределенной нагрузки $-q$ по всей площади

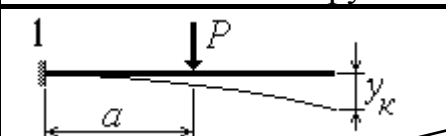

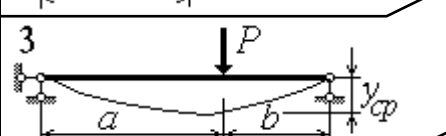
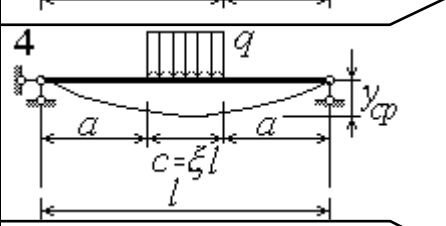
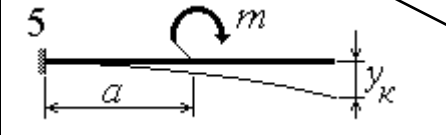
$$w = \alpha \cdot q \cdot a^4 / (D \cdot 10^4),$$

где $D = E \cdot \delta^3 / (12 \cdot (1 - \mu^2))$, δ - толщина плиты, μ - коэффициент Пуассона, E - модуль упругости, a - меньшая сторона плиты, b - большая

Закрепления контура плиты	Значения α при отношении a/b равном					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1. Свободно - опертая по контуру	101	86	73	60	50	41
2. Защемленная по контуру	25	23	21	18	15	13
3. Защемленная по двум длинным сторонам, свободно - опертая по коротким	26	25	24	23	21	19
4. Защемленная по двум коротким сторонам, свободно - опертая по длинным	84	64	48	36	26	19

Таблица 2.4

Прогибы конца консоли и середины балки на двух опорах

Схема балки и нагрузка	Формулы для определения прогибов
	$y_h = \frac{P \cdot a^2 \cdot l}{2EI} \left(1 - \frac{a}{3 \cdot l} \right)$
	$y_h = \frac{q \cdot a^3}{24EI} (4l - a)$
	$y_{cp} = \frac{P \cdot b \cdot l^2}{12EI} \cdot \left(\frac{3}{4} - \frac{b^2}{l^2} \right)$
	$y_{cp} = \frac{q \cdot l^4}{384EI} (8\xi - 4\xi^3 + \xi^4), \text{ а при}$ $\xi = 1 \rightarrow y_{cp} = \frac{5q \cdot l^4}{384EI}$
	$y_h = m \frac{a}{2 \cdot EI} (2 \cdot l - a)$

П р и м е р 2. 1. Построить схему изогнутой оси и выделить простейшие элементы изогнутой оси для балок и рам, представленных на рисунке 2.5, по заданным эпюрам изгибающих моментов.

Р е ш е н и е. В простой балке с консолью (рис. 2.5,а), судя по эпюре моментов, имеются три точки перегиба (точки А, С и D). Ввиду того, что точки С и D не закреплены, они могут перемещаться по вертикали. Отложим эти перемещения вниз и соединим полученные точки прямыми - это хорды простейших элементов (см. рис. 2.4). Эпюра моментов также показывает, что на участке AD стержень имеет выпуклость вниз, а на участке CD - вверх. В соответствии с закреплением точки В и перемещениями точек С и D через три точки проведем кривую выпуклостью вверх. На участке AD кривую изогнутой оси проведем выпуклостью вниз так, чтобы она проходила через закрепленную точку А и плавно сопрягалась в точке D с кривой на участке CD. Полученная кривая изогнутой оси показана на рисунке 2.5,а,2. По ее очертанию видно, что все параметры двух простейших элементов (перемещения и углы поворота) длиной l_1 и l_2 , будут известны, если найти перемещения точек С, D и

середины участка AD. В предельном состоянии должны быть ограничены именно эти перемещения.

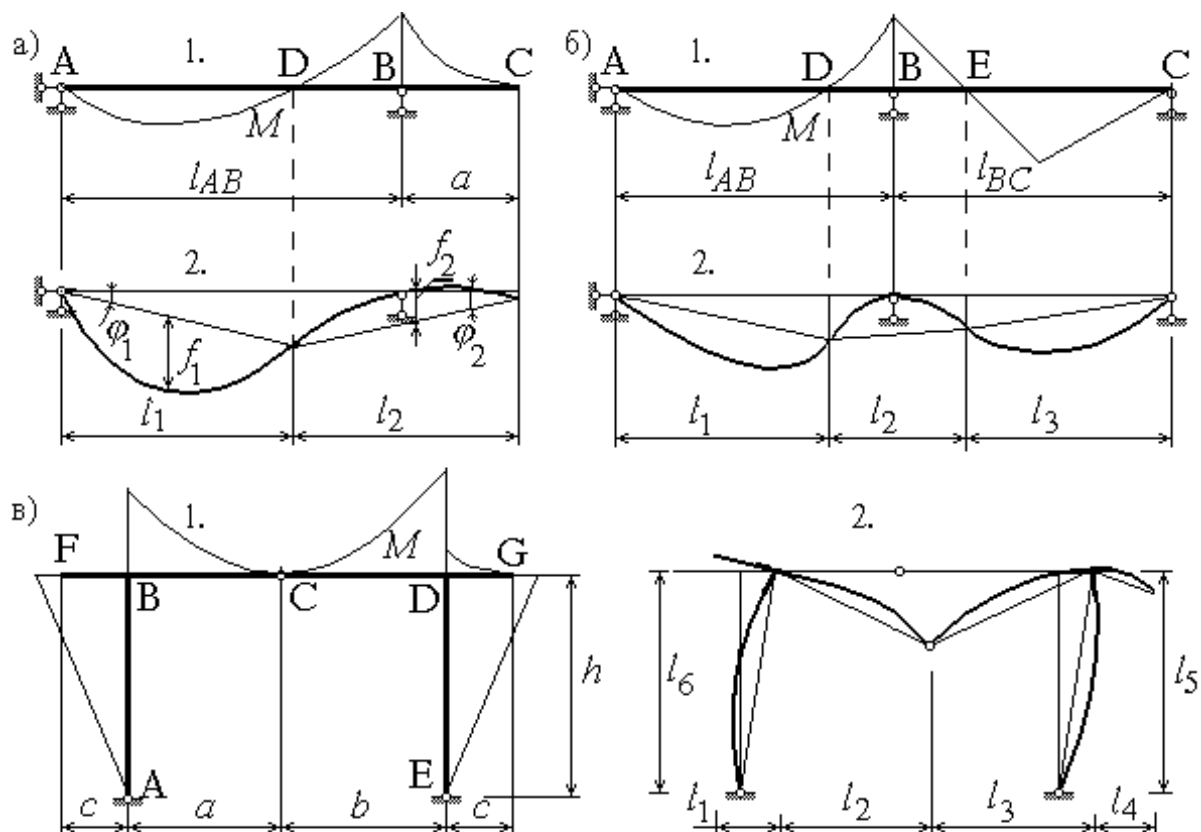


Рис. 2.5. Балки и рама

а - простая балка, б - двухпролетная балка, в - рама
 1 - схема сооружения и эпюра изгибающих моментов, 2 - схема изогнутой оси

Двухпролетная балка (рис. 2.5,б) имеет четыре точки перегиба (A, D, E и C) и, следовательно, три простейших элемента (AD, DE и EC) длиной l_1 , l_2 и l_3 . Изогнутая ось очерчивается тремя кривыми с выпуклостями в соответствии с эпюрой изгибающих моментов (AD и EC - вниз, DE - вверх). Она должна проходить через неподвижные точки на опорах. Очертание изогнутой оси определяется четырьмя перемещениями (точек E, D и середин участков AD и EC).

Возможные перемещения узлов рамы и точки перегиба осей ее стержней (рис. 2.5,в,2) показывают, что в раме выделяются шесть простейших элементов, а в соответствии с эпюрой изгибающих моментов можно наметить направление выпуклости стержней. При построении изогнутой оси примем во внимание закрепления точек A и E (опоры неподвижны), свойства жестких узлов B и D (в них концы сходящихся стержней поворачиваются на один угол) и шарнирного узла C (в нем

возможен поворот конца одного стержня относительно другого). При графическом изображении изогнутой оси учтем также, что ввиду малости перемещений и удлинений (укорочений) стержней от продольной силы, точки ригеля (включая точки В, С, D, G и F) имеют одинаковое горизонтальное смещение, а точки В и D не перемещаются по вертикали. Очертание изогнутой оси определяется горизонтальным перемещением ригеля, вертикальными перемещениями точек G, С и F, горизонтальными перемещениями середин стоек и вертикальными перемещениями середин участков ригеля ВС, CD и DF (всего девять параметров).

Пример 2.2. (для самостоятельного решения). Построить изогнутую ось сооружений, показанных на рисунке 2.6.

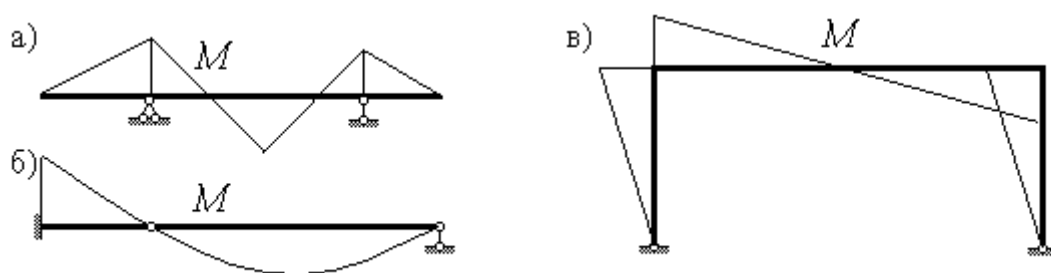


Рис. 2.6. Стержневые сооружения с эпюрами изгибающих моментов
 а - двухконсольная балка, б - шарнирно-консольная балка, в - рама

Ответ на второй вопрос (об опасной нагрузке) зависит от технологии возведения зданий и сооружений. Например, опасность растрескивания штукатурки возникает только тогда, когда она нанесена на поверхность при соответствующей ее подготовке под отделку. Обычно это происходит после монтажа основных несущих конструкций, которые под гравитационной (постоянной) нагрузкой уже деформировались и штукатурка наносится на деформированную поверхность. Штукатурка поэтому может разрушаться при недопустимых перемещениях несущих конструкций от временной или дополнительной длительнодействующей нагрузки. Чтобы поверхность оставалась плоской или сохраняла заданную форму, несущие конструкции выполняются со строительным подъемом, который ликвидируется при загрузке постоянной нагрузкой. Поэтому всякий раз при оценке жесткости с заданной целью нужно учитывать последовательность приложения нагрузки или технологию монтажа и работу оборудования и конструкций в условиях опасных деформаций.

Пример 2.3. Найти величину предельной временной распределенной нагрузки на квадратную свободно опертую плиту со стороной $a = 3.5$ м., при которой обеспечивается безопасная эксплуатация

оштукатуренной нижней поверхности. Толщина плиты $\delta = 0.1$ м. Выполнена она из материала с коэффициентом Пуассона $\mu = 0.3$ и модулем упругости $E = 20$ ГПа.

Р е ш е н и е. Временная нагрузка опасна для оштукатуренной поверхности, выполненной после монтажа плиты ввиду того, что чрезмерная деформация плиты может привести к ее растрескиванию. В соответствии с таблицей 2.2 устанавливаем предельный прогиб $w_{пр} = a/350 = 3.5 / 350 = 0.01$ м.

Из таблицы 2.3 находим, что для квадратной ($a = b$) свободно опертой плиты прогиб равен

$$w_{раб} = 0.0041 \cdot q_{раб} \cdot a^4 / D = 0.0041 \cdot q_{раб} \cdot 3.5^4 / 1832 \cdot 10^5 = 33,6 \cdot 10^{-10} q_{раб} \leq w_{пр},$$

где $D = E \cdot \delta^3 / (12 (1 - \mu^2)) = 20000000000 \cdot 0.1^3 / (12 (1 - 0.3^2)) = 1832 \cdot 10^5$ Н/м.

Зная предельный прогиб найдем предельную нагрузку

$$q_{пр} = w_{пр} / 33,6 \cdot 10^{-10} = 0.01 / 33,6 \cdot 10^{-10} = 2976811 \text{ Па} \approx 3 \text{ МПа}.$$

П р и м е р 2.5. Оценить жесткость каркаса открытой крановой эстакады (рис. 2.7) склада готовой продукции завода железобетонных изделий. Требования эксплуатации кранов (см. табл. 2.1 и 2.2) устанавливают допустимое отклонение крановых путей по вертикали при шестиметровом шаге колонн 1.2 см, а вдоль путей и поперек их по горизонтали при пятиметровой высоте колонны - 0.1 см. Подкрановые балки разрезные и опираются на колонны. Выполнен каркас из металла с модулем упругости 200 ГПа. Эстакада оборудована двумя кранами грузоподъемностью пять тонн. Возможна синхронная работа кранов при подъеме изделий до десяти тонн. Максимальное давление на колесо крана 40 кН, минимальное - 15 кН. Максимальное тормозное усилие при торможении тележки с грузом, приходящееся на одно колесо, равно 5.5 кН.

Р е ш е н и е. Определим вначале геометрические параметры сечений колонны, подкрановой тормозной балки, составленных из элементов, характеристики которых известны (см. рис. 2.7) :

момент инерции подкрановой балки относительно горизонтальной оси :

$$I_{xI} = 0.016 \cdot 1.156^3 / 12 + 2 (0.5 \cdot 0.022^3 / 12 + 0.5 \cdot 0.022 \cdot 0.589^2) = 0.00969 \text{ м}^4;$$

момент инерции колонны в плоскости ее изгиба из плоскости ряда колонн

$$I_{x2} = 0.016 \cdot 0.768^3 / 12 + 2 (0.5 \cdot 0.016^3 / 12 + 0.5 \cdot 0.016 \cdot 0.392^2) = 0.00287 \text{ м}^4;$$

момент инерции тормозной балки относительно вертикальной оси I_{x3} при расстоянии от стенки швеллера до центра тяжести сечения

$$y_c = (20.7 \cdot 1.94 + 2.2 \cdot 50 \cdot 80 + 1.6 \cdot 60 \cdot 30) / (20.7 + 2.2 \cdot 50 + 1.6 \cdot 60) = 51.7 \text{ см},$$

$$I_{x3} = 0.022 \cdot 0.5^3 / 12 + 0.022 \cdot 0.5 \cdot (0.8 - 0.517)^2 + 0.016 \cdot 0.6^3 + 0.016 \cdot 0.6 \cdot (0.517 - 0.3)^2 + 0.00000086 + 0.00206 \cdot (0.517 - 0.0194)^2 = 0.00553 \text{ м}^4.$$

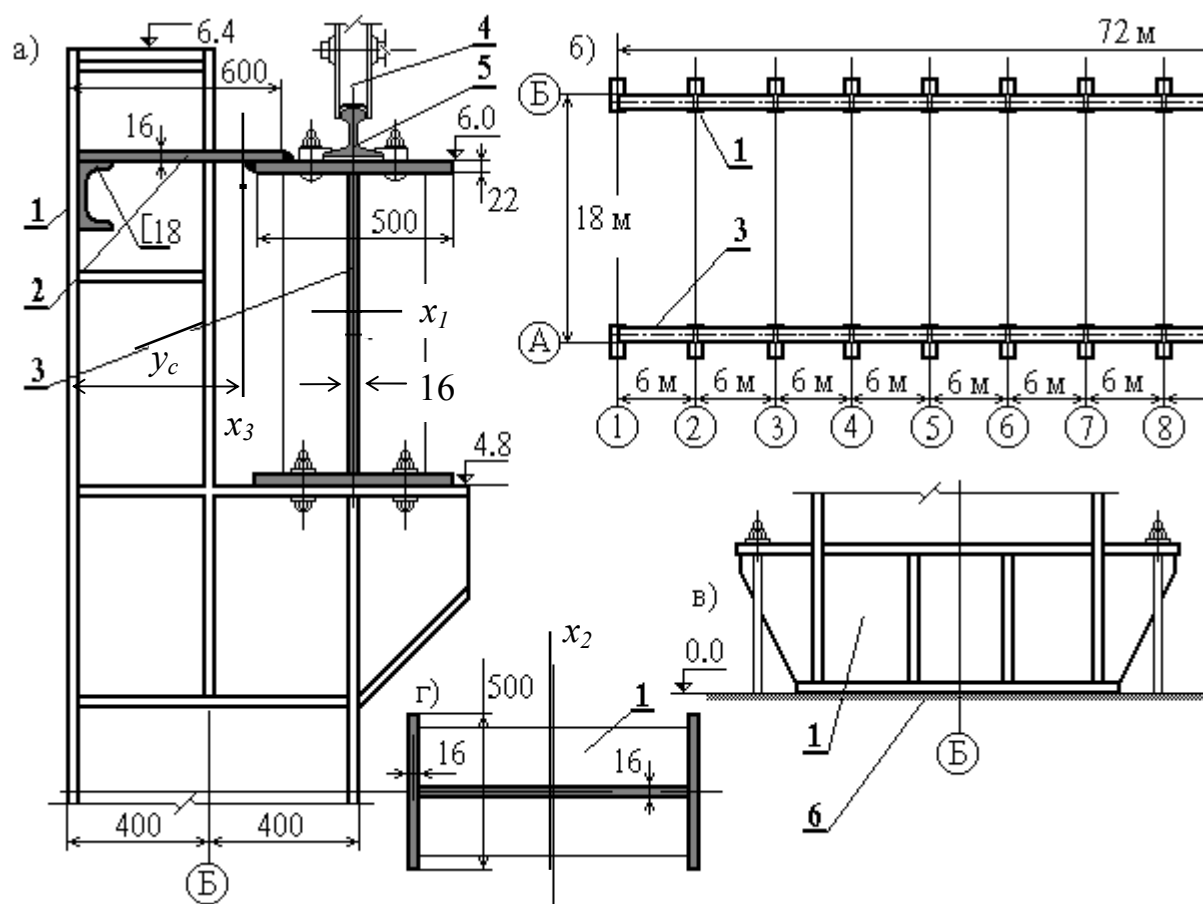


Рис. 2.7. Эстакада склада готовой продукции
завода железобетонных изделий

- а - крепление подкрановой балки и колонны, б - план эстакады,
в - башмак колонны, г - сечение колонны,
1 - колонна, 2- тормозная балка, 3 - подкрановая балка,
4 - колесо крана, 5 - рельс, 6- фундамент

По формулам таблицы 2.4 найдем перемещения (см. рис. 2.8)

$$\delta_1 = 11 \cdot 6^3 / (3 \cdot 200000000 \cdot 0.00287) - 32 \cdot 4.8 \cdot (2 \cdot 6 - 4.8) / (2 \cdot 200000000 \cdot 0.00287) = 0.00048 \text{ м},$$

$$\delta_2 = 5.5 \cdot 3.6 \cdot 6^2 (3/4 - 3.6^2 / 6^2) / (12 \cdot 200000000 \cdot 0.00553) + 5.5 \cdot 2.4 \cdot 6^2 \cdot (3/4 - 2.4^2 / 6^2) / (12 \cdot 200000000 \cdot 0.00553) = 0.00004 \text{ м},$$

$$\delta_3 = 40 \cdot 3.6 \cdot 6^2 (3/4 - 3.6^2 / 6^2) / (12 \cdot 200000000 \cdot 0.00553) + 40 \cdot 2.4 \cdot 6^2 (3/4 - 2.4^2 / 6^2) / (12 \cdot 200000000 \cdot 0.00553) = 0.00030 \text{ м}.$$

Сравним рабочие перемещения и допустимые:

горизонтальное перемещение поперек кранового пути

$$\delta_1 + \delta_2 = 0.00048 + 0.00004 = 0.00052 \text{ м} = 0.052 \text{ см} < \delta_{np} = 0.1 \text{ см},$$

вертикальное перемещение

$$\delta_3 = 0.0003 \text{ м} = 0.03 \text{ см} < \delta_{np} = 1.2 \text{ см}.$$

Таким образом, несущий каркас эстакады запроектирован с достаточной для эксплуатации кранов жесткостью.

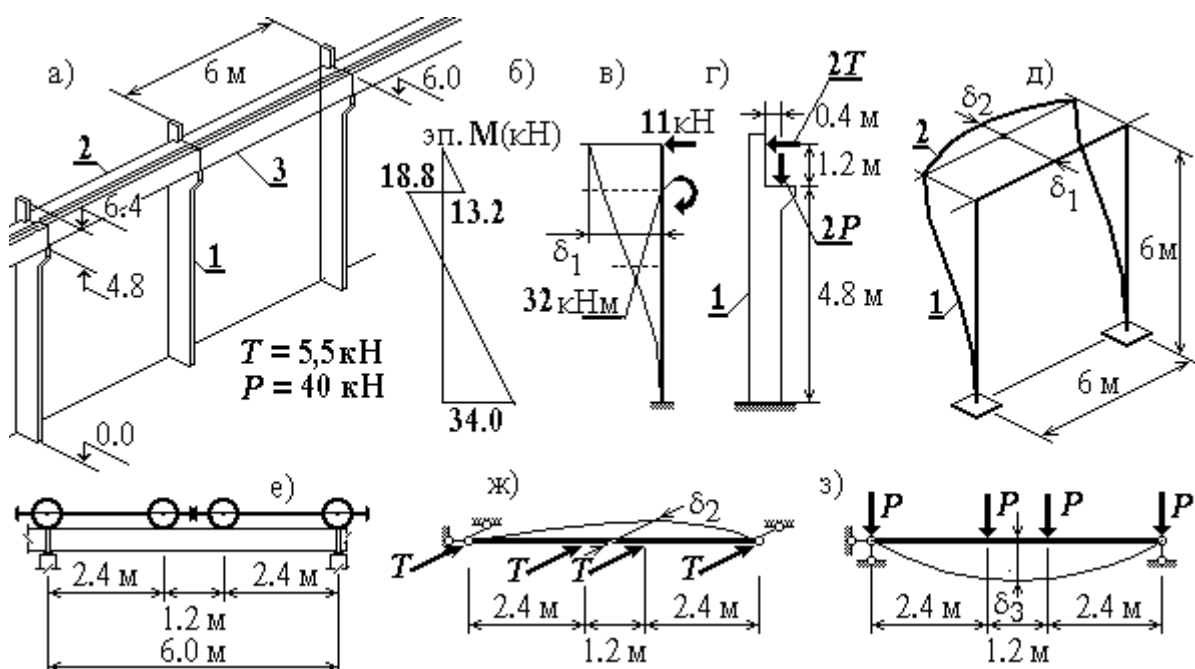


Рис. 2.8. Расчетные схемы элементов эстакады и нагрузка от кранов

а - схема сопряжения подкрановых, тормозных балок и колонн;

б - изгибающие моменты в колонне; г, в - нагрузка, приложенная к колонне, приведение ее к оси; д - схема деформации колонны и балки (перемещение рельса);

е - положение колес двух кранов при совместной их работе; ж - приложение к тормозной балке усилий торможения и схема ее деформирования;

з - тоже при действии вертикальной нагрузки;

1 - колонна, 2 - тормозная балка, 3 - подкрановая балка