

Проверка прогибов висячего элемента принятого сечения при загрузке временной нагрузкой всего пролета:

$$\frac{\Delta y}{l} = \frac{3(0,1206 + 0,1200) 7200}{128 \cdot 1,5 \cdot 10^4 \cdot 48,18 + 2,1 \cdot 10^4 \cdot 91} \cdot 1,625 \cdot 64 = \frac{1}{624} < \frac{1}{600}$$

*Сопоставление стоимости висячего элемента, выполненного полностью из стальных канатов и в виде составного сечения.* Стоимость 1 м стальных канатов первого варианта при стоимости 1 т — 500 руб.,  $\psi_1 = 1,3$  (учитывается масса концевых креплений)

$$C = (7 \cdot 17,28 \cdot 1,3 \cdot 500) / 1000 = 78,62 \text{ руб.}$$

Стоимость 1 т проката примем 200 руб.,  $\psi_2 = 1,15$ .

$$C = 2 \cdot 17,28 \cdot 1,3 \cdot 500 + 91 \cdot 1,15 \cdot 200 / 1000 = 43,39 \text{ руб.,}$$

что составляет 55% стоимости первого варианта.

Масса 1 м: первого варианта 169 кг, второго — 127,3 кг, что определяет экономию металла 25%. Таким образом, в первом приближении выполнена компоновка составного сечения висячего элемента — верхнего пояса покрытия.

## Глава 2. РАСЧЕТ ВИСЯЧИХ КОМБИНИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИЙ ВЛИЯНИЯ

Особенность расчета висячих комбинированных внешне распорных систем типа "балка—нить", в которых распор передается на внешние фундаменты, состоит в необходимости учитывать геометрическую нелинейность. Последняя возникает вследствие того, что по мере загрузки конструкции временной нагрузкой изменяется ее геометрическая схема — увеличиваются стрелки провеса висячего элемента, изменяется первоначальное его очертание, так как гибкий висячий элемент приспосабливается к новой нагрузке, занимая новое равновесное положение, наблюдается некоторый наклон колонн внутрь пролета вследствие удлинения оттяжек и т.п. Все это происходит в весьма малых пределах, но определенным образом влияет на перераспределение усилий в элементах конструкции.

Если в традиционных жестких фермах или балках этими малыми изменениями геометрической схемы можно обоснованно пренебречь, то во внешнераспорных висячих комбинированных (и в гибких арочных) системах, в которых результаты расчета (искомый прогиб или изгибающий момент) являются малыми разностями больших чисел, пренебрегать изменениями схемы нельзя. При этом учет геометрической нелинейности арочных и других сжато-изгибаемых конструкций дает несколько увеличенный (до 5%) результат расчета по сравнению с линейным расчетом, а учет прогибов в висячих и растянуто-изгибаемых конструкциях позволяет выявить запасы по прочности до 30–40% по сравнению с расчетом, выполненным по линейной схеме [1, 7, 15, 43].

Теоретические предпосылки данного метода расчета обычны для нормальных условий эксплуатации конструкций — принимается упругая работа материала, малые прогибы балок — в пределах допустимых нормами величин, статическое приложение временной нагрузки. Предполагается также, что постоянная нагрузка во время монтажа полностью передается на висячий элемент, а балка жесткости участвует в восприятии лишь временной нагрузки.

## 2.1. МЕТОД РАСЧЕТА

**Расчетные уравнения.** Предлагаемая методика расчета висячих комбинированных систем не является единственно возможной. Известны и детально разработаны численные методы расчета, реализуемые с помощью вычислительных машин с большой оперативной памятью [33]. Для данного способа расчета с учетом прогибов, вполне отвечающего современным требованиям, предъявляемым к его точности и оперативности, требуются машины средней мощности, широко распространенные в практике.

Дифференциальное уравнение изгиба висячей комбинированной системы запишем в следующем виде [1, 7, 15, 33]

$$\eta^{IV}(x) - l^2 \frac{H_q + H_p}{EI} \eta''(x) = \frac{pl^4}{EI} [1 - \alpha(\xi)], \quad (2.1)$$

где  $l$  — пролет балки и висячего элемента (рис. 2.1);  $\eta(x)$  — относительный прогиб балки (дополнительный провес каната относительно пролета);  $x$  — относительная абсцисса сечения ( $0 \leq x \leq 1$ );  $EI$  — изгибная жесткость балки, постоянная по длине пролета;  $H_q$  — распор в канате от постоянной нагрузки  $q$ .

Если способ монтажа обеспечивает передачу всей постоянной нагрузки на висячий элемент, то

$$H_q = ql^2 / (8f), \quad (2.2)$$

где  $H_p$  — распор от временной нагрузки  $p$ .

Нелинейность уравнения (2.1) состоит в том, что распор  $H_p$  зависит от прогибов:

$$H_p = \alpha(\xi) pl^2 / (8f), \quad (2.3)$$

где  $f$  — стрела начального провеса каната;  $\alpha(\xi)$  — коэффициент, с помощью которого вычисляется распор от временной одиночной нагрузки, расположенной в сечении балки с абсциссой  $\xi$  ( $0 \leq \xi \leq 1$ ), или от распределенной по балке нагрузки в пределах  $a - b$  ( $0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1$ ).

Для определения  $\alpha(\xi)$  выполняют расчет статически неопределимой системы "балка—нить" методом последовательных приближений и линеаризации параметра ( $H_p = \text{const}$ ) на каждой стадии приближения.

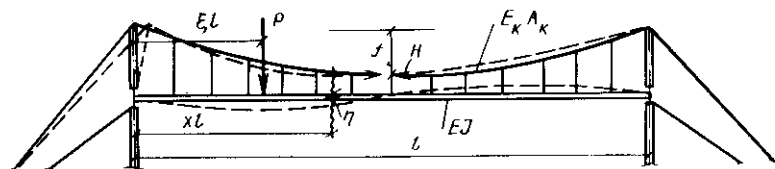


Рис. 2.1. Расчетная схема ригеля

Цель итерационного расчета — уточнение расчетного параметра  $r$ , который в теории висячих мостов называется коэффициентом деформативности, равным квадратному корню из коэффициента перед вторым членом левой части уравнения (2.3):

$$r = l \sqrt{\frac{H_q + H_p}{EI}} \quad (2.4)$$

Сходимость итерационного процесса весьма быстрая — после двух-трех приближений значения параметра  $r$  становятся устойчивыми. Окончательные усилия, изгибающие моменты и прогибы могут быть найдены при постоянных значениях  $r$  методами линейного расчета.

Сложность расчета многократно статически неопределимых висячих комбинированных конструкций состоит в том, что даже в линейной постановке задачи ( $r = 0$ ) изгибные перемещения в подобных системах не могут быть вычислены методом Верещагина, так как все эпюры изгибающих моментов имеют криволинейное очертание, поэтому для расчета рассматриваемых схем следует воспользоваться либо численными методами [33], либо функциями влияния (функциями Грина) [1, 15]. Последняя методика с применением универсальных функций, одновременно имеющих свойства линий влияния и эпюр любых местных нагрузок, наиболее эффективна при проектировании покрытий производственных зданий, которые испытывают воздействия подвижных нагрузок от подвесных крановых и деформации которых описываются сложным уравнением.

Учет геометрической нелинейности (при  $r \neq 0$ ) позволяет выявить в данных висячих внешнераспорных схемах дополнительные запасы прочности и жесткости (до 30–40%) по сравнению с линейным расчетом. Эти запасы тем больше, чем больше коэффициент деформативности, т.е. чем больше постоянная нагрузка и предельные прогибы, принятые при проектировании конструкции, а также чем меньше стрела провеса висячих элементов. На рис. 2.2 приведены графики поправочных коэффициентов к линейному расчету прогибов (рис. 2.2, а) и изгибающих моментов (рис. 2.2, б) простейшей схемы "балка-нить" и систем повышенной жесткости (рис. 2.2, в, г), в которых распор передается на внешние анкерные фундаменты (без передачи на балку жесткости).

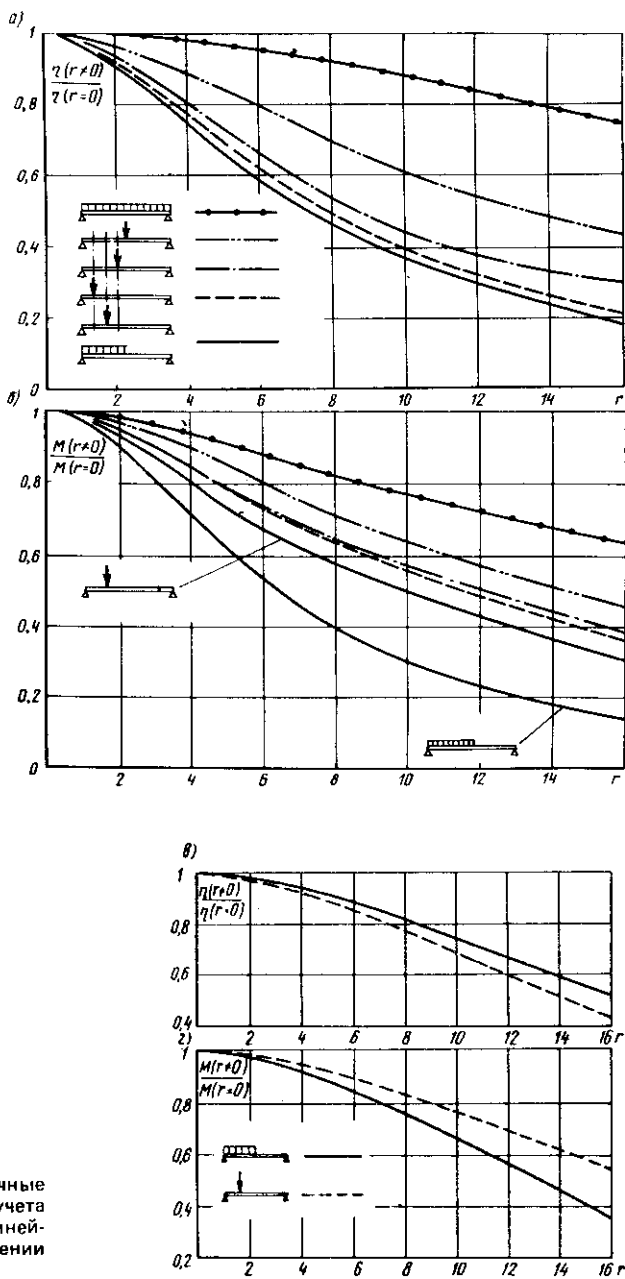


Рис. 2.2. Поправочные коэффициенты для учета геометрической нелинейности при определении прогибов

Из графиков поправочных коэффициентов следует, что учет прогибов имеет существенное значение для конструкций, характеризующихся коэффициентом деформативности  $r > 3$  (формула 2.4), т.е. для покрытий средних и больших пролетов с гибкой балкой. Расчет, проведенный по нелинейной схеме, позволяет выявить запасы жесткости и прочности конструкций в соответствии с рис. 2.2.

Для уточненного расчета висячих комбинированных ригелей в рамках с передачей распора на концы балок жесткости левая часть уравнения (2.1) должна быть изменена, так как уравнение изгиба сжатой балки в отличие от предыдущего получит вид:

$$EI \frac{d^4 \eta}{l^4 dx^4} + N \frac{d^2 \eta}{l^2 dx^2} = p - z, \quad (2.5)$$

где  $N$  — осевое усилие сжатия балки жесткости.

Величина этого усилия зависит от конструктивной схемы рамы и анкерных устройств. Так, для рам, в которых усилие от оттяжки передается на подколонный фундамент (см. рис. 1.1),

$$N = (H_q + H_p) h_2 / h_1, \quad (2.6)$$

где  $h_1$ ,  $h_2$  — расстояния соответственно от нижней опоры колонны до оси балки жесткости и до опирания канатов на колонну.

Для схемы, представленной на рис. 1.18, при определении  $N$  учитываются горизонтальные составляющие в оттяжке и раскосе, т.е.  $N > H_q + H_p$ . Если раскоса нет, а имеется лишь вертикальная оттяжка, то

$$N = H_q + H_p. \quad (2.7)$$

Такой же результат имеем, если используется балансир-противовес (см. рис. 1.20), но горизонтальная составляющая передается не на наклонную колонну, а на распорку, соединяющую конец оттяжки с балкой жесткости. Уравнение сжато-изгибаемого элемента записывается аналогично уравнению (2.1) [15]:

$$\eta^{IV}(x) + l^2 \frac{N - H_q - H_p}{EI} \eta''(x) = \frac{pl^4}{EI} (1 - a). \quad (2.8)$$

Таким образом, коэффициент деформативности (2.4) может быть записан в виде:

$$u = l \sqrt{\frac{N - H_q - H_p}{EI}}. \quad (2.9)$$

Учет геометрической нелинейности в сжато-изгибаемых конструкциях имеет обратный эффект расчету растянуто-изгибаемого элемента, т.е. уточнение дает несколько большие (на 3–5%) прогибы и изгибающие моменты, чем результаты, полученные с помощью линейного расчета. Значения коэффициента деформативности в сжато-изгибаемых элементах не превышает 2–2,5 (при  $\mu = 3,14$  элемент теряет устойчивость по двум полуволнам). Таким образом, при расчете схем с передачей распора на балку жесткости нелинейностью можно пренебречь.

**Формулы функций влияния.** Для вывода формул функций влияния используется метод начальных параметров, который позволяет учесть наличие шарниров в принятой расчетной схеме, т.е. воспользоваться аналогией дифференциальных уравнений висячих комбинированных систем с растянутой балкой. Необходимость расчета висячих комбинированных конструкций с шарнирами в пролете определяется тем, что нередко при монтаже, а также и при нормальной эксплуатации сооружения шарниры вводят для уменьшения изгибающих моментов в балке или для полного освобождения растянутой балки или жесткой нити в заданных сечениях от изгибающих моментов. Так например, монтажные шарниры были введены в жесткие растянутые фермы покрытия олимпийского бассейна в Москве [8, 16]. Растянуто-изогнутые балки высотой 72 см, пролетом 60 м использованы в качестве основных элементов покрытия плавательного бассейна "Пионер" в Харькове [16]. В вантовых мостах, неизменяемость которых обеспечивается многостержневыми вантовыми фермами, введение шарниров в балку жесткости позволяет значительно ее облегчить, немного увеличивая деформативность сооружения. Введение шарниров неизбежно при монтаже протяженных конструкций с применением жестких нитей в качестве несущих элементов и т.п.

Прогиб висячей комбинированной системы с шарнирами в пролете (рис. 2.3) на незагруженной части пролета может быть записан в виде<sup>1</sup>

$$\eta(x) = \frac{Pl^3}{EI\gamma} \frac{(1-\xi)x}{r^2}, \quad (2.10)$$

или, обозначая переменный сомножитель как функцию влияния  $\Phi_1(x, \xi)$ , получим при  $x \leq a_k \leq \xi$  функцию и ее производные по  $x$ :

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1(x, \xi) &= \frac{(1-\xi)x}{r^2}; \\ \Phi_1'(x, \xi) &= \frac{1-\xi}{r^2}; \\ \Phi_1''(x, \xi) &= \Phi_1''' = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

<sup>1</sup> Кирсанов Н.М. Функции влияния для расчета висячих комбинированных конструкций и балок с шарнирами в пролете. — Строительная механика и расчет сооружений, № 5, 1985, с. 8–10.

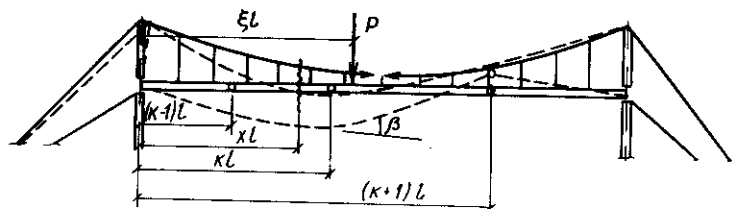


Рис. 2.3. Расчетная схема ригеля с шарнирами в балке

На загруженном звене слева от груза при  $a_k \leq x \leq \xi$ :

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1(x, \xi) &= \frac{1}{r^3} \left[ r x (1 - \xi) - \frac{\text{sh } r(x - a_k)}{\text{sh } r(a_{k+1} - a_k)} \text{sh } r(a_{k+1} - \xi) \right]; \\ \Phi_1'(x, \xi) &= \frac{1}{r^2} \left[ 1 - \xi - \frac{\text{ch } r(x - a_k)}{\text{sh } r(a_{k+1} - a_k)} \text{sh } r(a_{k+1} - \xi) \right]; \\ \Phi_1''(x, \xi) &= - \frac{\text{sh } r(x - a_k)}{r \text{sh } r(a_{k+1} - a_k)} \text{sh } r(a_{k+1} - \xi); \\ \Phi_1'''(x, \xi) &= - \frac{\text{ch } r(x - a_k)}{\text{sh } r(a_{k+1} - a_k)} \text{sh } r(a_{k+1} - \xi). \end{aligned} \right\} (2.12)$$

Справа от груза на том же звене получим для  $a_k \leq \xi \leq x \leq a_{k+1}$ :

$$\Phi_1(\xi, x) = \frac{1}{r^3} \left[ r \xi (1 - x) - \frac{\text{sh } r(\xi - a_k)}{\text{sh } r(a_{k+1} - a_k)} x \right. \\ \left. x \text{sh } r(a_{k+1} - x) \right]. \quad (2.13)$$

И, наконец, справа от шарнира  $a_{k+1}$  на незагруженных звеньях найдем для  $\xi \leq a_{k+1} \leq x$ :

$$\Phi_1(\xi, x) = \frac{\xi(1-x)}{r^2}. \quad (2.14)$$

Для расчета висячих комбинированных систем требуются функция влияния нагрузки, равномерно распределенной на всем пролете  $\Phi_2(x)$ , с ее производными по  $x$  и интеграл этой функции  $\Phi_3$ :

$$\Phi_2(x) = \int_0^x \Phi_1(\xi, x) d\xi + \int_x^1 \Phi_1(x, \xi) d\xi; \quad (2.15)$$

$a_k \leq x \leq a_{k+1}$  (произвольное звено):

$$\Phi_2(x) = \frac{1}{r^3} \left\{ rx \frac{1-x}{2} - \frac{1}{r} + \frac{\operatorname{ch} r \left[ x - \frac{1}{2} (a_k + a_{k+1}) \right]}{r \operatorname{ch} \frac{r}{2} (a_{k+1} - a_k)} \right\}; \quad (2.16)$$

$$\Phi_3 = \int_0^1 \Phi_2(x) dx = \frac{1}{r^3} \left[ \frac{r}{12} - \frac{1}{r} + \frac{2}{r^2} x \sum_{k=0}^m \operatorname{th} r \frac{a_k - a_{k-1}}{2} \right], \quad (2.17)$$

где  $m$  — номер последнего (опорного) шарнира, если левый опорный шарнир принимается за нулевой.

Выведенные формулы функций влияния, применимые к расчету висячих комбинированных систем, жестких нитей, а также растянутых балок, являются обобщенными по отношению к соответствующим функциям влияния, приведенным в [15], где рассмотрен расчет висячих систем, которые имеют балки лишь с двумя шарнирами, т.е. балки, имеющие шарниры только на опорах.

Приведенные здесь формулы соответствуют [15] при  $a_k = 0$ ,  $a_{k+1} = 1$ . При линейной постановке задачи, положив второе слагаемое в левой части уравнения (2.1) равным нулю, т.е. принимая дифференциальное уравнение изгиба простой балки  $r = 0$ , аналогично найдем функции влияния при  $r = 0$ . Их также можно получить из выведенных здесь формул, если при  $a_k = 0$ ,  $a_{k+1} = 1$  разложить гиперболические функции в степенной ряд и положить  $r = 0$ .

При  $x \leq \xi$ :



$$\left. \begin{aligned} \Phi_1(x, \xi) &= \frac{1}{6} x(1-\xi)(2\xi - \xi^2 - x^2); \\ \Phi_1'(x, \xi) &= 1/6(1-\xi)(2\xi - \xi^2 - 3x^2); \\ \Phi_1''(x, \xi) &= -x(1-\xi); \\ \Phi_1'''(x, \xi) &= -1 + \xi. \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

При  $\xi \leq x$ :

$$\Phi_1(\xi, x) = \frac{1}{6} \xi(1-x)(2x - x^2 - \xi^2); \quad (2.19)$$

$$\Phi_2(x) = \frac{1}{24} (x - 2x^3 + x^4); \quad (2.20)$$

$$\Phi_3 = 1/120. \quad (2.21)$$

К линейному расчету задача может сводиться: условно при начальном проектировании внешнебезраспорных конструкций, т.е. с передачей распора от висячего элемента на балку жесткости через систему подкосов и распорок (может приниматься  $r = 0$ ); в случае, если комбинированная система имеет в своем составе как висячие, так и арочные элементы (рис. 2.4), распоры от которых либо взаиморавны, либо очень близки по величине. При этом равенство распоров противоположных знаков обуславливает равенство нулю коэффициента деформативности ( $r = 0$ ).

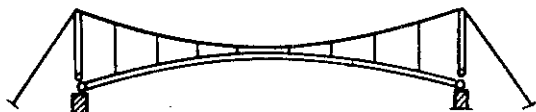
При уточненном расчете внешнебезраспорных схем, т.е. с передачей распора на балку жесткости (см. рис. 1.1), в исходном дифференциальном уравнении изгиба системы (2.1) принимается знак плюс перед вторым членом в левой части уравнения. Прodelываются аналогичные вышеприведенным выкладки для схемы с двумя шарнирами на опорах и выводятся формулы функций влияния с ее производными по  $x$  для расчета сжатых балок, арок и комбинированных систем типа "балка-гибкая арка" [15].

При  $\xi \leq x$ :

$$\Phi_1(\xi, x) = \frac{1}{u^3} \left[ \frac{\sin u\xi}{\sin u} - \sin u(1-x) - \xi u(1-x) \right]. \quad (2.22)$$

При  $x \leq \xi$ :

Рис. 2.4. Покрытие с арочным элементом жесткости



$$\Phi_1(x, \xi) = \frac{1}{u^3} \left[ \frac{\sin ux}{\sin u} \sin u(1-\xi) - xu(1-\xi) \right]; \quad (2.23)$$

$$\Phi_2(x) = \frac{1}{u^3} \left[ \frac{\cos u(1/2-x)}{u \cos(u/2)} - \frac{ux}{2} (1-x) - \frac{1}{u} \right]; \quad (2.24)$$

$$\Phi_3 = \frac{1}{u^3} \left[ \frac{2 \operatorname{tg}(u/2)}{u^2} - \frac{1}{u} - \frac{u}{12} \right]. \quad (2.25)$$

## 2.2. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СИСТЕМ ПОКРЫТИЙ

Принятая линеаризация расчета, основанная на методе последовательных приближений, на каждой стадии которого распор в висячем элементе от временных нагрузок считается постоянным, допускает использование для расчета теоретических положений строительной механики линейно деформируемых систем. При этом итерационный процесс необходим лишь для определения распора в висячем элементе, после чего прогибы системы, изгибающие моменты в балке и другие расчетные величины вычисляются при зафиксированном распоре, а следовательно, при постоянном коэффициенте деформативности в уравнении (2.1) линейными методами из равновесия балки и висячего элемента.

С помощью выведенных формул функций влияния и при зафиксированном коэффициенте деформативности для расчета статически неопределимых систем конструкций покрытий и каркасов прием метод сил. Матрицы единичных и грузовых перемещений системы канонических уравнений определяют в зависимости от значения коэффициента при втором члене дифференциального уравнения (2.1), описывающего напряженное состояние элемента каркаса с соответствующим видом функции влияния. Так, изгибные перемещения висячих комбинированных ригелей в зависимости от способа передачи распора описываются функциями при  $r \neq 0$  или  $r = 0$ , колонны и другие элементы всегда при  $r = 0$  и т.п.

Перемещения вычисляют на ЭВМ в автоматическом режиме по заданной основной функции влияния, операции с которой ЭВМ производит в зависимости от вида воздействия. Так, интегрирование ведется по  $\xi$  для распределенных нагрузок, дифференцирование по  $\xi$  —

для воздействий моментов и в зависимости от вида деформаций, для определения углов поворота — дифференцирование по  $x$  и т.п. При неравномерно распределенных по известному закону воздействиях в подынтегральное выражение при определении перемещений входит не только функция влияния, но и закономерность распределения нагрузки. Обычное очертание всячего элемента в соответствии с его провесом под действием равномерно распределенной постоянной нагрузки принимается по параболе, и разгружающее воздействие подвесок на балку при малых прогибах считается равномерным.

Для примера использования методики расчета рассмотрим определение распора в всячем элементе от временной нагрузки, а также определение прогибов и изгибающих моментов в системе "балка—нить" (см. рис. 2.1). Для вычисления распора  $H_p$  запишем каноническое уравнение метода сил:

$$\delta_{11} H_p + \Delta_{1p} = 0, \quad (2.26)$$

где  $\Delta_p$  — грузовое перемещение, которое на основании  $\Delta_{1p} = \Delta_{p1}$  при положении одиночного груза  $P = 1$  в пролете с ординатой  $\xi \downarrow$  определим как перемещение по направлению  $P = 1$  от единичного распора, создающего в подвесках равномерно распределенную нагрузку  $z_0$ , т.е.

$$\Delta_{1p} = - \frac{z_0 l^4}{EI} \int_0^1 \Phi_1(x, \xi) dx = - \frac{z_0 l^4}{EI} \Phi_2(\xi), \quad (2.27)$$

$l, E, I$  — пролет и изгибная жесткость балки;  $\Phi_1(x, \xi), \Phi_2(\xi)$  — функции влияния при положении одиночного груза в сечении с ординатой  $\xi \downarrow$  и при определении прогибов на расстоянии  $x \downarrow$  от левой опоры; (функция с индексом 1 используется при расчете на действие одиночного груза, с индексом 2 — при расчете на равномерно распределенные нагрузки по всему пролету);  $z_0$  — принимается при очертании всячего элемента по квадратной параболе:

$$z_0 = l d^2 y / (dx^2) = 8f/l; \quad (2.28)$$

$f$  — стрела провеса всячего элемента в середине пролета;  $\delta_{11}$  — перемещения в разрезе нити от единичного распора, приложенного в этом же разрезе; представим как перемещения в шарнирной балке от нагрузки  $z_0$  по направлению той же нагрузки  $z_0$ :

$$\delta_{11} = \frac{z_0^2 l^5}{EI} \int_0^1 \Phi_2 d\xi + \frac{L_0}{E_1 A_1} = z_0^2 \frac{l^5}{EI} \Phi_3 + \frac{L_0}{E_1 A_1}; \quad (2.29)$$

$\Phi_3$  — функция влияния [15];  $L$  — приведенная длина всячего элемента с учетом анкерных оттяжек;  $E_1 A_1$  — модуль упругости материала, из которого выполнен всячий элемент и площадь его сечения.

Преобразуем формулу перемещений (2.29) к виду, удобному для итерационного расчета:

$$\delta_{11} = z_0^2 \frac{l^2}{EI} \left( \Phi_3 + \frac{EI}{E_1 A_1 l^2} \frac{L}{l} \frac{l^2}{64f^2} \right). \quad (2.30)$$

Обозначим второе слагаемое, стоящее в скобках формулы (2.30), через  $n_1$ :

$$n_1 = \frac{EI}{E_1 A_1 l^2} \cdot \frac{L}{l} \cdot \frac{l^2}{64f^2} = n_0 \frac{L}{l} \cdot \frac{l^2}{64f^2}; \quad (2.31)$$

$$n_0 = EI / (E_1 A_1 l^2). \quad (2.32)$$

Таким образом, из (2.26) получим

$$H_p = - \frac{\Delta_{1p}}{\delta_{11}} = - \frac{\Phi_2(\xi) PL}{\Phi_3 + n_1} \cdot \frac{l}{8f} = \alpha(\xi) P \frac{l}{8f}, \quad (2.33)$$

где  $n_1$  — параметр, характеризующий соотношение упругих удлинений висячих элементов и изгибных деформаций балок. Этот безразмерный параметр в основном зависит от величины пролета конструкции, так как с последним связано большинство характеристик, определяющих расчетные параметры сооружения;  $\alpha(\xi)$  — коэффициент, с помощью которого определяется распор от временной нагрузки.

Например, при равномерно распределенной нагрузке

$$H_p = \alpha (pl^2 / (8f)). \quad (2.34)$$

Определив  $H_p$  методом последовательных приближений и по (2.4) уточненный коэффициент деформативности  $\gamma$ , можем найти искомые прогибы, углы поворота касательной к оси балки, изгибающие моменты в ней и поперечные силы от действия одиночного груза:

$$\left. \begin{aligned} \eta(x) &= \frac{Pl^3}{EI} [ \Phi_1(x, \xi) - \alpha(\xi) \Phi_2(x) ]; \\ \varphi(x) &= \frac{Pl^2}{EI} [ \Phi_1'(x, \xi) - \alpha(\xi) \Phi_2'(x) ]; \\ M(x) &= -Pl [ \Phi_1''(x, \xi) - \alpha(\xi) \Phi_2''(x) ]; \\ Q(x) &= -P [ \Phi_1'''(x, \xi) - \alpha(\xi) \Phi_2'''(x) ]. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

При загрузении пролета распределенными нагрузками выполняют интегрирование (2.35) по  $\xi$  на участке загрузки.

**Компоновочные параметры.** Выделение характеристик  $n_1$  (2.31) и  $\alpha(\xi)$  (2.33) позволяет управлять компоновкой сооружения без существенного изменения порядка расчета для достижения необходимой жесткости и прочности проектируемого покрытия на всех стадиях проектирования конструкции. После дальнейшего совершенствования

компоновочной схемы покрытия и уточнения сечений элементов возможен учет пространственной работы и нелинейности расчетной схемы сооружения. Так, варьируя величиной характеристики  $n_1$ , можно, например, выбрать такие значения геометрических и физических параметров системы, входящих в характеристику  $n_1$ , при которых упругие и кинематические прогибы покрытия будут равны или находиться в определенных соотношениях.

Выделим еще один компоновочный параметр, который следует из формулы (2.34). При загрузении всего пролета равномерно распределенной нагрузкой выражение (2.33) примет вид:

$$\alpha = \Phi_3 / (n_1 + \Phi_3). \quad (2.36)$$

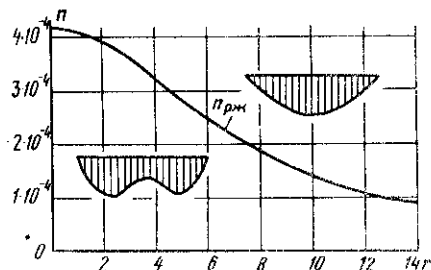
Н.С. Стрелецкий назвал выражение  $\alpha$  коэффициентом распределения, определяющим передачу части равномерно распределенной по всему пролету временной нагрузки на висячий элемент. При этом на балку жесткости передается меньшая часть временной нагрузки  $1 - \alpha$ .

Для наиболее полного использования несущей способности висячего элемента желательно, чтобы коэффициент  $\alpha$  был достаточно высок ( $\alpha = 0,95 \dots 0,98$ ), что достигается высокой жесткостью основных висячих элементов и оттяжек, а также несмещаемостью концевых креплений висячего элемента. При высоком значении  $\alpha$  балка жесткости может быть принята легкой, что определяет экономичность всей системы несущих элементов покрытия.

Коэффициент распределения  $\alpha$  регулируется величиной характеристики  $n_1$ , содержащей как заданные исходные данные  $l, p, \Delta/l$ , так и варьируемые в процессе выбора материалов и компоновки конструкций параметры:  $E/E_K, R/R_K, q, f/l$  и  $h_B/L$ . Условия оптимальных соотношений этих компоновочных параметров можно получить, записывая стоимость несущих конструкций всего сооружения в функции искомым параметров, объединенных характеристикой  $n_1$ . Выполняя оптимизацию по  $n_1$ , можно найти рациональные значения компоновочных параметров. Так, например, приравняв выражения прогибов в середине и в четверти пролета при заданных нагрузках, вычислим значения  $n_1$  в зависимости от  $r$  (2.4), которые определяют "равножесткие" конструкции, имеющие равные прогибы в этих двух расчетных сечениях пролета. На рис. 2.5 представлен график, вычисленный для равномерно распределенной нагрузки. Аналогичные зависимости могут быть найдены для смешанных нагрузок, включающих сосредоточенные воздействия.

Полученные графики можно использовать, во-первых, для компоновки системы с равными прогибами в середине и в четверти пролета при данном значении коэффициента деформативности. При этом требуемое значение  $n_{pж}$  по графику, представленному на рис. 2.5, должно соответствовать коэффициенту  $n_1$  проектируемого сооружения, что достигается соответствующим выбором геометрических параметров и прочностных характеристик материалов. Во-вторых, если все раз-

Рис. 2.5. Коэффициент равножесткостной системы



меры сооружения известны и материалы заданы, то с помощью рис. 2.5 можно определить место наибольшего прогиба системы, не прибегая к расчету. Для этого находят, в какой части графика (верхней или нижней) располагается параметр  $n_1$ , вычисленный для данной конструкции, а следовательно, становится известным, где будет наибольший прогиб.

В соответствии с этим может быть выбран способ увеличения жесткости покрытия. Так, если характеристика  $n_1$  данной конструкции расположена сверху кривой, изображенной на рис. 2.5, то, следовательно, в ней преобладают упругие прогибы, которые необходимо уменьшать, применяя способы, направленные против упругих деформаций. Если параметр  $n_1$  находится ниже кривой, то должны быть уменьшены кинематические прогибы.

### 2.3. АНАЛИЗ ПОКРЫТИЙ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ОЧЕРТАНИЕМ ВИСЯЧЕГО ЭЛЕМЕНТА

Кроме наиболее часто встречающегося очертания висячего элемента по квадратной параболе возможны и другие виды очертаний растянутого пояса, что может определяться многими факторами: технологией изготовления конструкций, методами монтажа, архитектурно-конструктивными соображениями и т.п. Принимая общую предпосылку о произвольном очертании нити для расчета висячей комбинированной системы, запишем уравнение (2.1) в измененном виде [12]:

$$\eta^1 y(x) - r^2 \eta''(x) = \frac{p l^4}{EI} \left( 1 - \frac{H_p}{p} \frac{d^2 y}{l^2 dx^2} \right), \quad (2.37)$$

где  $y$  — ордината кривой, описывающей очертание висячего элемента. Обозначения других членов, входящих в уравнение [см. (2.1)].

Левая часть уравнения (2.37) имеет вид, аналогичный (2.1), поэтому выведенные здесь функции влияния могут быть использованы также, как и для схем с параболическим очертанием висячего элемента. При этом воздействие подвесок на балку, распределенное по длине пролета по определенной закономерности  $z(x)$ , зависит от характера очертания растянутого элемента.

$$z(x) = \frac{l}{8f} \frac{d^2 y}{l^2 dx^2}. \quad (2.38)$$

Принимая конкретную форму провисания висячего элемента, определим  $z(x)$ . Например в случае, если очертание нити задано по дуге окружности [12]

$$y = \frac{l^2}{8f} - \frac{f}{2} - \sqrt{\left(\frac{l^2}{8f} - \frac{f}{2}\right)^2 + (1-x)xl^2}, \quad (2.39)$$

получим

$$z(x) = \left[ \left(1 - \frac{4f^2}{l^2}\right)^2 + \frac{16f^2}{l^2} \right] \left[ \left(1 - \frac{4f^2}{l^2}\right)^2 + (1-x)x \frac{64f^2}{l^2} \right]^{-3/2}, \quad (2.40)$$

где  $f$  – стрела провеса нити.

Функции влияния, относящиеся к определению перемещений от воздействия подвесок на балку  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  должны быть преобразованы для расчета системы с заданным непараболическим очертанием нити

$$F_2(x) = \int_0^x \Phi_1(\xi, x) z(\xi) d\xi + \int_x^1 \Phi_1(x, \xi) z(\xi) d\xi; \quad (2.41)$$

$$F_3 = \int_0^1 F_2(x) dx. \quad (2.42)$$

Вычислительные операции, записанные в (2.41) и (2.42), выполняют на ЭВМ по стандартным программам.

Для схем с произвольным очертанием висячего элемента распор при действии одиночного груза  $H_p$  определится в следующем виде:

$$H_p = \frac{Pl}{8f} \alpha(\xi) = \frac{Pl}{8f} \frac{F_2(\xi)}{F_3 + (n_0 L_0 / l) (l^2 / 64f^2)}. \quad (2.43)$$

Прогибы и изгибающие моменты вычисляются аналогично (2.35) из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \eta(x) &= \frac{Pl^3}{EI} [\Phi_1(x, \xi) - \alpha(\xi) F_2(x)]; \\ M(x) &= -Pl[\Phi_1''(x, \xi) - \alpha(\xi) F_2''(x)]. \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

Для оценки влияния отклонений в очертании висячего элемента от параболического к очертанию по окружности на распределение прогибов и изгибающих моментов рассмотрен пример расчета системы с очертанием нити по окружности и сделано сопоставление с расчетом покрытия, очерченного по квадратной параболе [12]. Относительные разности ординат провисания висячих элементов у опор составляют (1/455 . . . 1/650), в 1/8 пролета несколько увеличиваются, с 1/4 пролета уменьшаются до нуля в середине пролета, где по условию сопоставления стрелы провеса равны. С уменьшением стрел провеса разности ординат уменьшаются, что можно сказать и о неравномерности воздействия подвесок на балку. Увеличение усилий в подвесках отмечается вблизи опор — при  $f = 1/8l$  составляет 24%, а при  $f = 1/5l$  — 7%. Но эта неравномерность резко падает к четверти пролета соответственно до 2,5 и 0,8% и в середине пролета составляет в сторону уменьшения усилий до 6 и 2%.

Изгибающие моменты в четверти пролета при загрузке временной нагрузкой половины пролета уменьшаются при  $f = 1/8l$  на 3%, и при  $f = 1/15l$  — на 1%, а прогибы соответственно на 5 и 1,5%. При загрузке всего пролета временной нагрузкой величина расщепов почти не зависит от очертания висячего элемента (разность 0,1%). Таким образом, расчет покрытий при произвольном очертании висячего элемента можно выполнять без учета неравномерности воздействия подвесок на балку.

## 2.4. К ДИНАМИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ПОКРЫТИЙ

**Расчетное уравнение и функции влияния.** Для оценки динамических качеств покрытия при компоновке производственного здания могут быть выполнены динамические расчеты в соответствии с расчетными предпосылками, принимаемыми при статическом анализе висячих систем. Среди предпосылок — предположение о малых амплитудах колебаний и также то, что рассматриваются колебания гармонические, установившиеся [17, 19, 42]. Все это позволяет записать расчетное уравнение колебаний в виде:

$$\eta^{IV}(x) - r_0^2 \eta^{II}(x) - b_0^4 \eta(x) = 0, \quad (2.45)$$

где

$$r_0 = l \sqrt{\frac{H_q}{EI}}; \quad H_q = ql^2 / (8f); \quad b_0^4 = m\omega^2 l^4 / (EI). \quad (2.46)$$

Уравнение линейное, так как  $r_0$  и  $b_0$  не зависят от прогибов (в коэффициент деформативности  $r_0$  входит лишь статический расщеп от постоянной нагрузки, который не зависит от прогибов).



К решению уравнения (2.45) применим метод начальных параметров и найдем функции влияния, которые при  $\mu = \theta$  совпадают с функциями Крылова:

$\xi \leq x$ :

$$V_1(\xi, x) = \frac{1}{\mu^2 + \theta^2} \left[ \frac{\sin \mu \xi \sin \mu (1-x)}{\mu \sin \mu} - \frac{\text{sh } \theta \xi \text{ sh } \theta (1-x)}{\theta \text{ sh } \theta} \right]; \quad (2.47)$$

$\xi \geq x$ :

$$V_1(x, \xi) = \frac{1}{\mu^2 + \theta^2} \left[ \frac{\sin \mu x \sin \mu (1-\xi)}{\mu \sin \mu} - \frac{\text{sh } \theta x \text{ sh } \theta (1-\xi)}{\theta \text{ sh } \theta} \right].$$

Здесь  $\theta^2 = \mu^2 + r_0^2$ ;  $\theta^2 \mu^2 = m\omega^2 l^4 / (EI)$ . (2.48)

Функция влияния  $V_1$  имеет те же свойства, что и функция  $\Phi_1$ , выведенная для статического расчета — функция  $V_1$  дифференцируема, симметрична относительно  $x$  и  $\xi$  и др.

Воспользуемся функцией  $V_1$  для отыскания динамических прогибов от равномерно распределенной гармонической нагрузки, прикладываемой к системе по всей длине пролета. Для этого проинтегрируем  $V_1$  от 0 до 1:

$$V_2(x) = \int_0^x V_1(\xi, x) d\xi + \int_x^1 V_1(x, \xi) d\xi;$$

$$V_2(x) = \frac{1}{\theta^2 \mu^2 (\mu^2 + \theta^2)} \left\{ \frac{\theta^2 \cos \mu (1/2 - x)}{\cos \frac{\mu}{2}} + \frac{\mu^2 \text{ch } \theta (1/2 - x)}{\text{ch } \frac{\theta}{2}} - \mu^2 - \theta^2 \right\}; \quad (2.49)$$

$$V_3 = \int_0^1 V_2(x) dx = \frac{1}{\mu^2 + \theta^2} \left( \frac{2 \text{tg } \frac{\mu}{2}}{\mu^3} + \frac{2 \text{th } \frac{\theta}{2}}{\theta^3} - \frac{1}{\mu^2} - \frac{1}{\theta^2} \right). \quad (2.50)$$

Таким образом, можно записать выражение формы колебаний под действием распределенной гармонической нагрузки (с учетом  $\theta^2 \mu^2 = m\omega^2 l^4 / EI$ )

$$\eta(x) = \frac{q}{\omega^2} \frac{H_p}{H} \frac{1}{\mu^2 + \theta^2} \left[ \frac{\cos \mu(1/2 - x)}{\mu^2 \cos \frac{\mu}{2}} + \frac{\operatorname{ch} \theta(1/2 - x)}{\theta^2 \operatorname{ch} \frac{\theta}{2}} - \frac{1}{\mu^2} - \frac{1}{\theta^2} \right] \quad (2.51)$$

Форма колебаний комбинированной конструкции при действии одиночной силы  $P_0$ , изменяющейся во времени по гармоническому закону, может быть найдена аналогично тому, как это делалось при статическом расчете:

$$\eta(x) = \frac{P_0 l^3}{EI} [V_1(\xi, x) - \alpha(\xi) V_2(x)]. \quad (2.52)$$

Амплитуды углов поворота, изгибающих моментов и поперечных сил могут быть найдены соответствующим дифференцированием функций  $V_1$  и  $V_2$  по  $x$ .

Полученные здесь функции влияния для динамического расчета висячих систем имеют одинаковую структуру и одинаковые свойства с функциями влияния, выведенными для статического расчета, что позволяет производить расчет и исследования по единой методике, а также облегчает сопоставление результатов статического и динамического расчетов висячих покрытий.

**Определение собственных частот колебаний.** Для исследования свободных однитонных колебаний комбинированных систем применим метод сил. Система соответствующих канонических уравнений имеет вид:

$$\sum_{k=1}^n \delta_{ik} X_k = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2.53)$$

где  $X_k$  — основное неизвестное;  $\delta_{ik}$  — коэффициенты метода сил, определяемые с помощью функций влияния, полученных из решения уравнения (2.45).

В общем виде частотное уравнение может быть записано в виде

$$|\delta_{ik} - \lambda_1^n| = 0. \quad (2.54)$$

Элементы этого определителя, как это следует из (2.45), являются трансцендентными функциями от  $\theta$  и  $\mu$ . Для однопопной схемы определитель представляется в виде условия  $\delta_{11} = 0$ , что может быть записано в следующем виде:

$$z^2 \int_0^x \left[ \int_0^x V_1(\xi, x) d\xi + \int_x^1 V_1(x, \xi) d\xi \right] dx + n_0 L = 0. \quad (2.55)$$

Подставляя значение функций влияния  $V_1$  и интегрируя, после преобразования получим

$$1 - \frac{2\theta^2 \operatorname{tg} \frac{\mu}{2}}{\mu (\mu^2 + \theta^2)} - \frac{2\mu^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}{\theta (\mu^2 + \theta^2)} = n_1 \frac{m\omega^2 l^4}{EI}, \quad (2.56)$$

где обозначения см. (2.31, 2.46, 2.48).

Из (2.56) следует, что частоты свободных колебаний при симметричных колебаниях зависят в основном от параметров, определяющих продольные деформации всякого элемента.

При кососимметричных формах колебаний обычной однопопной схемы динамический распор в всячем элементе равен нулю и частотное уравнение конструкции становится уравнением балки и от параметра  $n_1$  не зависит:

$$\mu_i = i\pi \quad (i = 2, 4, 6 \dots). \quad (2.57)$$

Собственные частоты при этом

$$\omega^2 = EI\mu^2 (\mu^2 + r_0^2) / ml^4. \quad (2.58)$$

Решить вопрос, при каких формах колебаний будут расчетными низшие частоты можно из анализа соотношения между параметрами конструкции  $r_0$  и  $n_1$ . Для покрытий с жесткой балкой (малый пролет) низшая частота отмечается при колебаниях по первой симметричной форме. Для большепролетных конструкций с гибкой балкой наблюдается низшая частота при колебаниях по первой кососимметричной форме. Также, как и при анализе статических деформаций системы, можно по заданным параметрам  $r_0$  и  $n_1$  выявить формы колебаний и выбрать способ стабилизации покрытия.

Назовем характеристику  $n_1$  переходной для сооружения, в котором колебания по первым симметричным и кососимметричным формам имеют одинаковую частоту. Подставим в (2.56)  $\mu$  и  $\omega$  из (2.57), (2.58) при  $i = 2$ , получим

$$n_{\text{перех}} = 1/(\mu^2 - \theta^2) - 2/[\theta^2(\mu^2 + \theta^2)], \quad (2.59)$$

где  $\mu = 2\pi$ ;  $\text{th} \frac{\theta}{2} \cong 1$ .

На рис. 2.6 даны значения  $n_{\text{перех}}$  в функции  $g_0$ . При известном значении коэффициента деформативности  $g_0$  и  $n_1 < n_{\text{перех}}$  свободные колебания происходят по первой кососимметричной форме, при  $n_1 > n_{\text{перех}}$  — по первой симметричной.

Для вывода частотного уравнения висячего комбинированного покрытия с жестким прикреплением висячего элемента к балке в середине пролета приравняем нулю определитель, составленный из коэффициентов канонических уравнений расчетной схемы:

$$\begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{vmatrix} = 0, \quad \delta_{11} = \delta_{22}; \quad \delta_{12} = \delta_{21}; \quad (\delta_{11} + \delta_{12})(\delta_{11} - \delta_{12}) = 0. \quad (2.60)$$

Таким образом, частотное уравнение распадается на два уравнения, характеризующие симметричные и кососимметричные колебания. Если первый вид колебаний представлен уравнением (2.56), то частотное уравнение кососимметричных колебаний будет:

$$1 - \frac{4\theta^2 \text{tg} \frac{\mu}{4}}{\mu(\mu^2 + \theta^2)} - \frac{4\mu^2 \text{th} \frac{\theta}{4}}{\theta(\mu^2 + \theta^2)} = n_1 \omega^2. \quad (2.61)$$

Уравнения (2.56) и (2.61) имеют одинаковый вид, что связано с одинаковым характером колебаний обычной схемы по одной половине пролета и схемы с жестким узлом — на половине пролета.

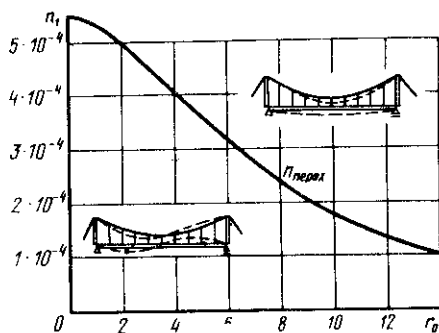


Рис. 2.6. Коэффициент неустойчивой формы колебаний

та, т.е. в данной схеме исчезла низшая частота с колебаниями конструкции как простой балки по двум полуволнам без участия каната.

Для определения собственных частот колебаний обычной системы "балка—нить" и систем повышенной жесткости составлены таблицы коэффициентов для колебаний по симметричным и кососимметричным формам [18].

## 2.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНКЕРНЫХ УСТРОЙСТВ

**Учет провисания гибких оттяжек.** Среди элементов, влияющих на увеличение прогибов пролетных конструкций, существенная роль отводится оттяжкам, которые испытывают упругие осевые удлинения и провисают под действием собственного веса, в результате чего осевая нагрузка, приложенная к оттяжке, вызывает перемещение конца ее вследствие уменьшения стрелы провисания и одновременно из-за ее упругих удлинений. Для оценки провисания оттяжки по сравнению с ее упругими удлинениями можно воспользоваться методикой В.К. Качурина [13]:

$$\nu = \frac{\Delta l_{\text{пр}}}{\Delta l_y} = \frac{7,85^2 l^2 E \cos^6 \beta}{24R_k^3} \frac{1+m}{m^2}, \quad (2.62)$$

где  $\Delta l_{\text{пр}}$  — удлинение ванты за счет уменьшения стрелы провисания при увеличении ее натяжения с первоначального  $S_0$  до  $S_1$ ;  $\Delta l_y$  — то же, за счет упругих деформаций;  $l$  — горизонтальная проекция оттяжки, см;  $E, R_k$  — модуль упругости и расчетное сопротивление материала оттяжки,  $г/см^2$ ;  $\beta$  — угол наклона оттяжки к горизонту;  $m = q(p+q)$  — отношение начального натяжения оттяжки от постоянной нагрузки по пролету к полному расчетному натяжению при загрузке всего пролета временной нагрузкой в предположении, что балка жесткости системы принимает на себя пренебрежимо малую часть временной нагрузки.

Выразим в процентах добавки к упругим удлинениям оттяжки, учитывающие ее провисание от собственного веса при различных компоновочных параметрах оттяжки и степени начального ее натяжения:

$$\Delta l_0 = \Delta l_y + \Delta l_{\text{пр}} = \Delta l_y (1 + \nu/100). \quad (2.63)$$

Из формул (2.62) и (2.63) следует, что на провисание оттяжек решающе влияет угол наклона их к горизонту. Так, при увеличении угла с 45° до 60° продольные перемещения концов в результате уменьшения стрелы провисания снижаются в 8 раз. Существенное значение на отношении кинематических и упругих деформаций оттяжек имеют расчетные сопротивления материалов, из которых изготовлены оттяжки. Учет провисания для оттяжек из проката значительно важнее, чем для канатных оттяжек — добавка на учет провисания уменьшается в 6—7 раз, хотя упругие удлинения канатов в 4—5 раз больше удлинений проката.

Провисания оттяжек связаны с их длиной квадратичной зависимостью (2.62), а также зависят от начального натяжения оттяжек постоянной нагрузкой или предварительным напряжением. Слабо натянутые оттяжки провисают во много раз больше, чем напряженные.

Оптимальный угол наклона оттяжки назначается с учетом ее деформативности, объема материалов на оттяжку и анкерный фундамент, а также с учетом уменьшения нерационально используемых площадей территории под оттяжками. Предварительно этот угол может быть принят в пределах  $45 \dots 60^\circ$ .

**К расчету анкерных фундаментов.** По характеру нагрузок на анкерные фундаменты и ответственности сооружений всякие покрытия производственных зданий ближе всего соответствуют всячим мостам малых и средних пролетов и опорам воздушных линий электропередач.

Основания таких фундаментов рассчитывают по несущей способности при выдергивании и по второму предельному состоянию — по деформациям. По первому предельному состоянию должно выполняться условие, что выдергивающая сила уравновешивается, во-первых, нормативной составляющей веса фундамента, направленной вдоль оттяжки и умноженной на коэффициент надежности по нагрузке, принимаемый в подобных расчетах на устойчивость равным 0,9 и, во-вторых, силой предельного сопротивления основания выдергиваемого фундамента, которая определяется объемом призмы выпирания с учетом удельного веса грунта обратной засыпки. При этом коэффициент надежности по назначению, входящий в знаменатель правой части неравенства, должен быть при опытном проектировании, по нашему мнению, не менее  $\gamma = 1,5$ .

Расчет оснований по деформациям для производственных зданий, оборудованных подвесными кранами, имеет особое значение с точки зрения недопустимости податливости анкерных фундаментов при статическом нагружении, а следовательно, недопустимости больших прогибов в середине пролетов при полном нагружении поперечной конструкции кранами, а также с точки зрения неблагоприятного воздействия переменных временных нагрузок на податливый фундамент.

Расчет деформаций оснований данных типов фундаментов, работающих на выдергивание, по [5] может не производиться, если выдергивающая сила проходит через центр тяжести фундамента и выполняется неравенство:

$$F_n - G_n \sin \beta \leq \gamma_c R_0^* A_0, \quad (2.64)$$

где  $F_n$ ,  $G_n$  — нормативные выдергивающая сила и вес фундамента;  $\beta$  — угол наклона оттяжки к горизонту;  $\gamma_c$  — коэффициент условий работы,  $\gamma_c = 0,7$ ;  $R_0^*$  — расчетное сопротивление грунта обратной засыпки;  $A_0$  — площадь верхней поверхности фундамента, нормальной к направлению оттяжки.

Расчет производится по СНиПу на проектирование аналогичных конструкций всячих мостов, антенн и т.п. Учитывая, что стоимость