

А.Н. Добромыслов

**ПРИМЕРЫ  
ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
СООРУЖЕНИЙ**

**А. Н. Добромыслов**

**ПРИМЕРЫ  
ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
СООРУЖЕНИЙ**



Издательство АСВ  
Москва 2013

***Рецензенты:***

Зав. кафедрой «Строительное производство,  
сертификация и стандартизация»  
Московского государственного открытого университета,  
профессор, доктор технических наук

***В.В. Доркин***

Кафедра «Железобетонные и каменные конструкции»  
Московского государственного строительного университета,  
профессор ***А.И. Бедов***

**Добромыслов А. Н. Примеры динамических расчетов железобетонных сооружений.** – М., Издательство АСВ, 2013. – 224 с.

**ISBN 978-5-93093-975-0**

В работе приведены основные сведения и справочные материалы по расчету на динамические нагрузки. В основу работы положены цифровые примеры расчета и проектирования зданий и сооружений на динамические нагрузки от транспорта, машин и оборудования, ветра, аварийных нагрузок, сейсмических воздействий. Значительное внимание уделено расчету инженерных сооружений. Примеры выполнены по действующим нормативным документам с использованием как приближенных способов расчёта, так и на основе компьютерных программ.

**ISBN 978-5-93093-975-0**

© Добромыслов А.Н., 2013

© Издательство АСВ, 2013

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.....	15
1.1. Динамические характеристики сооружений.....	15
1.2. Расчет с использованием динамических коэффициентов.....	23
Глава 2. РАСЧЕТ НА НАГРУЗКИ ПРИ ДВИЖЕНИИ.....	28
2.1. Основные сведения.....	28
2.2. Примеры расчета.....	30
2.2.1. Пример расчета на монтажные нагрузки.....	30
2.2.2. Пример расчета пролетного строения моста.....	34
2.2.3. Пример расчета лестницы на зыбкость.....	36
Глава 3. РАСЧЕТ НА ВЕТРОВЫЕ НАГРУЗКИ.....	40
3.1. Основные положения.....	40
3.2. Примеры расчета.....	44
3.2.1. Пример расчета водонапорной башни.....	44
3.2.2. Пример расчета многоэтажного здания.....	47
3.2.3. Пример расчёта рекламного щита.....	50
3.2.4. Пример расчёта дымовой трубы на резонанс.....	53
Глава 4. РАСЧЕТ НА УДАРНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ НАГРУЗКИ.....	58
4.1. Основные положения.....	58
4.2. Примеры расчета.....	62
4.2.1. Пример расчета плиты перекрытия при падении груза.....	62
4.2.2. Пример расчета прочности сваи при забивке.....	63
4.2.3. Пример расчета при ударе автотранспорта.....	66
4.2.4. Пример расчета несущей способности здания при аварийной нагрузке.....	68
4.2.5. Пример расчета опоры моста на удар.....	71
4.2.6. Пример расчета стены на действие взрывной волны.....	73
4.2.7. Пример расчета конструкций при внезапной остановки движения.....	74
4.2.8. Пример расчёта здания на действие взрывной волны.....	77
4.2.9. Пример расчёта здания при взрыве газа в помещении.....	82
Глава 5. РАСЧЕТ НА НАГРУЗКИ ОТ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ.....	89
5.1. Основные положения.....	89
5.1.1. Расчет покрытий и перекрытий.....	93
5.1.2. Расчет фундаментов машин.....	95

5.2. Примеры расчета .....	100
5.2.1. Пример расчета плиты перекрытия под электродвигатель.....	100
5.2.2. Пример расчета рамы под двигатель .....	102
5.2.3. Пример расчета фундамента под насос .....	106
5.2.4. Пример расчета фундамента под насос по компьютерной программе.....	109
5.2.5. Пример расчёта фундамента под молот .....	111
5.2.6. Пример расчёта колебаний фундамента .....	114
5.2.7. Пример расчёта ригеля перекрытия по программе ПК Лири .....	115
5.2.8. Пример расчёта перекрытия по программе ПК Лири.....	122
5.2.9. Пример расчёта пространственного каркаса по программе ПК Лири.....	128
Глава 6. РАСЧЕТ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ .....	136
6.1. Основные положения .....	136
6.2. Примеры расчетов .....	144
6.2.1. Пример расчета кирпичного здания.....	144
6.2.2. Пример расчета одноэтажного каркасного здания .....	147
6.2.3. Пример расчета многоэтажного каркасного здания .....	150
6.2.4. Пример расчета подпорной стены.....	155
6.2.5. Пример расчета фундамента под оборудование .....	159
6.2.6. Пример расчета эстакады.....	162
6.2.7. Пример расчета силосного корпуса .....	170
6.2.8. Пример расчета заглубленного резервуара .....	177
6.2.9. Пример расчета дымовой трубы.....	184
6.2.10. Пример расчета подпорной стены на компьютере .....	191
6.2.11. Пример расчёта многоэтажного здания по программе ПК Лири ....	193
6.2.12. Пример расчёта арочного моста по программе ПК Лири .....	201
6.2.13. Пример расчёта пространственной системы моста по программе ПК Лири.....	209
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	215
1. Значения периодов собственных колебаний.....	215
2. Значения собственной круговой частоты конструкций .....	219
3. Эквивалентные одномассовые системы однопролетных балок .....	220
4. Основные буквенные обозначения, принятые в динамике сооружений .....	221
ЛИТЕРАТУРА .....	222

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В инженерной практике во многих случаях строительные конструкции сооружений подвергаются действию динамических нагрузок в связи с чем возникают вопросы оценки их прочности как в процессе проектирования, так и при эксплуатации.

Обычно молодые инженеры и студенты строительных вузов, знакомые с проектированием конструкций при статических нагрузках, испытывают значительные затруднения при осуществлении расчетов на действие динамических нагрузок.

В изданных до настоящего времени учебниках по железобетонным конструкциям приводятся лишь общие сведения о методах расчета на динамические нагрузки.

Для усвоения принципов расчета железобетонных конструкций на динамические нагрузки в настоящей работе разобраны конкретные примеры расчета, часто встречающихся на практике задач, знакомясь с которыми можно освоить методику проектирования и принципы расчета.

Изучение методики проектирования на конкретных примерах предусматривает самостоятельную работу для чего к каждому примеру предшествуют указания, которые поясняют идею принятой методики проектирования.

В работе расчеты конструкций выполнены по действующим нормативным документам с использованием как приближенных методов расчёта, так и с использованием современных компьютерных программ.

Рассмотрены расчеты железобетонных сооружений на действие нагрузок от транспортных средств, машин и оборудования, ветровых воздействий, аварийных нагрузок, сейсмических воздействий. Значительное внимание уделено расчету железобетонных инженерных сооружений, мало освещенных в технической литературе.

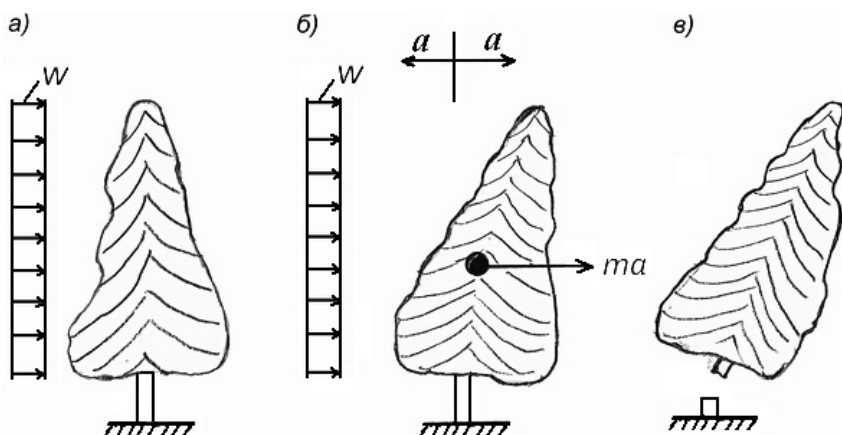
## ВВЕДЕНИЕ

Здания и инженерные сооружения обычно проектируются на основе строительных норм на действие статических нагрузок, действующих в течение их эксплуатации.

В процессе эксплуатации сооружения подвергаются различного рода динамическим воздействиям. К ним относятся: ветровые и подвижные нагрузки, нагрузки от работающих машин и оборудования, устанавливаемых на перекрытиях и отдельных фундаментах, аварийные и сейсмические воздействия. Проблема учета динамических нагрузок возрастает по мере развития техники, повышения размеров сооружений, мощностей оборудования и точности оборудования.

Чем же отличаются динамические нагрузки от статических? Чтобы понять действие динамической нагрузки на сооружение рассмотрим ее на примере воздействия ветра на крону дерева.

При действии равномерного потока ветра на крону дерева его ствол испытывает статическую нагрузку только от ветрового давления  $p_c$ , которое вызывает прогиб ствола (рис. 1).



**Рис. 1. Воздействие порывов ветра на высокие деревья:**  
*a* – статическое; *б* – статическое и динамическое от порывов;  
*в* – разрушение от динамической нагрузки

Сильный ветер обычно дует неравномерно, а с порывами. При порывах ветра дерево, обладающее массой  $m$ , начинает раскачиваться с некоторым ускорением  $a$ , что вызывает дополнительную динамическую силу  $p_d = ma$  за счет инерции массы дерева. При этом полная величина нагрузки будет складываться из статической и динамической.

ческой составляющих  $p = p_c + p_d$ . Увеличение нагрузки при сильных порывах ветра может привести к перелому или падению дерева.

Размах колебаний и следовательно величина ускорений зависит не только от величины, действующей силы ветра, но и от жесткости ствола дерева. Гибкое дерево будет больше прогибаться и тем самым увеличивать ускорение массы.

Таким образом, динамическая нагрузка в отличие от статической изменяет свое значение в малый промежуток времени и сообщает массам сооружения ускорение и силы инерции. При действии динамической нагрузки сооружение начинает колебаться. Величины колебаний зависят не только от нагрузки, но и жесткости сооружения.

В случае периодически повторении малых динамических воздействий, например, от порывов ветра или работе машин, расположенных на перекрытиях зданий, при определенных условиях может происходить накопление энергии в конструкциях сооружения, которое выражается в постепенном увеличении размаха колебаний и сил инерции до очень больших значений. Это явление называется резонансом.

Явление резонанса опасно для сооружения тем, что может привести при малых динамических воздействиях к разрушению конструкций, достаточно прочных по отношению к статическим нагрузкам.

На рис. 2, 3 показано разрушение и повреждение сооружений от ветровой нагрузки, вызванных резонансными колебаниями.

*Подвесной (вантовый) мост через Такомский пролив в США* имел пролет между опорами 854 м. При скорости ветра 19 м/сек возникли изгибно-крутильные колебания поперек моста с таким размахом, что угол наклона проезжей части к горизонту достигал  $45^0$ . После часа таких колебаний часть пролетного строения разрушилась и рухнула в воду. При проектировании мост был рассчитан на статическую ветровую нагрузку на скорость ветра 50 м/сек, но возможность возбуждения колебаний и наступление резонанса не была учтена.

*Новый мост через Волгу в городе Волгограде* в 2010 г. был срочно закрыт для движения из-за внезапно начавшихся колебаний с размахом до одного метра, грозившим обрушению моста. Эксперты, проводившие обследование моста, пришли к выводу, что причиной колебаний явились ветровые нагрузки, которые попали в резонансную зону. Для продолжения эксплуатации моста потребовалось его усиление с установкой трех гасителей колебаний в виде груза на пружинах. Установка гасителей запроектирована внутри коробчатых балок пролетного строения моста.



Таким образом, для динамического расчета сооружения необходимо определить действующую на него динамическую нагрузку, которая определяется его характеристиками: массой сооружения и ускорением массы. От действия статической и динамической нагрузок зависит несущая способность конструкций сооружения и их перемещения.

Расчет сооружения с учетом сил инерции и возникающих при этом колебаний называют *динамическим расчетом*. Его задачей в общем случае является определение во времени закона движения масс деформируемой системы, зная который можно дать оценку прочности и жесткости системы.

Для дальнейшего изложения методов расчета на динамические нагрузки необходимо ввести некоторые важные понятия и определения.

# Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

## 1.1. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СООРУЖЕНИЙ

При практических расчетах сооружений на динамические нагрузки применяются как приближенные методы, основанные на ручном расчёте, так и более точные с использованием современных компьютерных программ.

Использование приближённых методов расчёта на динамические нагрузки обосновывается тем, что исходные данные (расчетные схемы, нагрузки, жесткость элементов и узлов соединений, грунтовые условия) для строительных конструкций задаются со сравнительно небольшой точностью, поэтому и расчеты целесообразно производить с той же точностью.

Приближенные методы расчета позволяют при небольших затратах труда определять усилия с приемлемой для практики точностью, почувствовать физический смысл работы конструкций, уяснить технологию расчета.

В своих расчётах в дальнейшем мы будем использовать как приближённые методы расчёта, так и методы с использованием компьютерных программ.

Для расчета сооружений при динамических нагрузках используют те же допущения, что и при статических воздействиях.

Материал считается упругим и однородным. Жесткость железобетонных элементов принимается без учета арматуры по геометрическим характеристикам сечения и начальному модулю упругости бетона.

Строго говоря железобетон не является упругим материалом. Учет неупругих свойств железобетона, а также расчет с учетом раскрытия трещин в железобетонных элементах приводит к снижению жесткости сооружения и тем самым к уменьшению динамических сил. Поэтому расчет сооружения с учетом его упругих свойств идет в некоторый запас прочности сооружения.

При расчете сооружений предполагается соблюдение линейной зависимости между усилиями, деформациями и перемещениями, а деформации и перемещения сооружения считаются малыми. Это дает возможным применять принцип независимости действия сил.

Как мы уже показали выше динамические воздействия вызывают колебания сооружения, при которых изменяются во времени пе-

ремещения различных точек сооружения около равновесного положения системы<sup>1</sup>, удаляясь от него и возвращаясь к нему то в одном то в другом направлении.

Колебания возможны только при наличии в системе массы измеренной весом, деленным на ускорение силы тяжести. Колебательный характер изменения во времени имеют не только перемещения точек сооружения, но и возникающие при этом внутренние усилия в его элементах.

О колебаниях судят по их характеристикам (рис. 1.1): амплитуде  $A$ , м; периоду  $T$ , сек; частоте  $\lambda = 1/T$ , 1/сек (герц).

Колебания сооружения под действием динамической нагрузки различают на *вынужденные*, когда они происходят под действием внешней силы, приложенной к массе или под действием движения опоры или основания конструкции, например, при сейсмических воздействиях и *собственные*, если они происходят после снятия действия нагрузки.

Например, собственные колебания будут проявляться если ударить по струне, которая будет свободно колебаться.

При вынужденных колебаниях происходящих под воздействием возмущающей нагрузки сооружение совершает колебания с частотой изменения этой нагрузки.

Возмущающаяся нагрузка может изменяться во времени по различным законам и может быть периодической и непериодической. Периодическая возмущающая нагрузка возникает при работе различных машин и механизмов (например, роторов электродвигателей, вентиляторов, компрессоров). Возмущающуюся нагрузку при работе машин иногда называют вибрационной, а колебания, возникающие в сооружении при действии вибрационной нагрузки, называют вибрацией.

Особый интерес представляет случай, когда внешняя сила, изменяющаяся по гармоническому закону с частотой  $\theta$ , воздействует на колебательную систему, способную совершать собственные колебания на некоторой частоте  $\omega$ . В начальный момент в колебательной системе возбуждаются оба процесса – вынужденные колебания на частоте  $\theta$  и свободные колебания на собственной частоте  $\omega$ . Но свободные колебания затухают из-за неизбежного наличия сил трения. Поэтому через некоторое время в колебательной системе оста-

---

<sup>1</sup> Под упругой системой понимается сооружение в целом (здание, инженерное сооружение) или конструкция (балка, стойка, рама, плита и т.д.).

Вынужденные колебания конструкций изучаются с целью определения максимальных сил инерции, возникающих при колебании.

Собственные колебания во времени описываются по закону

$$y = y_0 \cos \omega t + v_0 \sin \omega t / \omega, \quad (1.1)$$

где  $y$  – перемещение в момент времени;  $t$  – время в сек;  $y_0$  и  $v_0$  – начальные отклонения и скорость массы в момент  $t = 0$ ; величина  $\omega$  называется круговой частотой и представляет из себя число  $2\pi$  колебаний в секунду (рад/сек).

Процесс перемещения массы при собственных колебаниях является периодическим.

Круговая частота определяется одним из следующих выражений

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}} = \sqrt{\frac{cg}{Q}} = \sqrt{\frac{1}{m\delta_{11}}}, \quad (1.2)$$

где  $c$  – усилие, необходимое статическим путем единичного перемещения (восстанавливающая сила при перемещении ее на величину  $y = 1$ ), иначе жесткость системы;  $m = Q/g$  – сосредоточенная масса;  $\delta_{11} = 1/c$  – единичное перемещение точки в центре массы воображаемой единичной силы равной 1, приложенной в той же точке;  $g = 9,8 \text{ м/сек}^2$  – ускорение силы тяжести;  $Q$  – вес сосредоточенной массы.

Частота колебаний определяется выражением  $\lambda = 1/T$ , 1/сек (Гц). Круговая частота  $\omega$  и частота  $\lambda$  связаны отношением  $\omega = 2\pi\lambda$ . Период определяется выражением  $T = 1/\lambda = 2\pi/\omega$ , сек.

Круговая частота колебаний  $\omega$  и период колебаний  $T$  собственных колебаний являются важными динамическими характеристиками сооружения, с которыми связана реакция сооружения на динамическое воздействие и, следовательно, величина динамической нагрузки. Значения  $\omega$  и  $T$  для основных конструкций и сооружений приведены в приложениях 1 и 2.

Собственные колебания в реальных сооружениях со временем затухают, так как часть энергии, вызвавшей колебания сооружения, теряется на преодоление, так называемого внутреннего трения, вызванного потерей энергии на преодоление неупругого сопротивления

ния материала, трения в сочленениях элементов конструкций, потерь в основании сооружения.

На рис. 1.1 показаны собственные колебания конструкции, выполненные из идеально упругого материала, вызванные ударом и конструкции из реального материала.

Если сопротивления малы, то процесс затухания идет медленно. В таких случаях внутренним трением в расчетах пренебрегают и теоретически получают незатухающий процесс колебаний, при котором сообщенная системе энергия не убывает и процесс колебаний не ограничен во времени.

Расчет динамических сил при колебаниях с учетом внутреннего трения приводит к уменьшению величин динамических нагрузок, действующих на конструкции сооружения. Неучёт внутреннего трения идет в запас прочности конструкций сооружения.

Частота собственных колебаний необходима для того, чтобы сравнить ее с частотой вынужденных колебаний и исключить возможность резонанса, когда они совпадают. В строительных конструкциях чтобы исключить резонанс частота собственных колебаний  $\omega$  должна быть ниже или выше частоты динамической нагрузки  $\theta$  не менее чем на 20%, т.е.  $0,8\omega > \theta > 1,2\omega$ . Значение 20% характеризует погрешность в определении частоты динамической нагрузки.

Знание этих характеристик позволяет еще до расчета сооружения на динамическую нагрузку предугадать качественную картину вынужденных колебаний и указать невыгодные значения частот периодических сил.

Следует указать, что в железобетонных конструкциях при учёте внутреннего трения резонанс не является безусловно недопустимым явлением. Вопрос о допустимости резонанса должен решаться путём расчёта, который сводится к оценке амплитуд резонансных колебаний конструкции и сравнению их с допускаемыми.

При выполнении динамических расчетов от реального сооружения переходят к упрощенной идеализированной схеме, учитывающей лишь его основные свойства, которая называется расчетной схемой сооружения. Одним из основных понятий в динамике сооружений, относящимся к выбору расчетной схемы, является понятие о степени свободы системы.

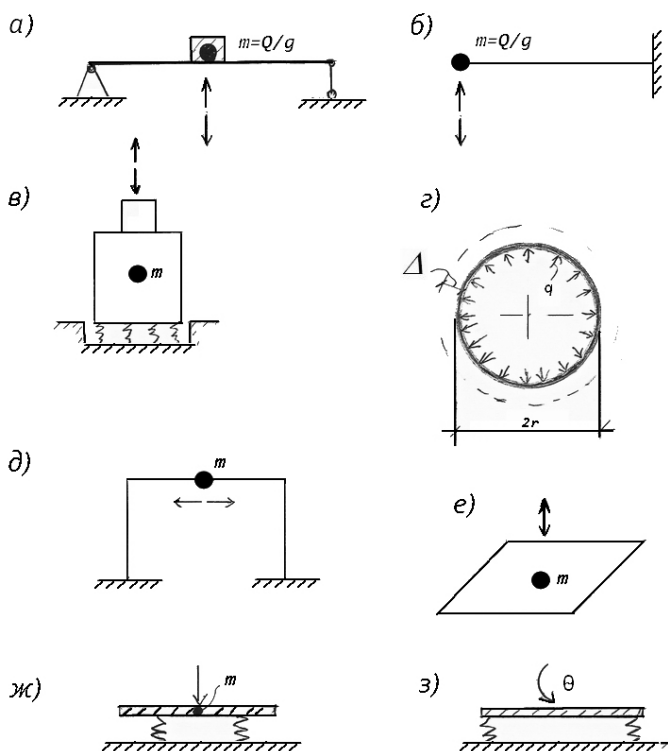
Для составления уравнений движения системы сооружения необходимо установить, каким наименьшим количеством независимых перемещений определяется положение масс всей системы в любой момент времени при колебании сооружения. Это наименьшее число

параметров, через которое выражается перемещение масс системы, называется числом степеней свободы системы.

Масса тела может быть сосредоточенной и распределенной.

В реальных сооружениях масса его элементов непрерывно распределена по их объему и расчетная схема системы является системой с бесконечным числом степеней свободы.

Классическим примером системы с одной степенью свободы является невесомая упругая балка<sup>1</sup> с одной сосредоточенной массой, имеющей возможность перемещаться только в одном направлении, а также другие системы (рис. 1.2, 1.3).



**Рис. 1.2. Расчётные схемы сооружений с одной степенью свободы:**

*a, б* – балка малого веса с грузом; *в* – фундамент под оборудование на упругом грунтовом основании; *г* – осесимметричная цилиндрическая оболочка; *д* – рама; *е* – плита; *ж, з* – балка на упругом основании

<sup>1</sup> Термин невесомая балка употребляется в условном смысле, когда собственным весом балки можно пренебречь в сравнении с весом груза.

**ДОБРОМЫСЛОВ**  
**Андрей Николаевич**

**ПРИМЕРЫ ДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ**  
**ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Редактор ***В.П. Бурмакин***  
Компьютерная верстка ***В.П. Бурмакин***  
Дизайн обложки ***Н.С. Романова***

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.  
Подписано к печати 11.06.13. Формат 60×90/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. 14,0 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №  
Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации оф. 511  
тел., факс: (499) 183-56-83, E-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru), <http://www.iasv.ru>