

---

УДК 621.833

## Динамический расчет конструкций промышленных зданий и сооружений

Лодыгина Н.Д.

Допустимый уровень колебаний конструкций, подвергающихся динамическим воздействиям, определяется: физиологическим воздействием колебаний на людей; несущей способностью конструкции (прочностью и выносливостью); влиянием колебаний на производственный процесс. Эксплуатационные динамические нагрузки в промышленных зданиях и сооружениях, как правило, не велики и вызываемые ими напряжения значительно меньше напряжений от статической нагрузки. Поэтому динамический расчет обычно проводится для проверки допустимости перемещений и внутренних усилий конструкции, рассчитанной на статические нагрузки, при совместном действии статических и динамических нагрузок с точки зрения выполнения требований прочности и выносливости (а в некоторых случаях и деформативности) конструкций. Несущая способность конструкций при совместном действии статических и динамических нагрузок обеспечивается расчетом на прочность, выносливость и устойчивость.

*Ключевые слова:* динамический расчет, колебания, прочность, выносливость, устойчивость, конструкции зданий и сооружений, жесткость, внутреннее трение, усталость.

## The dynamic analysis of industrial buildings and facilities

Lodigina N.D.

The permissible level of structure vibrations, subjected to dynamic impacts, is determined by the physiological effects of vibrations on people as well as the bearing capacity of the structure (its strength and durability) and the effect of vibration on the production process. The operational dynamic loads in industrial buildings and facilities are not great, as a rule, and the resulting voltage is significantly less than the stress from static loads. Therefore, the dynamic analysis usually aims at validating displacements and internal forces of the structure, designed for static loads under the combined action of static and dynamic loads from the point of view of meeting the requirements of structure strength and durability (and in some cases deformation). Bearing capacity of structures under the combined action of static and dynamic loads is provided by the calculation of strength, durability and stability.

*Keywords:* dynamic analysis, vibration, strength, endurance, stability, design of buildings and structures, stiffness, internal friction, fatigue.

### Введение

Проектирование зданий и сооружений на современном этапе невозможно без учета динамических воздействий. Цель динамического расчета несущих конструкций промышленных зданий и сооружений – обеспечить несущую способность конструкций при совместном действии статических и динамических нагрузок.

При проектировании строительных конструкций их рассчитывают, чтобы обеспечить заданную прочность, надежность, долговечность в условиях изготовления, транспортиро-

вания, монтажа и эксплуатации. Надежность строительных конструкций зависит от учета следующих факторов: действующих нагрузок и воздействий, прочностных и деформационных характеристик материалов и грунтов, а также условий эксплуатации и особенностей конструкций и оснований. Строительные конструкции промышленных зданий в основном предназначены для восприятия приложенных к ним эксплуатационных нагрузок.

Цель работы – рассмотреть особенности динамического расчета конструкций промышленных зданий и сооружений.

### Динамический расчет зданий и сооружений

Основные динамические характеристики строительных материалов и конструкций [1]:

- динамическая жесткость при циклическом процессе деформирования;
- внутреннее трение, обуславливающее рассеяние циклических деформаций во внешнюю среду;
- выносливость или динамическая прочность при циклическом процессе деформирования.

Фактическая жесткость элементов строительных конструкций, в отличие от жесткости воображаемых конструкций из идеального линейно-упругого изотропного однородного материала, не может быть определена как некоторая постоянная величина, так как она может зависеть от скорости и закона изменения напряжений, температуры, влажности и т. д. Статическая жесткость при длительном действии нагрузки меньше динамической вследствие влияния деформаций ползучести и релаксации напряжений и зависит от времени, отсчитываемого после начала нагружения. Динамическая жесткость зависит от периода колебаний, но для традиционных строительных материалов (сталь, дерево, железобетон, кирпичная кладка) в пределах обычных частот периодических нагрузок она меняется слабо, приближаясь к статической жесткости, определяемой из кратковременных испытаний при низком уровне напряжений.

Динамическую жесткость элементов строительных конструкций при расчете на умеренные динамические нагрузки можно определять исходя из упругой стадии работы материала и считать равной произведению динамического модуля упругости на соответствующую геометрическую характеристику поперечного сечения элемента. При динамическом расчете стальных и деревянных конструкций динамические модули упругости можно принимать равными статическим. При расчете кирпичных зданий на горизонтальные колебания мо-

дуль сдвига принимается равным  $0,3E$ , где  $E$  – модуль упругости кирпичной кладки на сжатие. При динамическом расчете изгибаемых элементов железобетонных каркасных зданий, а также монолитных железобетонных конструкций перекрытий и покрытий, плит и балок расчетные динамические жесткости можно принимать равными жесткости сплошного бетонного сечения, при этом динамический модуль бетона принимается равным нормативному значению  $E$ .

При циклических деформациях конструкции часть энергии этих деформаций необратимо поглощается и рассеивается в виде тепла во внешнюю среду вследствие внутреннего трения в материале, трения проскальзывания в соединениях элементов конструкции, внутреннего трения в деформируемом основании, а также внешних сопротивлений (трения скольжения в опорах). Объяснение природы внутреннего трения в традиционных строительных материалах следует искать в неоднородности структуры материала. Внутреннее трение в строительных конструкциях играет важную благоприятную роль, являясь причиной быстрого затухания свободных колебаний конструкции, возбуждаемых ударами, и ограничения амплитуд резонансных колебаний при действии периодических нагрузок.

Для учета влияния внутреннего трения на напряженное состояние конструкций при колебаниях устанавливается зависимость в системе с внутренним трением между полным переменным напряжением и полной переменной деформацией, состоящей из упругой и неупругой. Закон Гука здесь уже неприменим. Эта зависимость рассматривается на примере одноосного напряженного состояния образца материала, находящегося в процессе гармонического деформирования. Она формулируется на основе опытных данных.

Под усталостью материала понимается его состояние, характеризующееся возникновением локальных очагов разрушения (усталост-

ных трещин) вследствие длительного воздействия переменного циклического напряжения данного вида. Наибольшая абсолютная величина такого напряжения может быть значительно меньше соответствующего предела статической прочности материала и тем меньше, чем больше амплитуда циклического напряжения в сравнении с его постоянной (статической) составляющей. Поэтому проверка конструкции на усталость приобретает первостепенное значение в тех случаях, когда конструкция подвергается систематическому воздействию циклических напряжений, амплитуда которых не очень мала в сравнении со статическим напряжением в конструкции.

По современным воззрениям усталость, как и внутреннее трение, связывается с неоднородностью микроструктуры материала, которая, вызывая весьма неравномерное распределение напряжений по элементарным площадкам, обуславливающее появление микропластических деформаций в частицах материала, приводит к различным результатам в случае длительного действия постоянной (статической) и переменной (динамической) нагрузок.

Способность материала противостоять усталости, т.е. выдерживать не разрушаясь определенный уровень переменного циклического напряжения при заданном числе циклов напряжений, называют выносливостью материала. Наибольшую абсолютную величину максимума циклического напряжения (равного сумме его среднего и амплитудного значения), которую материал способен выдерживать не разрушаясь при сколько угодно большом числе циклов напряжений, называют пределом выносливости материала.

В качестве циклического воздействия при испытании материалов на выносливость обычно применяют гармоническую нагрузку. В дальнейшем под циклической будет подразумеваться гармоническая нагрузка.

Предел выносливости материала зависит от показателя динамичности цикла напряжений

$n$ , равного отношению амплитуды циклического (динамического) напряжений  $\sigma_0$  (величины существенно положительной) к среднему (статическому) напряжению цикла  $\sigma_e$ , относительно которого меняется циклическое напряжение и которое всегда считается положительным:

$$n = \frac{\sigma_0}{\sigma_c}$$

Возможные значения  $n$  заключены в пределах  $0 \leq n \leq \infty$ . Максимальное  $\sigma_{\max}$  и минимальное  $\sigma_{\min}$  напряжения цикла связаны с напряжением  $\sigma_e$  и  $\sigma_0$  соотношениями:

$$\sigma_{\max} = \sigma_c + \sigma_0; \sigma_{\min} = \sigma_c - \sigma_0 \text{ или}$$

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \sigma_0 = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

За  $\sigma_{\max}$  принимается напряжение, наибольшее по абсолютной величине, которое считается положительным. Являются ли  $\sigma_{\max}$  или  $\sigma_c$  напряжениями растяжения или сжатия, должно оговариваться особо.

Вместо показателя динамичности цикла напряжений  $n$  в литературе чаще вводится коэффициент асимметрии цикла напряжений  $\rho$  (или  $r$ ):

$$\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

значение которого при оговоренном правиле знаков заключены в пределах  $-1 \leq \rho \leq 1$ .

Коэффициенты  $\rho$  и  $n$  связаны зависимостями:

$$\rho = \frac{1 - n}{1 + n}; n = \frac{1 - \rho}{1 + \rho}$$

Значениями  $n=0$  или  $\rho = 1$  соответствует только статическое напряжение; значениям  $n=\infty$  или  $\rho = -1$  – только динамическое напряжение или симметричный цикл; значениям  $n=1$  или  $\rho = 0$  – так называемый пульсирующий или односторонний цикл; значениям  $0 < n < 1$  или  $0 < \rho < 1$  соответствует знакопостоянные несимметричные циклы, а значениям  $1 < n < \infty$  или  $-1 < \rho < 0$  – знакопеременные несимметричные циклы.

Выбор расчетных схем при проведении практических расчетов строительных конструкций

определяется следующими обстоятельствами: многообразием факторов, влияющих на характер динамических воздействий; точностью исходных данных; способом расчета. Точность исходных данных, как правило, невелика, так как характеристики динамических нагрузок и динамические свойства материалов могут изменяться в широких пределах. Вместе с тем очень трудно бывает оценить и влияние различных факторов, самым существенным образом сказывающихся на результатах расчета, например, распределение полезных нагрузок, совместимость работы различных конструктивных элементов, жесткость соединения стыков, внутреннее и внешнее сопротивление и т.д.

Основные упрощения расчетных схем состоят в расчленении конструкций здания на отдельные элементы (балки, плиты, стержни, рамы) и в отдельном рассмотрении вертикальных и горизонтальных динамических нагрузок. При этом передача динамических нагрузок с одного конструктивного элемента на другой осуществляется так же, как и в статических расчетах, либо путем загрузки поддерживающей конструкции ее динамическими реакциями.

Эксплуатационные динамические нагрузки в промышленных зданиях и сооружениях, как правило, не велики и вызываемые ими напряжения значительно меньше напряжений от статической нагрузки. Поэтому динамический расчет обычно проводится для проверки допустимости перемещений и внутренних усилий конструкции, рассчитанной на статические нагрузки, при совместном действии статических и динамических нагрузок с точки зрения выполнения требований прочности и выносливости (а в некоторых случаях и деформативности) конструкций.

При динамических расчетах перемещения несущих конструкций определяют по нормативным значениям динамических нагрузок [2]. Внутренние усилия (изгибающие и крутящие

моменты, продольные и поперечные силы) определяют по расчетным значениям динамических нагрузок. Вертикальные и горизонтальные колебания конструкций рассматриваются отдельно: при расчете перекрытий и покрытий учитываются только вертикальные динамические нагрузки и моменты от горизонтальных сил, а при расчете стен и каркасов – только динамические нагрузки, действующие в горизонтальной плоскости.

Динамический расчет несущих конструкций проводится в такой последовательности:

- определяются динамические нагрузки;
- устанавливается необходимость расчета на прочность;
- определяются внутренние усилия в конструкциях (изгибающие моменты, поперечные силы);
- производится расчет на прочность, выносливость и устойчивость.

Несущая способность конструкций при совместном действии статических и динамических нагрузок обеспечивается расчетом на прочность, выносливость и устойчивость. Конструкции промышленных зданий, как правило, рассчитываются только на статическую устойчивость; для отдельных элементов сооружений может потребоваться проверка на динамическую устойчивость.

Расчет изгибаемых элементов на прочность производится по формулам

$$M_C^P + M_D^P \leq M^P; Q_C^P + Q_D^P \leq Q^P$$

где  $M_C^P, Q_C^P$  – изгибающий момент и поперечная сила от расчетной статической нагрузки;  $M_D^P, Q_D^P$  – изгибающий момент и поперечная сила от расчетной динамической нагрузки (с теми же знаками, что и  $M_C^P, Q_C^P$ );  $M^P, Q^P$  – предельный изгибающий момент и предельная поперечная сила, воспринимаемые сечением и определяемые в предположении статического действия нагрузки.

При расчете сжато – изогнутых и сжатых элементов на прочность и статическую устойчивость к расчетной статической нагрузке

прибавляется расчетная динамическая нагрузка и расчет производится по обычным формулам статики сооружений.

Расчет изгибаемых элементов на выносливость производится по формулам:

$$M_C^H + M_D^P \leq M_{\text{вын}}; Q_C^H + Q_D^P \leq Q_{\text{вын}}$$

где  $M_C^H, Q_C^H$  – изгибающий момент и поперечная сила от нормативной статической нагрузки;  $M_{\text{вын}}, Q_{\text{вын}}$  – предельный изгибающий момент и предельная поперечная сила при расчете на выносливость, определяемые по расчетному пределу выносливости.

### Заключение

Во многих случаях проверка прочности и выносливости несущих конструкций может не потребоваться. В частности, многие машины развивают небольшие динамические нагрузки, вызываемые весьма малые дополнительные напряжения в конструкциях. Кроме того, выполнение очень жестких санитарно-гигиенических и технологических требований по ограничению уровня колебаний конструкций, на которых находятся люди или чувствительное к вибрациям оборудование, в большинстве случаев является достаточным и для обеспечения несущей способности конструкций. Это обстоятельство может быть использовано для грубой оценки несущей способности конструкций, подверженных действию эксплуатационных динамических нагрузок: колебания, не опасные для людей, обычно не опасны и для несущих конструкций зданий.

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2014 г.

*Лодыгина Нина Дмитриевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Россия. E-mail: nina.lodygina@yandex.ru

*Lodigina Nina Dmitrievna* – Ph.D., Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia. E-mail: nina.lodygina@yandex.ru

### Литература

1. Справочник по динамике сооружений / Б.Г. Корнев, И.М.Рабинович. – М: Стройиздат, 1972. – 511 с.
2. Ягунов Б.А. Строительные конструкции. Основания и фундаменты. – М: Стройиздат, 1991. – 671 с.
3. Лодыгина Н.Д. Расчет свайных фундаментов на закарстованных территориях // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности, 2014, № 2 (20). – С. 15-18.
4. Лодыгина Н.Д., Шарпов Р.В. Особенности расчета оснований сооружений на закарстованных территориях // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 5. – С. 1439-1441.

### References

1. Spravochnik po dinamike sooruzhenij [Handbook on the dynamics of buildings] / B.G. Korenev, I.M.Rabinovich. – Moscow: Strojizdat, 1972. – 511 p.
2. Jagunov B.A. Stroitel'nye konstrukcii. Osnovaniya i fundamenti [Building construction. Bases and foundations]. – Moscow: Strojizdat, 1991. – 671 p.
3. Lodigina N.D. Raschet svajnyh fundamentov na zakarstovannyh territorijah [Calculations on pile foundations on karst territories] // Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti [Engineering industry and life safety], 2014, № 2. – P.15-18.
4. Lodigina N.D., Sharapov R.V. Osobennosti rascheta osnovanij sooruzhenij na zakarstovannyh territorijah [Features of calculation of ground structures on karst areas] // Vestnik Tambovskogo universiteta. Serija: Estestvennye i tehicheskie nauki [Vestnik of Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences]. 2014. Vol. 19. № 5. – P. 1439-1441.