

Строительная механика и расчет сооружений

УДК 624.044.3

© Д. А. Святецкий, магистрант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: dima13svsky@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-6-50-55

© D. A. Svyatetskiy, undergraduate
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: dima13svsky@gmail.com

ОБЗОР ПОДХОДА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ НОРМ К УЧЕТУ ДЕМПФИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

REVIEW OF THE APPROACH OF DOMESTIC CIVIL ENGINEERING STANDARDS TO THE CONSIDERATION OF DAMPING IN DYNAMIC LOAD CALCULATIONS

Рассматриваются подходы отечественных нормативных документов, регулирующих расчет строительных конструкций на динамические нагрузки (гармонические, ветровые, сейсмические). Разнообразные расчетные параметры демпфирования, такие как логарифмический декремент колебаний δ , коэффициент внутреннего трения γ и коэффициент рассеивания энергии K_y , приводятся к единому параметру коэффициента поглощения энергии ψ . Производится сравнение приведенных значений между собой и со значениями, полученными по результатам натурных экспериментов. Предложен подход к учету и дальнейшему изучению демпфирования.

Ключевые слова: демпфирование, рассеивание энергии, анализ нормативной документации, колебания, многоэтажные каркасные здания.

The article discusses the approaches of Russian civil engineering standards regulating the calculation of building structures for dynamic loads (harmonic, wind, seismic ones). Various damping parameters such as the logarithmic decrement of oscillations δ , the coefficient of internal friction γ and the coefficient of energy dissipation K_y are reduced to a single parameter of the energy absorption coefficient. The above values are compared with each other and with the values obtained from the results of field experiments. An approach to accounting and further study of damping is suggested.

Keywords: damping, energy dissipation, analysis of civil engineering standards, fluctuations, multi-storey frame buildings.

Введение

Хорошо известно, что в реальных системах колебания не могут продолжаться бесконечно долго и с течением времени затухают. Это связано с тем, что часть энергии колебаний расходуется безвозвратно на преодоление сил трения среды, часть энергии преобразуется в тепло и т. д. Комплексно совокупность эффектов, приводящих к затуханию колебаний, называется демпфированием, оно выражается через отношение рассеянной энергии к полной работе колебаний:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (1)$$

где ψ — коэффициент поглощения энергии.

Величина ψ зависит от вида и качества материала, от его напряженного состояния, от продолжительности загрузки, от типа конструкции, от температуры и влажности материала и от ряда других факторов [1, 2]. Таким образом, становится ясно, что ψ — величина комплексная, состоящая из многих компонентов, вклад каждого из которых в общую сумму и соотношение между собой только предстоит установить.

В реальных расчетах величина ψ неудобна для использования, вместо нее чаще всего используют производные величины:

- коэффициент внутреннего трения (неупругого сопротивления) γ , равный отношению амплитуды неупругой деформации $\Delta\gamma$ к величине упругой деформации y :

$$\gamma = \frac{\Delta\gamma}{y} = \frac{\psi}{2\pi}; \quad (2)$$

- логарифмический декремент колебаний δ — натуральный логарифм отношения амплитуд затухающих колебаний через один период:

$$\delta = \ln \frac{\alpha_i}{\alpha_{i+1}} = \alpha T_d = -\frac{\ln(1-\psi)}{2}. \quad (3)$$

Методы

Рассмотрим подходы и значения, используемые в актуальных нормативных документах.

Так, в СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» при расчете ветровой нагрузки коэффициент динамичности напрямую зависит от логарифмического декремента колебаний δ .

В СП 413.1325800.2018 в табл. 4.2 приводятся значения коэффициента неупругого сопротивления γ для различных строительных материалов (железобетон, прокатная сталь и др.) для различных параметров динамической нагрузки. Норматив предусматривает расчет конструкции на действие гармонической нагрузки с круговой частотой вынужденных колебаний ω , зависящей от параметра затухания.

НП-031-01 (Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций) предлагают наиболее прогрессивную из представленных систему учета демпфирования конструкций, так как вводят зависимость от напряженно-деформированного состояния конструкции. Хорошо известно, что в реальных строительных конструкциях значительная часть энергии поглощается узлами, работающими за пределами текучести, что и нашло отражение в данном нормативном документе. Кро-

ме того, в нормах учитывается сухое трение, возникающее в узлах стальных конструкций на болтах, приведены соответствующие коэффициенты.

С другой стороны, при расчетах на сейсмические воздействия по СП 14.13330.2018 и СП 268.1325800.2016 величина сейсмического воздействия может корректироваться в зависимости от демпфирующих свойств конструкции. Для этого вводится коэффициент рассеивания энергии K_ψ , принимающий значения в диапазоне $\{0,7; 1,5\}$ и вычисляемый по формуле

$$K_\psi = \frac{1,5}{40h+1} + 0,5, \quad (4)$$

где h — относительный коэффициент затухания колебаний системы, $h = \delta / 2\pi$.

Формула (4) приводится в приложении Б к СП 268.1325800.2016 и формально применима только к мостовым конструкциям, для гражданских же зданий предусматривается только в виде заданных коэффициентов. Однако вызывают большое количество вопросов принципы, по которым выбирались основные параметры таблицы, содержащей указания по определению коэффициента, учитывающего способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии K_ψ , приведенной в СП 14.13330.2018 [3]. Так, например, остается неясным, почему назначается одинаковый коэффициент $K_\psi = 1,0$ для каркасных зданий с железобетонным и стальным каркасом, хотя достоверно известно, что у стальных зданий параметры затухания, как правило, в два раза ниже. Кроме того, никак не учитывается дифференциация каркасов по исполнению (сборный или монолитный), по этажности или по частотам собственных колебаний и т. п. Общая информация по всем описанным нормативным документам сведена в табл. 1.

Сравним значения, приведенные в нормативных документах, с некоторыми значениями величины ψ , полученными экспериментально для отдельных конструкций и для зданий целиком [2], — см. табл. 2 и 3.

Выводы. Проанализировав информацию, сведенную в табл. 1–3, можно сделать следующие выводы:

- В нормативной литературе в целом приводятся значения коэффициента ψ , близкие

к значениям, полученным экспериментально.

- При этом во всех рассмотренных нормативных документах приведены собственные системы критериев дифференциации:

Таблица 1

Параметры демпфирования в российских нормах

№	Нормативный документ	Параметры	δ	γ	$\xi, \%$	$K\psi^*$	ψ	Учитываемые характеристики
1	СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»	Железобетонные и каменные сооружения, а также здания со стальным каркасом при наличии ограждающих конструкций	0,300	0,095	19,1	–	0,451	Материал конструкции, конструктивная схема и ограждающие конструкции
		Стальные сооружения, футерованные дымовые трубы, аппараты колонного типа, в том числе на ж/б постаментах	0,150	0,048	9,5	–	0,259	
		Для стекла, а также смешанных сооружений, имеющих одновременно стальные и железобетонные несущие конструкции	0,220	0,070	14,0	–	0,356	
2	СП 413.1325800.2018 «Здания и сооружения, подверженные динамическим воздействиям» (при динамической нагрузке категорий III и IV**)	Железобетон ненапряженный	0,314	0,1	20,0	–	0,467	Условно только материал конструкции
		Железобетон предварительно напряженный	0,157	0,05	10,0	–	0,270	
		Прокатная сталь	0,079	0,025	5,0	–	0,145	
		Кирпичная кладка	0,251	0,08	16,0	–	0,395	
		Дерево	0,157	0,05	10,0	–	0,270	
3	НП-031-01 «Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций»	Железобетонные конструкции обычные при $\sigma = 0,67R$	0,25	0,080	4,0	–	0,393	Материал конструкции, тип узлов, НДС схемы
		То же при $\sigma \geq 0,9R$	0,44	0,140	7,0	–	0,585	
		Железобетонные конструкции преднапряженные при $\sigma = 0,67R$	0,12	0,038	1,9	–	0,213	
		То же при $\sigma \geq 0,9R$	0,31	0,099	4,9	–	0,462	
		Стальные конструкции сварные при $\sigma = 0,67R$	0,12	0,038	1,9	–	0,213	
		Стальные конструкции сварные при $\sigma = 0,9R$	0,25	0,080	4,0	–	0,393	
		Стальные конструкции болтовые при $\sigma = 0,67R$	0,25	0,080	4,0	–	0,393	
		Стальные конструкции болтовые при $\sigma = 0,9R$	0,44	0,140	7,0	–	0,585	

№	Нормативный документ	Параметры	δ	γ	$\xi, \%$	$K\psi^*$	ψ	Учитываемые характеристики
4	СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*» — гражданские здания	Высокие сооружения небольших размеров в плане (башни, мачты, дымовые трубы, шахты лифтов и т. п.)	0,079	0,025	1,2	1,500	0,145	Конструктивная схема здания
		Каркасные бесвязные здания, стеновое заполнение которых не оказывает влияния на НДС	0,137	0,044	2,2	1,300	0,240	
		Прочие здания и сооружения	0,314	0,100	5,0	1,000	0,467	
		Подземные сооружения***	1,021	0,325	16,2	0,700	0,870	
5	То же, для гидротехнических сооружений	Стальные сооружения / элементы сооружений	0,063	0,020	1,0	–	0,118	Только материал конструкции
		Бетонные и железобетонные сооружения / элементы сооружений	0,314	0,100	5,0	–	0,467	
		Сооружения из грунтовых материалов	0,942	0,300	15,0	–	0,848	
		Для скальных пород оснований	0,503	0,160	8,0	–	0,634	
		Для полускальных пород оснований	0,754	0,240	12,0	–	0,779	

Примечания:

* — коэффициент динамичности представлен только для сейсмических нагрузок;

** — для динамических нагрузках категорий I и II приведенные значения коэффициента γ в два раза меньше;

*** — коэффициент рассеивания для подземных сооружений приведен в ныне отмененном изм. 1 к СП 14.

Серым цветом обозначены ячейки, в которых приведены параметры демпфирования, заложенные в соответствующем нормативном документе.

Таблица 2

Значения ψ для различных конструкций

№	Тип конструкции	ψ_{cp}	Экспериментатор
1	Железобетонные рамы	0,380	Павлюк Н. П. [4]
2	То же	0,250	Савинов О. А. [4]
3	Железобетонные подкрановые балки:		
	до замоноличивания стыков	0,32	Сорокин Е. С. [1]
	после замоноличивания стыков	0,14	Сорокин Е. С. [1]
4	Железобетонные балки	0,25	Корчинский И. Л.
5	То же	0,56	Павлюк Н. П. [4]
6	Железобетонные ребристые перекрытия	0,57	Сорокин Е. С. [1]
7	Железобетонное безбалочное перекрытие	0,56	Хорт В. [5]
8	Железобетонные крупнопанельные перекрытия:		
	до замоноличивания стыков	0,22	Томсон О. И. [6]
	после замоноличивания стыков	0,522	Томсон О. И. [6]
9	Кирпичные столбы на цементном растворе	0,19	Мелик-Адамян Р. О. [7]
10	Кирпичная кладка при сжатии	0,24	Карапетян Б. Н. [1]

Значения ψ для целых зданий и сооружений

№	Тип конструкции	ψ_{cp}	Экспериментатор
1	Здания кирпичные высотой от 7 до 24 м	0,600	Медведев С. В. [8]
2	Железобетонные каркасные здания с кирпичным заполнением	0,460	Медведев С. В. [8]
3	Каркасные здания высотой от 8 до 22 этажей	0,360	Карцивадзе Г. Н., Бюс И. Е. [8]
4	Кирпичные дымовые трубы	0,42	Медведев С. В. [8]
5	Стальные дымовые трубы	0,11	Барштейн М. Ф. [8]

по материалу конструкции, по конструктивной схеме, по напряженному состоянию, по наличию ограждающих конструкций. Причем основания для выбора данных критериев неочевидны и в некоторых случаях произвольны. Это, вероятно, связано с недостатком натурных и численных экспериментов, с общей неразвитостью темы.

• Процесс демпфирования — сложный, многофакторный процесс, на который в явном виде влияют материал конструкции, его конструктивная схема и многие другие факторы, поэтому видится целесообразным следующий подход к определению демпфирования: общее демпфирование конструкции в целом представляется в виде суммы потерь энергии в каркасе здания, его узлах, энергии, рассеянной в уровне грунта, поглощенной демпфирующими устройствами, и других потерь, отнесенных к общей энергии, затраченной на колебательный процесс:

$$\psi_{ult} = \psi_{bl} + \psi_{jn} + \psi_{bs} + \psi_{df} = \frac{\sum \Delta W}{W}, \quad (5)$$

где ψ_{bl} , ψ_{jn} , ψ_{bs} , ψ_{df} — компоненты демпфирования, отвечающие соответственно за потери в каркасе здания, в его узлах, в фундаменте и в грунте и от демпферов.

Видится, что, разложив сложное явление демпфирования на составляющие компоненты, можно облегчить его дальнейшее изучение и практическое применение. Соответственно, получив значения ψ_{ult} , из них можно выразить уточненные значения логарифмического декремента колебаний δ , коэффициента неупругого сопротивления γ

и коэффициента K_{ψ} , необходимые для практических расчетов.

Библиографический список

1. Сорокин Е. С. Динамический расчет несущих конструкций зданий. М.: Госстройиздат, 1956. 340 с.
2. Корчинский И. Л., Бородин Л. А., Гроссман А. Б., Преображенский В. С., Ржевский В. А., Ципенюк И. Ф., Шепелев В. Ф. Сейсмостойкое строительство зданий / под ред. И. Л. Корчинского. М.: Высшая школа, 1971. 320 с.
3. Мкртычев О. В., Джинчелашвили Г. А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). 2-е изд. М.: МГСУ, 2014. 192 с.
4. Павлюк Н. П., Савинов О. Л. Труды научно-исследовательского сектора треста глубинных работ. Вып. 1. Л.: Госстройиздат, 1940.
5. Gehler W., Hort W. Schwingungsuntersuchungen an einer Eisenbeton- Pflzdecke des Ford-Neubaues in Köln. In: Deutscher Ausschuss für Eisenbeton (DAfEb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfEb, Heft 76, Berlin: Ernst & Sohn, 1934.
6. Ученые труды ЦНИПС за 25 лет (1927–1952) (сборник аннотаций) / сост. Г. С. Тихомиров; под общ. ред. А. Е. Десова. М.: Госстройиздат, 1952. 288 с.
7. Корчинский И. Л. Расчет строительных конструкций на вибрационную нагрузку. М.: Стройиздат, 1948. 134 с.
8. Современное состояние вопроса о внутреннем сопротивлении материалов // в сб.: Динамические свойства строительных материалов / под ред. Ю. А. Ниллендера. М.: Стройиздат Наркомстроя, 1940. 160 с.

References

1. Sorokin E. S. *Dinamicheskiy raschet nesushchikh konstruksiy zdaniy* [Dynamic calculation of load-bearing structures of buildings]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1956, 340 p.
2. Korchinskiy I. L., et al. *Seysmostoykoe stroitel'stvo zdaniy* [Seismic construction of buildings]. Ed. by Korchinskiy I. L. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1971, 320 p.

3. Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A. *Problemy ucheta nelineynostey v teorii seymstoykosti (gipotezy i zabluzhdeniya)* [Problems of accounting for nonlinearities in the theory of seismic resistance (hypotheses and delusions)]. 2-nd ed. Moscow, MGSU Publ., 2014, 192 p.

4. Pavlyuk N. P., Savinov O. L. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo sektora tresta glubinnykh rabot* [Proceedings of the research sector of the deep work trust]. Iss. 1. Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1940.

5. Gehler W., Hort W. *Schwingungsuntersuchungen an einer Eisenbeton-Pilzdecke des Ford-Neubaues in Köln*. In: Deutscher Ausschuss für Eisenbeton (DAfEb, Hrsg.). Schriftenreihe des DAfEb, Heft 76, Berlin, Ernst & Sohn Publ., 1934.

6. *Uchenye trudy TsNIPS za 25 let (1927–1952) (sbornik annotatsiy)* [Scientific works of TsNIPS for 25 years (1927–1952) (collection of annotations)]. Comp. by Tikhomirov G. S. Ed. by Desov A. E. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1952, 288 p.

7. Korchinskiy I. L. *Raschet stroitel'nykh konstruktsiy na vibratsionnuyu nagruzku* [Calculation of building structures for vibration load]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1948, 134 p.

8. *Sovremennoe sostoyanie voprosa o vnutrennem soprotivlenii materialov* [The current state of the issue of internal resistance of materials]. *Sb. stat. «Dinamicheskie svoystva stroitel'nykh materialov»* [Coll. works "Dynamic properties of building materials"]. Ed. by Nilender Yu. A. Moscow, Stroyizdat Narkomstroya Publ., 1940, 160 p.