

## ПРЕДЛОЖЕНИЯ В СОВРЕМЕННУЮ РЕДАКЦИЮ НОРМ И ПРАВИЛ СТРОИТЕЛЬСТВА В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

А.М. КУРЗАНОВ, *д-р техн. наук, профессор*  
*Российский университет дружбы народов, Москва*

*На основе опыта натурных динамических испытаний сооружений и обследования последствий сильных землетрясений изложены предложения в новую редакцию норм и правил строительства в сейсмических районах.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамические испытания, сейсмический район

### 1. Предложение по расчету сооружений на бегущую волну

При горизонтальном сейсмическом движении основания сооружения типа одного толчка расчет сооружения следует производить на бегущую вдоль его вертикальной оси изгибно-сдвиговую сейсмическую волну. Толчковое сейсмическое движение основания принимается в виде полуволны перемещения продолжительностью половины периода  $T_0$  (рис. 1).

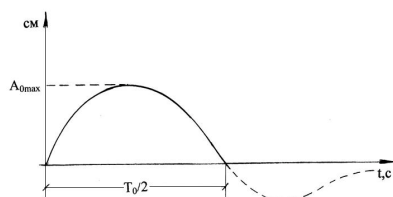


Рис. 1

Скорость пробега волны по сооружению определяется по формуле:  $V = 4H/T_1$ , где  $H$  – высота сооружения над обреза фундамента;  $T_1$  – период первой собственной формы упругих изгибно-сдвиговых колебаний расчетной модели сооружения в виде консольного стержня, жестко защемленного в основании на отметке верхнего обреза фундамента.

В табл. 1 предлагаются наибольшие расчетные амплитуды  $A_0 \max$  толчковых сейсмических перемещений основания в грунтах трех категорий (I, II, III) по сейсмическим свойствам для сооружений с разной величиной коэффициента ответственности  $K_1$ , учитывающего допускаемые повреждения сооружения по табл. 3\* в [1].

Таблица 1

Категория грунта по сейсмическим свойствам	$K_1$	$A_0 \max$ в см				
		Сейсмичность района в баллах MSK-64				
		6	7	8	9	>9
I	1,0	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0
	0,22-035	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0
	0,12	0,2	0,5	1,0	2,0	4,0
II	1,0	2,5	5,0	10,0	20,0	40,0
	0,22-035	1,0	2,5	5,0	10,0	20,0
	0,12	0,5	1,0	2,5	5,0	10,0
III	1,0	5,0	10,0	20,0	40,0	80,0
	0,22-035	2,5	5,0	10,0	20,0	40,0
	0,12	1,2	2,5	5,0	10,0	20,0

Примечания: 1) В 7-9 балльных сейсмических районах сейсмичность площадок с грунтами III категории по сейсмическим свойствам повышается на 1 балл только путем увеличения  $A_0 \max$ . При этом расчетная величина сейсмических ускорений основания остается соответствующей сейсмичности района; 2) В табл. 1 и далее по тексту величины наибольших расчетных сейсмических перемещений основания приняты с учетом исследований д-ра физ.-мат. наук, профессора геофизики В.И. Уломова.

Величина  $T_0$  на рис. 1 определяется по формуле:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{A_0 \max / a};$$

где  $a$  – расчетная амплитуда сейсмического ускорения основания сооружения по шкале MSK-64, см. табл. 2.

Таблица 2

Сейсмичность района в баллах	6	7	8	9	>9
Расчетное ускорение $a$ см/с <sup>2</sup> основания сооружения	50	100	200	400	>500

Если в текущее время  $t$  сейсмического толчка смещение основания сооружения описывается функцией  $d_0(t)$ , а высота на которую за время  $t$  поднимается по сооружению бегущая волна – функцией  $h(t)$ , то наиболее опасным для сооружения может быть момент, в котором текущее отношение  $d_0(t)/h(t)$  становится наибольшим.

При длине бегущей волны  $\lambda$  и логарифмическом декременте ее затухания  $\delta$  амплитуда бегущей вверх по сооружению волны на вершине сооружения

уменьшится до величины  $A_0 \max [1 - \frac{\delta H}{\lambda(1 + \delta)}]$ . При отражении от верха сооружения

амплитуда бегущей волны удвоится и станет равной

$2A_0 \max [1 - \frac{\delta H}{\lambda(1 + \delta)}]$ . Расчет на отраженную бегущую волну следует проводить

для высоких сооружений, в том числе многоэтажных зданий, высоких дымовых труб и башен.

Кроме расчета на бегущую волну с начальной амплитудой  $A_0 \max$ , высокое жестко защемленное в основании сооружение следует рассчитывать на бегущие волны с периодами  $T_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) первых трех собственных форм колебаний,

если  $T_1 > 0,4$  с и с периодом только  $T_1$ , если  $T_1 \leq 0,4$  с. В этих расчетах начальная амплитуда бегущей волны  $A_{0i} = aT_1^2/4\pi^2$ .

## 2. Предложение по сейсмоизоляции сооружений

Система сейсмоизоляции сооружений должна удовлетворять следующим требованиям:

- система, как правило, должна располагаться в уровне нулевой отметки сооружения между фундаментом и надземной частью сооружения;
- упругая реакция системы должна обеспечивать немедленное автоматическое восстановление проектного положения покоя сейсмоизолированной части сооружения относительно его фундамента после каждого сотрясения основания перед его следующим афтершоком, для чего при каждом движении основания система сейсмоизоляции должна приподнимать сейсмоизолированную часть сооружения, сообщая ей дополнительную гравитационную потенциальную энергию, достаточную для совершения работы по преодолению сил сопротивления, препятствующих восстановлению проектного положения сооружения до землетрясения;
- система должна обеспечивать многократные вынужденные нелинейно упругие демпфирующие горизонтальные относительные перемещения между сейсмоизолированной частью сооружения и его основанием с амплитудой не менее 10, 20, 40 см соответственно на 7, 8, 9-балльных сейсмических площадках по шкале MSK-64;
- до применения в строительстве российские и иностранные системы сейсмоизоляции должны пройти комплексную российскую натурную экспериментальную проверку, включающую натурную идентификацию расчетной модели системы "основание–сейсмоизолированное сооружение";
- сейсмоизолированное сооружение должно быть рассчитано на наиболее опасные инструментальные или синтезированные акселерограммы движения основания с наибольшими амплитудами его перемещений, соответствующими балльности площадки строительства.

## 3. Предложение по форме расчетной модели несейсмоизолированного сооружения на грунтах II и III категорий по сейсмическим свойствам

Расчетную модель несейсмоизолированного сооружения на грунтах II и III категории по сейсмическим свойствам следует принимать в форме консоли, упруго защемленной в грунте основания по схеме на рис. 2.

Расчетные модели воздействия следует принимать в форме наиболее опасных инструментальных акселерограмм и сейсмограмм.

Коэффициент жесткости  $r_0$  вертикальных упругих связей под подошвой фундамента сооружения определяется в расчетах основания по деформациям, как отношение веса сооружения  $Q$  к его расчетной статической осадке  $S_0$ .

В плоской задаче расчета модели на рис. 2 значения коэффициентов жесткости  $r_i$  горизонтальных упругих связей между фундаментом и основанием рекомендуется в первом приближении вычислять по формуле:

$$r_i = \gamma h_i \Delta h_i (\lambda_p - \lambda_a) / S_0,$$

где  $\gamma$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_a$  – соответственно объемный вес, ко-

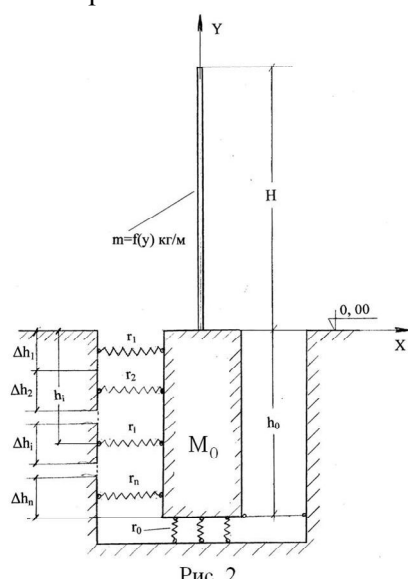


Рис. 2

эффективности пассивного и активного давления грунта обратной засыпки фундамента сооружения.

Следует подчеркнуть, что предложенные выше схемы расчетных моделей воздействий и сооружений носят концептуальный характер и подлежат развитию и уточнению применительно к особенностям конкретных моделей сейсмического воздействия и системы "сооружение–основание".

Диссипативные характеристики упругих связей между фундаментом проектируемого сооружения и его основанием рекомендуется определять путем экспериментальных исследований, в том числе натурными измерениями микросейсмических затухающих колебаний системы "основание-фундамент" натурального сооружения, расположенного на основании, одинаковом с основанием проектируемого сооружения.

В расчетах на инструментальные акселерограммы необходимо учитывать погрешность положения нулевой линии акселерограммы. Известны инструментальные акселерограммы 7-9 балльных землетрясений, при интегрировании которых погрешность положения нулевой линии приводит к расчетным перемещениям основания, измеряемым десятками и сотнями метров. Причина таких погрешностей – неучет при определении постоянных интегрирования начальных условий (скорости  $V_0$  и перемещения  $d_0$ ), отнесенных не к моменту начала землетрясения, когда их естественно принять равными нулю, а к моменту преодоления порога включения записи акселерограммы.

Например, неучет погрешности положения нулевой линии при интегрировании акселерограммы в процессе расчета перемещений основания под зданием, установленным на идеальные сейсмоизолирующие опоры, скользящие без трения по идеально горизонтальной поверхности фундаментной плиты, приводит к тому, что в отсутствие ограничителей перемещений сейсмоизолированная часть сооружения остается неподвижной, а фундамент, сотрясаясь, уползает из под нее вместе с основанием.

Объяснение больших расчетных перемещений хорошо сейсмоизолированного сооружения относительно основания сейсмическим резонансом несостоятельно. Перемещения останутся такими же большими и в случае, когда между основанием и сейсмоизолированной частью сооружения не будет ничего, кроме воздушной подушки. Связанный с погрешностью нулевой линии акселерограммы нереальный эффект уползания основания из-под сооружения обнаруживается только в расчетах хорошо сейсмоизолированных сооружений и неизвестен большинству специалистов. Сказанное выше относится к упругим сейсмическим перемещениям основания сооружений при некатастрофических землетрясениях интенсивностью до 9 баллов включительно по шкале MSK-64.

#### **4. Предложение по мониторингу конструктивной сейсмической безопасности ответственных сооружений**

Мониторинг конструктивной сейсмической безопасности сооружений предлагается проводить методом периодической регистрации и сравнительного анализа изменений характеристик бегущей по сооружению опытной волны: скорости, затухания, соотношения между изгибной и сдвиговой деформациями и др. Такие регистрация и анализ на конкретных участках сооружения позволяют получить больше информации об изменении состояния конструкций принадлежащих этим участкам.

Изменение собственных частот и форм колебаний сооружения в целом зависит от способа и места приложения динамической нагрузки, периодического сезонного изменения расчетных параметров динамической системы "сооруже-

ние-основание", в том числе положения границы между системой и внешней средой, например, при частичном замерзании или оттаивании основания, изменении уровня грунтовых вод и т.п. Кроме того, как свидетельствует опыт натурных вибрационных испытаний сооружений мощными вибростанциями, при микросейсмическом вибрационном воздействии резонансная частота системы "сооружение-основание" сперва уменьшается, а затем обратимо повышается вслед за увеличением и последующим уменьшением вибрационной нагрузки. В целом, периодические тестовые испытания технического состояния натурального сооружения микросейсмической бегущей волной надежнее, безопаснее и требуют меньше затрат средств и времени, чем испытания вибрационной нагрузкой. Для возбуждения бегущей по сооружению микросейсмической волны достаточно, например, ударить тяжелой плитой по поверхности грунта на расстоянии одного-двух десятков метров от сооружения.

### **5. Предложения по проектированию в сейсмических районах высоких дымовых труб и башен**

1. К башням следует относить высокие и узкие архитектурные сооружения, высота которых в 10 раз и более превосходит наименьший поперечный размер сооружения в уровне его нулевой отметки.

2. Расчет высоких дымовых труб и башен (высотой  $H > 60$  м) следует выполнять с использованием инструментальных записей ускорений и перемещений основания при землетрясении, наиболее опасных для проектируемого сооружения. При расчете следует учитывать возможность развития неупругих деформаций конструкции.

3. В фундаменте высоких труб и башен, следует устраивать сейсмоизоляцию, допускающую горизонтальное упругое перемещение между сейсмоизолированной и несейсмоизолированной частями сооружения не менее чем на 0,1 м; 0,2 м; 0,4 м,  $>0,4$  м на 7, 8, 9 – балльных и более сейсмических площадках соответственно.

4. В конструкцию высоких труб и башен, проектируемых на 7-9 балльных сейсмических площадках, следует включать устройства поглощающие энергию бегущей по сооружению поперечной волны и препятствующие удвоению ее амплитуды при отражении от верха сооружения.

5. Основание под высокими трубами и башнями должно допускать равномерную упругую осадку их фундамента под динамической вертикальной сейсмической нагрузкой, равной произведению расчетной вертикальной статической нагрузки на коэффициенты 0,1; 0,2; 0,4,  $>0,4$  на 7, 8, 9,  $>9$  – балльных сейсмических площадках соответственно.

6. Крен труб и башен под расчетным сочетанием статической и сейсмической нагрузок должен быть упругим, а его величина  $i_U$  (в радианах) не должна превышать 0,005 для сооружений высотой  $H \leq 100$  м и  $\frac{1}{2}H$  – для сооружений с  $H > 100$  м. Сейсмический крен высоких труб и башен следует определять с учетом увеличения эксцентриситета равнодействующей расчетной вертикальной статической нагрузки на основание сооружения.

7. В расчетах труб и башен на сейсмическую нагрузку следует принимать не менее двух расчетных сейсмических движений основания:

- движение большой продолжительности с выраженным преобладанием определенных периодов колебаний расчетной модели "сооружение-основание";
- движение в виде одного толчка, возбуждающее в трубах и башнях бегущие поперечные и продольные прямые и отраженные волны с начальными амплитудами перемещений одного порядка с соответствующими расчетными сейсмическими перемещениями основания под сооружением.

8. Расчетные модели построенных труб и башен высотой  $H > 60$  м подлежат натурной идентификации с последующим контрольным расчетом идентифицированной модели на воздействие инструментальных или синтезированных акселерограмм и сейсмограмм, наиболее опасных для данного сооружения.

9. В расчетных моделях труб и башен высотой  $H > 60$  м следует учитывать геометрически нелинейную реакцию сооружения при больших сейсмических перемещениях основания и больших температурных изгибных деформациях сооружения вследствие не осесимметричного прогрева конструкций по разные стороны от оси сооружения.

10. Сейсмические площадки, предназначенные для строительства высоких труб и башен, подлежат обязательному микросейсморайонированию.

#### **6. Предложение по типовому перечню работ, подлежащих выполнению с целью сейсмозащиты недостаточно сейсмостойкого сооружения существующей застройки**

Типовой перечень работ включает:

- оценку сейсмической опасности площадки расположения сооружения;
- анализ соответствия проекта сооружения современным нормам и правилам сейсмостойкого строительства;
- инструментальное обследование технического состояния основания и конструкций сооружения;
- разработку априорной расчетной динамической модели системы "сооружение-основание" на основе результатов ее обследования и анализа проектной документации;
- натурную идентификацию расчетной динамической модели системы "сооружение-основание" неразрушающим микросейсмическим импульсивным воздействием, приложенным к грунту основания сооружения;
- оценку фактической сейсмостойкости сооружения расчетом его идентифицированной расчетной модели на нормативные сейсмические воздействия;
- разработку проекта сейсмозащиты системы "сооружение-основание";
- авторский надзор за производством строительных работ по проекту сейсмозащиты;
- натурную идентификацию расчетной динамической модели сейсмозащищенной системы "сооружение-основание";
- оценку сейсмостойкости сейсмозащищенной системы "сооружение-основание" контрольным расчетом ее идентифицированной расчетной модели на нормативные сейсмические воздействия.

#### Л и т е р а т у р а

1. СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах. М., ОАО «ЦПП», 2007.
2. Курзанов А.М. О расчетных сейсмических перемещениях оснований // Промышленное и гражданское строительство. – 2000. – № 11. – С 44-45.

### **RECOMMENDATIONS FOR MODERN REDACTION OF STANDARDS AND RULES OF BUILDING IN SEISMIC REGIONS**

Kurzanov A.M.

Recommendations for modern reduction of standards and rules for building in seismic regions are given due to the natural dynamic tests of buildings and to investigation of consequences of hard earthquakes.