

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Т. А. ГОРОЯН

ОБ УПРОЩЕННЫХ СПОСОБАХ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ

Для систем со многими степенями свободы сейсмическая нагрузка, развиваемая массой m_k , по всем формам нормальных колебаний представляется в виде ряда [1]

$$S_k = m_k \sum_{r=1}^n \gamma_{kr} \gamma_r (T_r, \gamma_r, t), \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

отдельные слагаемые которого достигают своих максимумов в различные моменты времени. Здесь γ_{kr} — коэффициент формы колебаний; $\gamma_r(T_r, \gamma_r, t)$ — приведенное сейсмическое ускорение; T_r — период r -го тона свободных колебаний; γ_r — коэффициент внутреннего трения; n — число степеней свободы системы.

При спектральном методе определения сейсмических усилий учет влияния высших форм колебаний связан с серьезными затруднениями для преодоления которых имеются упрощенные способы.

А. Г. Назаров [2] считает возможным одновременное сочетание различных максимумов $\gamma_r(T_r, \gamma_r, t)$ и предлагает наложение сейсмических сил по формам колебаний произвести так, чтобы в данном сечении сооружения получить наибольшее напряженное состояние. Это сочетание будет соответствовать абсолютному максимуму величины сейсмического усилия, равному сумме максимумов отдельных форм. По И. А. Корчинскому [3] расчет следует вести по резонансному состоянию для каждой формы свободных колебаний в отдельности и в качестве расчетной выбрать форму, являющуюся наипасной для данного сечения сооружения. Указанные два способа дают экстремальные значения сейсмической нагрузки: по А. Г. Назарову получается верхний предел сейсмической нагрузки, по И. А. Корчинскому — нижний.

Исходя из вероятностного подхода, возможным максимальным пределом сейсмических усилий будет не арифметическая сумма максимумов нормальных форм, а условно-геометрическая*, т. е.

$$Q_p = \sqrt{\sum_{r=1}^n Q_r^2} \quad (2)$$

* Иногда в литературе выражение (2) неправильно называют «среднеквадратичное усилие».

где Q_p — расчетное значение усилия (перерезывающей силы, изгибающего момента или др.) в рассматриваемом сечении;

Q_i — максимальное значение данного вида усилия по i -ой форме нормальных колебаний;

q — число учитываемых форм.

В пользу принятия (2) в качестве расчетного максимума высказываются И. А. Корчинский [4], Э. Е. Хачиян [5] и др. Действующими нормами [6] рекомендуется расчетное усилие определять по формуле:

$$Q_p = \sqrt{Q_{\max}^2 + 0,5 \sum Q_i^2}, \quad (3)$$

где Q_{\max} — наибольшее значение максимальных усилий, отвечающих отдельным формам нормальных колебаний.

Приемлемость формул (2) и (3) мало обоснована. Результаты, полученные Э. Е. Хачияном [5] для изгибаемого и сдвигаемого бруса постоянного сечения на основании расчетов по реальным акселерограммам, показывают большую приемлемость формулы (2). Однако, применительно к реальным зданиям, не выявлена степень погрешности, получаемой при пользовании той или иной формулой.

С этой целью в статье приводятся результаты сопоставления истинных значений усилий по трем формам колебаний со значениями, получаемыми по формулам (2) и (3). Для конкретных 10-этажных каркасных зданий с использованием акселерограмм четырех калифорнийских землетрясений интенсивностью в 7–8 баллов по методике, приведенной в [7], на ЭЦВМ вычислены истинные величины поэтажных перерезывающих сил как по отдельным формам колебаний, так и с учетом наложения первых трех форм. При этом, учитывая, что пока отсутствуют реальные данные о затуханиях колебаний высотных зданий, для всех форм предположительно принято $\gamma = 0,12$.

Беря за основу параметры 10-этажного железобетонного каркасного здания (рассмотренного в [7]), имеющего постоянную жесткость по высоте и постоянство поэтажных масс, и варьируя жесткостью первого этажа, а также изменением поэтажной жесткости по высоте, рассмотрены 10 вариантов, в том числе: 3 варианта с „гибким“ первым этажом (варианты А, Б и В); 3 варианта с „жестким“ первым этажом (варианты Д, Е и Ж); 3 варианта при линейном законе убывания поэтажной жесткости по высоте здания (варианты И, К и Л). Периоды свободных колебаний рассмотренных зданий, вычисленные в предположении абсолютной жесткости ригелей, приведены в табл. 1. Поэтажные величины коэффициентов γ_{ij} определены непосредственным решением систем уравнений движения масс.

Максимальные значения приведенного сейсмического ускорения

$$\gamma_r(T_r, \gamma, t) = \frac{2\pi}{T_r} \int_0^t y_{ij}(\xi) e^{-\frac{\pi}{T_r}(\xi-t)} \sin \frac{2\pi}{T_r}(t-\xi) d\xi,$$

вычисленные при законе колебания почвы $y_1(t)$ — акселерограмме, приведены в табл. 2

Таблица 1

Варианты		Периоды свободных колебаний, сек		
		I тона	II тона	III тона
А	$\alpha = 0,15$	1,347	0,387	0,213
Б	$\alpha = 0,3$	1,101	0,356	0,206
В	$\alpha = 0,6$	0,965	0,328	0,196
Г	$\alpha = 1$	0,910	0,307	0,187
Д	$\alpha = 1,5$	0,833	0,298	0,181
Е	$\alpha = 2$	0,865	0,292	0,179
Ж	$\alpha = 3$	0,855	0,287	0,176
И	$\alpha = 1,2$	0,997	0,362	0,221
К	$\alpha = 1,4$	1,074	0,419	0,260
Л	$\alpha = 1,8$	1,139	0,482	0,305

Примечания: α — отношение жесткостей первого и типового этажей;
 n — то же последнего и первого этажей.

Таблица 2

Варианты	Формы колебаний	max $ \tau_r $ в см/сек ² при акселерограммах				Варианты	Формы колебаний	max $ \tau_r $ в см/сек ² при акселерограммах			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
А	I	18	44	-104	32	Е	I	39	129	186	53
	II	173	-289	729	-96		II	-213	320	707	-154
	III	-203	239	-601	259		III	283	248	-466	-154
Б	I	22	75	-97	36	Ж	I	40	129	-190	54
	II	212	400	743	-138		II	-215	306	704	-166
	III	249	241	-579	-239		III	276	247	-456	-146
В	I	28	113	-148	41	И	I	27	101	-134	-39
	II	-168	476	730	156		II	215	-372	735	-126
	III	244	253	562	-213		III	-221	250	-582	263
Г	I	32	126	174	45	К	I	23	82	-106	-88
	II	-203	-428	-710	138		II	113	271	729	-717
	III	258	254	521	-177		III	-257	-251	642	706
Д	I	36	129	182	50	Л	I	20	67	36	36
	II	-205	366	-708	143		II	89	-277	-98	101
	III	282	249	-474	-159		III	-306	-418	211	138

Для всех 10 вариантов по формулам (2) и (3) вычислены поэтажные значения перерезывающих сил по трем формам колебаний и определены величины их отклонений (в процентах) от своих истинных значений. Эпюры перерезывающих сил (при акселерограмме № 1) приведены на рис. 1.

Рассмотрев каждое из отклонений приближенной величины от ее истинного значения (независимо от этажа, землетрясения и конструкции здания) как случайную величину, произведен статистический анализ совокупностей ошибок X , получаемых при использовании формул

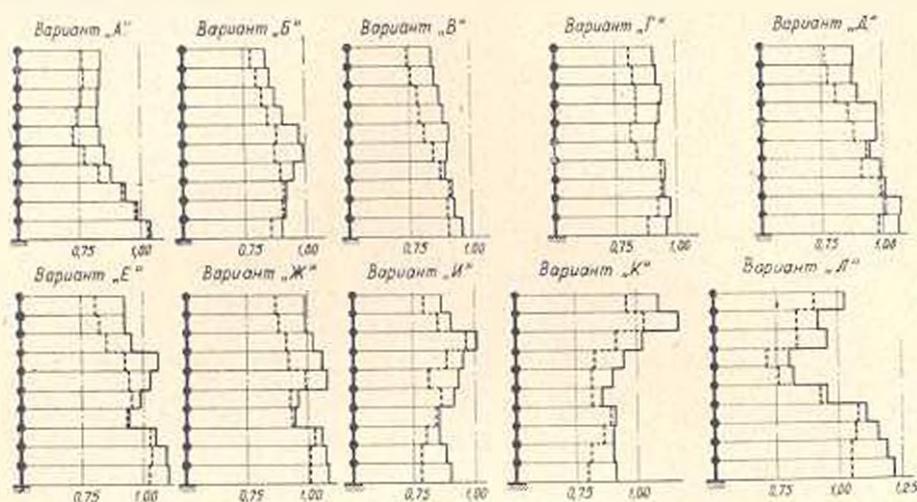


Рис. 1. Эпюры вычисленных по формулам (2) и (3) положительных значений перерезывающих сил по трем формам колебаний в долях их истинных значений для рассмотренных вариантов 10-этажных зданий (при акселерограмме № 1):
 — по формуле (2); — — — по формуле (3).

(2) и (3). При объеме выборки по 400 элементов составлены статистические ряды, гистограммы которых приведены на рис. 2, а основные выборочные параметры распределения ошибок — в табл. 3.

Таблица 3
 Выборочные параметры распределения ошибок

Параметры	При формуле (2)	При формуле (3)
Среднее — \bar{x} (и %)	—5,15	—11,20
Дисперсия — σ^2	94,4	118,3
Стандарт — σ	9,72	10,88
Момент III порядка — μ_3	622	295
Момент IV порядка — μ_4	37476	47724
Асимметрия — $\rho_3 \sigma^3$	0,678	0,229
Экцесс — $\frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3$	1,206	0,410

Для обеих выборок принята гипотеза нормального распределения, при котором асимметрия и эксцесс равны нулю. Приведенные в табл. 3 асимметрия и эксцесс — выборочные, которые, как и все выборочные параметры, являются случайными величинами и поэтому даже для нормального распределения могут отличаться от нуля. Поэтому произведена проверка нормальности с использованием критерия согласия Пирсона, позволяющего применять „метод сгруппированных данных“, значительно облегчающий вычислительную работу.

Согласно критерию Пирсона, распределение нормальное, если $\chi^2 < \chi^2_{1-\rho}$, где $\chi^2_{1-\rho}$ — квантиль распределения Пирсона (χ^2 -распределение) при уровне значимости ρ . При уровне значимости 5% [8] и ре-

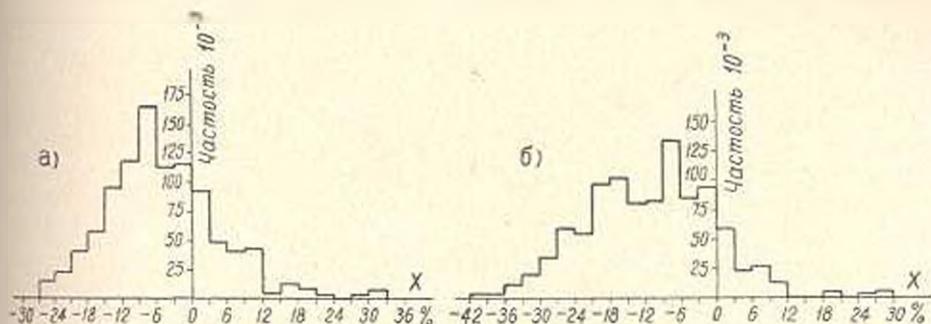


Рис. 2. Гистограммы ошибок (X) при вычислении поэтажных значений перерезывающих сил по трем формам колебаний:
а — по формуле (2); б — по формуле (3).

зультате вычислений получено, что для рассматриваемых распределений имеют место следующие неравенства:

- а. При формуле (2) — $\chi^2 = 14,76 < \chi^2_{0,95} = 18,3$;
б. При формуле (3) — $\chi^2 = 17,44 < \chi^2_{0,95} = 18,3$.

т. е. в обоих случаях распределение нормальное. Кривые нормального распределения ошибок приведены на рис. 3. Вычислены значения вероятностей попадания ошибок в заданные интервалы. Результаты вычислений приведены в табл. 4.

Таблица 4

Вероятности ошибок при вычислении поэтажных значений перерезывающих сил по трем формам колебаний по формулам (2) и (3)

Пределы ошибок (X в %)	Вероятность		Пределы ошибок (X в %)	Вероятность	
	При формуле (2)	При формуле (3)		При формуле (2)	При формуле (3)
-5 X 0	0,1959	0,1326	-15 X 0	0,5466	0,4847
0 X 5	0,1498	0,0782	0 X 15	0,2787	0,1437
-5 X 5	0,3457	0,2108	-15 X 15	0,8253	0,6284
-10 X 0	0,3934	0,3045	-20 X 0	0,6386	0,6390
0 X 10	0,2367	0,1260	0 X 20	0,2933	0,3497
-10 X 10	0,6321	0,4305	-20 X 20	0,9319	0,7887

Как видно из данных табл. 4, формула (2) дает более приемлемые результаты, чем формула (3). Так, вероятность того, что вычисленные по формуле (2) значения поэтажных перерезывающих сил по трем формам колебаний будут иметь отклонения от своих истинных значений в пределах $\pm 15\%$, составляет 83%, а при формуле (3) — 63%. При

отклонении в пределах $\pm 20\%$ эти вероятности соответственно составляют 93% и 79% .

Таким образом, результаты проведенного статистического анализа подтверждают целесообразность применения формулы (2), взамен

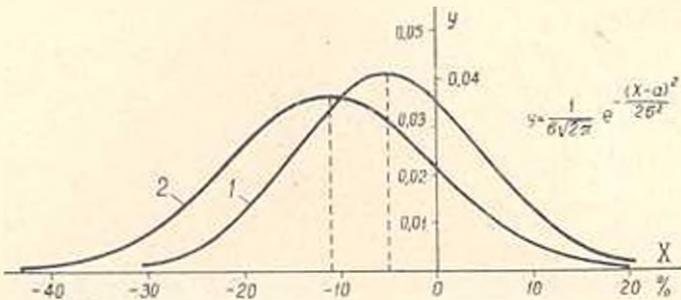


Рис. 3. Кривые нормального распределения ошибок:
1 — при формуле (2); 2 — при формуле (3).

рекомендуемой СНиП II — А. 12 — 62 [6] формулы (3), для упрощенной оценки величин сейсмических усилий с учетом наложения нескольких форм нормальных колебаний.

Армянский НИИ
стройматериалов и сооружений

Поступило 9.II. 1970.

Տ Ա ՎՈՐՅԱՆ

ՍԵՅՍՄԻԿԻ ԼԻՊԵՐԻ ՎՐԱ ՏԱՏԱՆՈՒԹՅՆԵՐԻ ԲԱՐՁՐ ՉԵՎԵՐԻ ԱԶԳԵՑՈՒԹՅԱՆ
ՀԱՇՎԱԾՔԻ ՊԵՐՉԵՑՐԱՆ ԵՎ ԱՆԱԿՆԵՐԻ ՎԵՐԱՔԵՐՅԱԼ

Ա մ փ ո փ ու ռ

Բերված են սեյսմիկ ճիգերի վրա տատանումների բարձր ձևերի ազդեցության հաշվառքի պարզեցրած եղանակների վերլուծության արդյունքները: Օգտագործելով 7—8 բալլ սեյսմության չորս երկրաշարժերի ակտիվությունները, էկեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի օգնությամբ հաշվարկվել են տասնարկանի երկաթբետոնե կարկասային 10 շենքերի սեպտանները՝ ինչպես ըստ սեփական տատանումների տասնձին ձևերի, այնպես և առաջին երկր ձևերի վերադրման հաշվառքով: Կատարված է սեյսմիկ ճիգերը տարբեր մոտավոր եղանակներով որոշելիս ստացվող սխալների վիճակագրական վերլուծություն: Ստացվել է, որ իրական սեյսմություններին ամենալավ մոտավորություն է տալիս սեփական տատանումների տասնձին ձևերին համապատասխանող ճիգերի երկրաչափական դոմարը:

Տատանումների մի քանի ձևերի վերադրման հաշվառքով սեյսմիկ ճիգերի սեյսմությունների պարզեցրած դինամոման համար նպատակահարմար է համարվում գործող նորմաներով [6] հանձնարարվող (3) բանաձևի փոխարենը ընդունել (2) բանաձևը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ячмян Э. Е. К динамическому расчету упругой системы на силы землетрясения. „Известия АН Арм ССР (серия ТН)“, т. XIII, № 3, 1960.
2. Назаров А. Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил. Изд. АН Арм ССР, Ереван, 1959.
3. Ворчинский И. А. Сейсмические нагрузки на здания и сооружения. Госстройиздат, 1959.
4. Ворчинский И. А., Поляков С. В. и др. Основы проектирования зданий в сейсмических районах. Госстройиздат, 1961.
5. Ячмян Э. Е. Расчет сооружений на сейсмостойкость по амплитудограммам сильных землетрясений. „Известия АН Арм ССР (серия ТН)“, т. XVII, № 1, 1964.
6. Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах. СНиП II—А. 12—62. Госстройиздат, 1963.
7. Горюхи Т. А. О числе форм колебаний, подлежащих учету при определении расчетных сейсмических усилий в элементах каркасных зданий. „Известия АН Арм ССР (серия ТН)“, т. XXIII, № 2, 1970.
8. Пустыльников Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. Изд. „Наука“, 1968.