

УДК 550.34

**ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ФАКТОРА ТРЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

доктор ф.-м. н., профессор Бугаевский Г.Н., аспирант Ковалев А.А.

Национальная академия природоохранного и курортного строительства

При возникновении землетрясения область среды, через которую проходят сейсмические волны, движется вместе с волнами по отношению к тому положению, которое она занимала в состоянии равновесия. Таким образом, часть среды по отношению к своему исходному положению оказывается подвижной системой координат в неподвижной [1]. Каждая точка среды при этом совершает сложные движения: поступательные и вращения вокруг мгновенных осей. Произведения ускорений этих движений и масс точек в виртуально неподвижной системе создают обратно направленные силы инерции [2, 3]. К сожалению, такие сложные движения точек среды невозможно зарегистрировать строго, так как при землетрясении не остается ни одного неподвижного элемента среды. Выделяя точки, упруго связанные с движущейся опорой так, что у такой точки остается лишь одна степень свободы в момент начала землетрясения, регистрируют движение по этой одной степени свободы. В качестве такой точки принимают центр масс физического маятника. Выбрав три таких маятника с взаимно перпендикулярными осями, получают трехкомпонентный комплект для регистрации произвольно направленного относительного движения элемента среды. Поскольку каждая вращательная скорость перпендикулярна своей оси вращения, трехкомпонентный комплект «раскладывает» сложное движение на три составляющие поступательного движения. Силы инерции вращательного движения остаются при этом фактически не зарегистрированными и это отдельная «боль» геофизиков. Но и то, что зарегистрировано, является не действительным инерционным движением, а суммой движений среды в сейсмической волне и собственных колебаний объекта – зданий, сооружений по каждой степени свободы, возбуждаемых не только первым, но и последующими сейсмическими движениями. Это, как известно, есть предмет решения обратной задачи сейсмометрии [4, 5].

Рассматривая в качестве среды всё, что нас окружает вместе с нами, здания и различные сооружения, мы должны рассматривать среду как физический объект. Реакция этой среды на прохождение сейсмических волн, определяется не только «слепым отражением» сейсмического движения в волне. Она характеризуется также распределением собственных механических свойств в связанных системах [6, 7], их способностью к более или менее быстрой реакции на воздействие. В неоднородной среде, эта ее способность должна быть различной в разных ее точках.

Одним из определяющих параметров этих свойств может служить так называемый фактор трения – коэффициент пропорциональности диссипативной силы инерции. Это свойство среды определяется не только, скажем, проектом сооружения, но и практической реализацией проекта на строительной площадке. К сожалению, не известны свойства этого

коэффициента, его зависимость (или независимость) от амплитуды и частоты колебаний. Мы не умеем надежно заложить его в проекте и мало занимаемся его определением в возведенном сооружении [8, 9].

Численное значение фактора трения в той или иной точке сооружения необходимо для решения прямой задачи о реакции сооружения на определенное внешнее силовое воздействие „Неопределенность законов распределения демпфирующих характеристик конструкций делает нецелесообразным расчет их *вынужденных* колебаний с использованием уточненной математической модели“. „При резонансе... коэффициент динамичности..., определяющий отношение максимального перемещения к статическому, зависит лишь от величины ϵ (обобщенной характеристики демпфирования конструкции – в данной статье \mathcal{E}). Отсюда вытекает важность определения демпфирующих характеристик конструкции с оценкой *точности*“. [10].

Фактор трения является параметром, фактическое значение которого может быть определено только экспериментально [11, 12]. Результаты таких определений для реального здания, диссипация энергии в котором при сейсмическом воздействии, ранее, по-видимому, не оценивалась, имеет принципиальное значение [13].

Цель данной работы состоит в том, чтобы определить экспериментально значения фактора трения различных колебательных систем, обеспечивая различные условия эксперимента – различную интенсивность внешнего воздействия и различные диапазоны частот. Чтобы эти определения были достаточно убедительными, целесообразно проделать их в цепи объектов, начиная с простейших систем в каждом случае с оценками погрешностей. Такими системами могут служить маятниковые сейсмоприемники, механические калибровочные стенды и другие колебательные устройства и системы.

Физический маятник сейсмоприемника – тело со стационарной осью вращения может служить одной из простейших колебательных систем. Для определения его частотной характеристики может быть использован «генераторный метод», состоящий в регистрации отклика маятника на

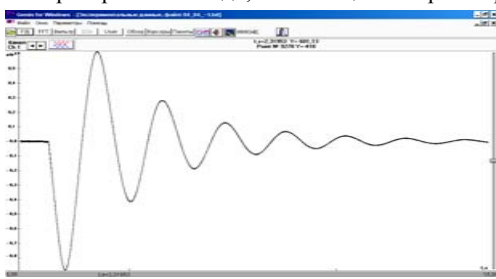


Рис.1. Запись собственных Затухающих колебаний сейсмоприемника СМЗ-КВ [14] (рис.1). В качестве единичного воздействия использовано начальное смещение горизонтальных маятников, мгновенно

снимаемое достаточно простым, легко и строго повторяющимся способом. Обычно динамические свойства маятника (частота n собственных незатухающих колебаний, $D = \varepsilon/n$ – постоянная затухания где ε – коэффициент затухания или «фактор трения») (табл.1).

Табл. 1
 Определение фактора трения и постоянной затухания для СМЗ-КВ № 419

| i | y_i | T_i | $\frac{y_i}{y_{i+1}}$ | $\Lambda_i = \ln \frac{y_i}{y_{i+1}}$ | ε | \bar{n} |
|------------------|-------|-------|-----------------------|---------------------------------------|---------------|-----------|
| 1 | 629 | | | | | |
| 2 | 291 | 1.38 | 2.1615 | 0.7708 | 0.5585 | 0.7246 |
| 3 | 135.2 | 1.34 | 2.1523 | 0.7665 | 0.5720 | 0.7462 |
| 4 | 70.8 | 1.31 | 1.9096 | 0.6468 | 0.4938 | 0.7633 |
| 5 | 41.3 | 1.27 | 1.7142 | 0.5389 | 0.4244 | 0.7874 |
| Средние значения | | | | | 0.5122 | |

| n | D | $\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}$ | $(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2$ |
|--------|--------|-------------------------------------|---|
| 0.9149 | 0.6104 | -0.0463 | 0.0021 |
| 0.9403 | 0.6083 | -0.0598 | 0.0035 |
| 0.9091 | 0.5431 | 0.0183 | 0.0003 |
| 0.8944 | 0.4744 | 0.0878 | 0.0077 |
| | 0.5591 | | 0.0137 |

Отсюда следует, что по данной серии наблюдений $\varepsilon = 0.512 \pm 0.058$. Выполнив работу по пяти подобным сериям, получим фактор трения колебательной системы сейсмоприемника: $\varepsilon_{cp} = 0.5083 \pm 0.0074$. Таким образом погрешность в определении фактора трения составляет 1.5%. Сейсмометрическая постоянная затухания, средняя по пяти сериям, $D = 0.5547 \pm 0.0055$ (погрешность 1%). Частота и период затухающих колебаний, соответственно, $\bar{n} = 0.7570$ Гц, $\bar{T} = 1.3210$ с. При этом, частота незатухающих колебаний составляет $n = 0.9118$. (n и D задаются для получения сейсмоприемника, способного регистрировать ту или иную кинематическую характеристику движения основания и его чувствительность).

Калибровочный стенд для идентификации инженерно-сейсмометрической аппаратуры [15, 16] имеет (в пределах амплитуды ± 1 мм) одну степень свободы движения платформы. Измерителем движения платформы служит индуктивный преобразователь разведочного

сейсмоприемника (СП) с низкой чувствительностью. Его катушка жестко связана с подвижной платформой – столом, а магнитная система – с неподвижным основанием стэнда, которое жестко закреплено на бетонном фундаменте. Этот индуктивный преобразователь используется как измеритель-индикатор движений платформы с определенным коэффициентом преобразования по скорости. Колебательная система платформы имеет свою механическую характеристику. Для фиксирования ее движения и определения динамической характеристики колебательной системы и используется этот преобразователь, частотная характеристика которого, как СП, утратила свое значение.

В качестве задающего использовался генератор фирмы Nameg NM 8132. Чтобы определить динамическую частотную характеристику колебательной системы стэнда, применен сейсмоприемник СМЗ-КВ, электродинамический преобразователь которого достаточно эффективен (коэффициент $135 \text{ В} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$), а его частотная характеристика определена. Записав с помощью этого СП свободные затухающие колебания системы и пользуясь теоремами о спектрах, получим возможность определить частотную характеристику стэнда.

Определение фактора трения механической системы стэнда выполнено в результате *ступенчатого отключения* от силовой системы стэнда сигнала задающего генератора на каждой из частот 3, 5 и 7 Гц. После этого отключения колебательная система стэнда совершает движения на частоте собственных затухающих колебаний. На рис.2 представлен пример цифровой записи общего сигнала. **Курсором отмечен момент отключения сигнала задающего генератора (с частотой 5Гц).** Спектр гармонической части сигнала на этой частоте изображен на рис.3. Спектр на частотах 3, 5 и 7 Гц имеет вид острого максимума на соответствующих частотах, ширина которого даже в основании не превосходит 0.25Гц. Спектры затухающих колебаний (экспоненциальная часть) приведены на рис. 4.

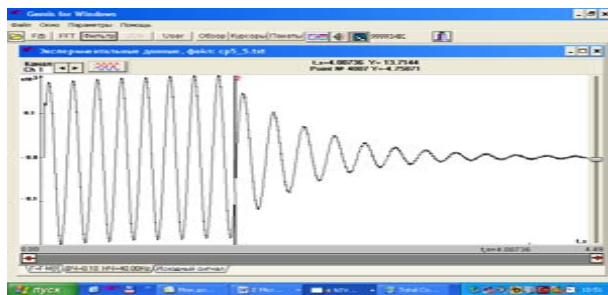


Рис.2. Пример записи колебаний платформы стэнда.

В этом случае спектральные максимумы в основании (независимо от частоты предшествующей гармонике), имеют ширину на порядок большую.

Из теории следует, что спектр ступенчатого сигнала есть амплитудная характеристика соответствующей колебательной системы в данном случае – платформы. Отметим, что если подобное движение задать реальному зданию, то спектр записи его затухающих колебаний и будет амплитудной характеристикой здания. Ее определение, как известно, является одной из основных задач динамической паспортизации зданий, сооружений.

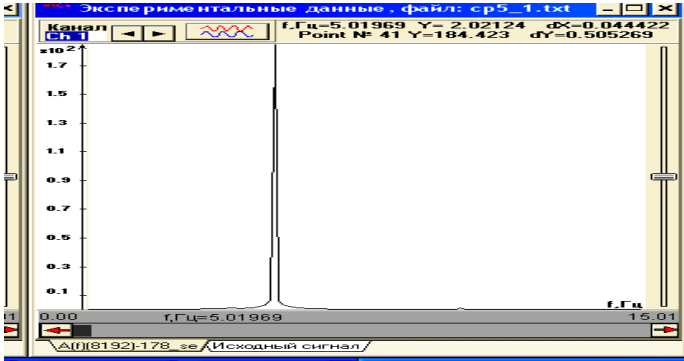


Рис.3. Спектр гармонической части задающего сигнала (5Гц)

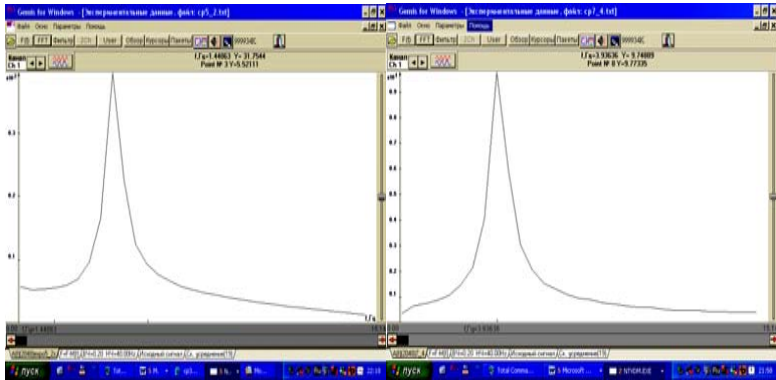


Рис.4. Спектры экспоненциальной части двух сигналов из имеющихся 15 с максимумами на частоте 4Гц, являющейся, как отмечено выше, частотой собственных затухающих колебаний платформы (огibaющая – экспонента - см.рис.2).

В этом случае спектральные максимумы в основании (независимо от частоты предшествующей гармонике), имеют ширину на порядок большую.

В табл. 2 приведены временные моменты максимумов затухающих колебаний и значения этих максимумов сигнала, соответствующие рис.2. Шаг измерений по времени равен 0,25 с, что соответствует частоте 4 Гц.

Табл. 2

Значения фактора трения платформы стенда и квадратичные погрешности

| i | t_i | x_i | x_i/x_{i+1} | Λ | ε_i | $\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}$ | $(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2$ |
|-----------------------------|-------|-------|---------------|-----------|-----------------|-------------------------------------|---|
| 1 | 0,50 | 104,7 | | | | | |
| 2 | 0,75 | 78,2 | 1,34 | 0,292 | 1,168 | -0,252 | 0,0635 |
| 3 | 1,00 | 56,4 | 1,39 | 0,329 | 1,316 | -0,104 | 0,0108 |
| 4 | 1,25 | 37,1 | 1,52 | 0,419 | 1,676 | 0,256 | 0,0605 |
| 5 | 1,50 | 25,0 | 1,48 | 0,395 | 1,580 | 0,160 | 0,0256 |
| 6 | 1,75 | 17,8 | 1,40 | 0,340 | 1,360 | -0,060 | 0,0036 |
| $\bar{\varepsilon} = 1,420$ | | | | | | | 0,164 |

Согласно приведенным результатам средняя квадратичная погрешность определения фактора трения: $\sigma = \left[\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2 \cdot (n-1)^{-1} \right]^{1/2}$, $\sigma = \sqrt{\frac{0,164}{5}} = 0,18$. Таким образом, в приведенном примере среднее значение фактора трения $\bar{\varepsilon} = 1,42 \pm 0,18$ определяется с относительной погрешностью 13%. Аналогичные определения после отключения колебаний с частотами 3 и 7Гц приводят к значениям $\bar{\varepsilon} = 1,47 \pm 0,21$ и $\bar{\varepsilon} = 1,31 \pm 0,05$ (с относительными погрешностями, соответственно, 14% и 4%). Поскольку во всех трех случаях определяется фактор трения одной и той же колебательной системы – платформы калибровочного стенда, можно утверждать, что величина $\bar{\varepsilon}$ определена значением 1,4 с квадратичной погрешностью в среднем около 10%.

Как известно величина $\sqrt{n^2 - \varepsilon^2} = \bar{n}$ называется частотой затухающих колебаний. Здесь n есть частота собственных незатухающих колебаний точки. Для данной колебательной системы ее можно определить значением 4,24Гц. Эта частота соответствует расчетному значению, принятому при проектировании стенда в 1985-1986 гг. [16].

В качестве реальной колебательной системы использована железобетонная балка (виноградный кол) длиной 2,4 м, сечением 80×100 мм, массой около 16 кг, расположенная горизонтально на двух опорах (точки О, рис. 5). В точке С на балке подвешена с помощью пережигаемой нити 1 платформа 2, на которой устанавливается заменяемая нагрузка 3. Площадки 4 с сейсмоприемниками 5 подвешены на балке в точках Г. Расстояния СГ могут одновременно симметрично изменяться. Записи через АЦП Е-154 осуществляются на ноутбук от двух вертикальных сейсмоприемников СМЗ-КВ. Обработка записей выполняется по программе GeMiS в формате gwt (цифровом) и lng (графическом). Программа выполняет вычитание

постоянной составляющей, фильтрацию в переменных пределах, сглаживание цифровым фильтром, расчет спектров Фурье и ряд других операций.

Для возбуждения собственных колебаний балки путем резкого отключения деформирующего усилия использован сброс нагрузки массой 20, 60, 80 кг. Форма сигнала этих собственных колебаний (рис.6) значительно

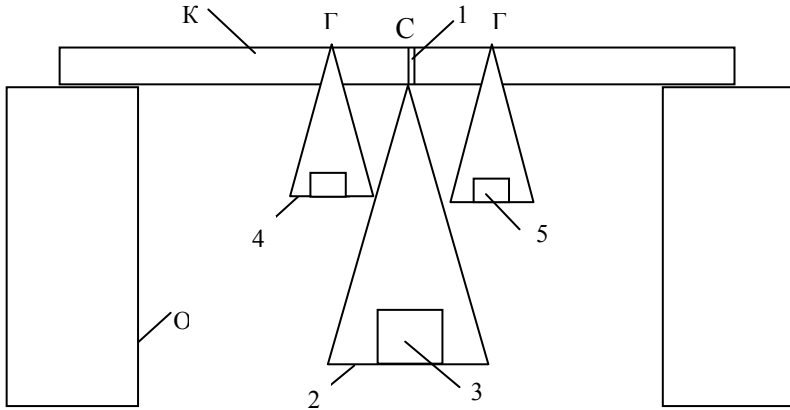


Рис.5. Схема испытаний железобетонной балки

осложнена не мгновенным процессом пережигания нити подвеса нагрузки, последующим падением груза на опору, сглаженным мягкой прослойкой. Анализ этих записей выполнен путем фильтрации сигнала скользящим частотным окном шириной 2Гц (рис.6). Выделяются интервалы, в которых скорость поглощения энергии колебаний и соответствующие факторы трения, существенно отличается от других (табл. 3).

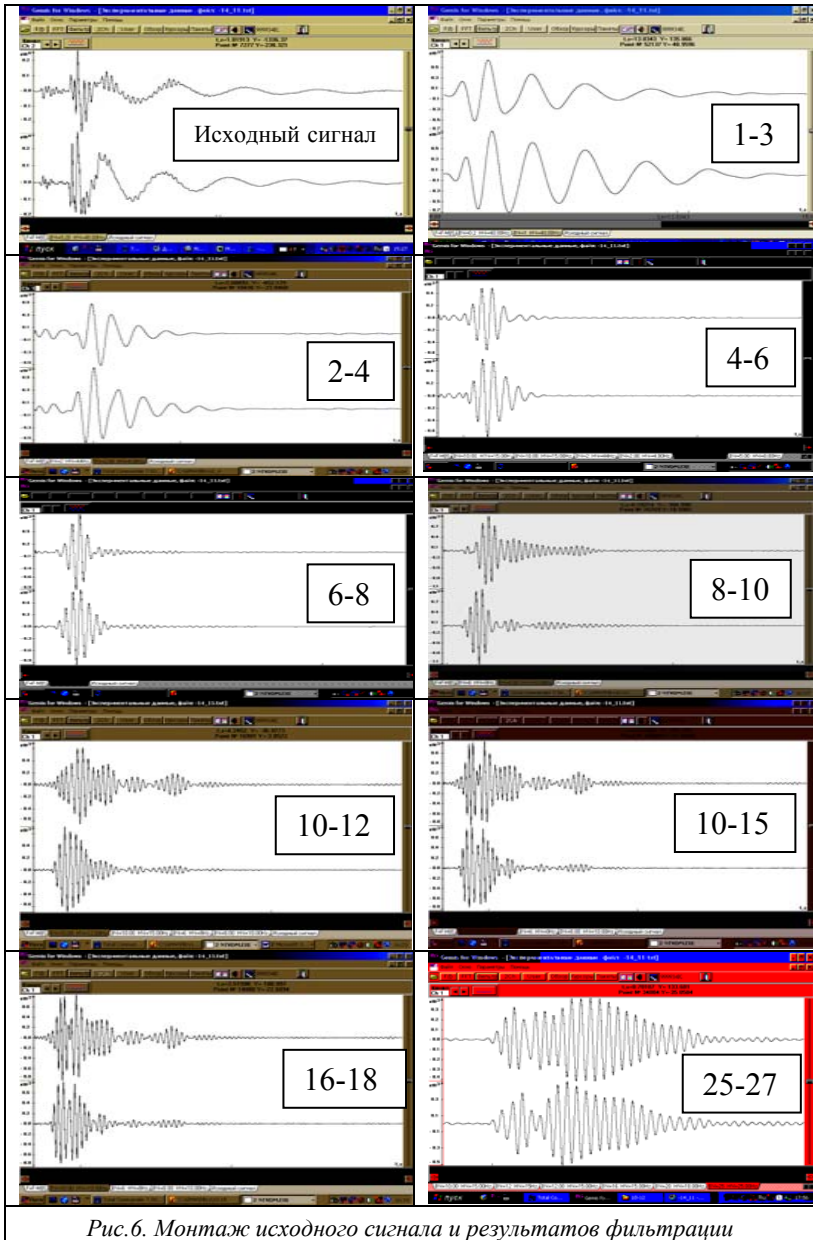
Табл.3

Зависимость фактора трения от частоты и снятой нагрузки

| \bar{n} | ε_{20} | ε_{60} | \bar{n} | ε_{20} | ε_{60} |
|-----------|--------------------|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|
| 1.5 | 0.61 | 0.92 | 9 | 6.37 | 5.21 |
| 3 | 1.11 | 1.21 | 11 | 9.40 | 6.60 |
| 5 | 3.09 | 3.21 | 13 | 9.20 | 9.05 |
| 7 | 3.29 | 5.38 | 17 | 6.69 | 5.11 |

ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о явной зависимости фактора трения от частоты колебательного процесса. Сам характер зависимости, по-видимому, связан с динамическим уровнем воздействия. Детальное построение «пространства \mathcal{E} » в объеме сооружения позволит выявить



наиболее уязвимые участки конструкции при сейсмическом воздействии и определить меры по снижению этой уязвимости. Механические системы типа маятника с **одной степенью свободы** – вращательным движением вокруг стационарной оси, проявляют устойчивое значение фактора трения, не зависящее от частоты и амплитуды колебаний. Диссипативные свойства стержня, связанные с распространением упругих колебаний в теле, проявляют несомненную нелинейность. Это означает, что спектр реакции зданий и сооружений требует тщательного изучения, особенно в пределах частот спектра реального сейсмического сигнала.

Первые результаты изучения рассогласования спектров отклика в объеме реального здания на искусственное механическое воздействие [9, 17] обнаружили такую нелинейность.

Вопрос о зависимости фактора трения от амплитуды возбуждающего сигнала при наибольших ее значениях требует дополнительных исследований. Нужен учет частотных свойств здания, в котором проводятся эксперименты. В частности, из рис. 6 следует, что характер колебаний на частотах 25-27Гц связан, возможно, с близостью этого диапазона к резонансной частоте колебаний здания (около 23 Гц).

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию / [Джурик В. И., Севастьянов В. В., ..., Бугаевский Г. Н. и др.]. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. – М.: Наука, 1988. – 224 с.
2. Бугаевский Г.Н. Исходные понятия теории сейсмостойкости и “сейсмической силы” / Бугаевский Г. Н. // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь: КАПКС, 2002. – Вып. 7. – С. 131–134.
3. Бугаевский Г.Н. Численный анализ реакции грунта на сейсмическое воздействие / Бугаевский Г. Н. // Будівельні конструкції. – Київ: НДІБК, 2006. – Вип. 64. – С. 254–261.
4. Бугаевский Г.Н. Проблема динамических исследований на основе сейсмометрических записей / Бугаевский Г. Н. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 год. – Симферополь. – 2002. – С. 102–104.
5. Бугаевский Г. Н Универсальный метод решения обратной задачи сейсмометрии / Бугаевский Г. Н., Литвинова Э. В. // Геофизический журнал. – Киев. – 2002. – № 1. – Т. 24. – С. 120–123.
6. Бугаевский Г.Н. Уравнения равновесия и движения среды и спектральный тензор деформации / Бугаевский Г. Н. // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь: КАПКС, 2003. – Вып. 8. – С. 61–66.
7. Бугаевский Г.Н. Сейсмическое спектрально-динамическое зонирование территорий и сооружений / Бугаевский Г.Н., Бугаевский А.Г. // Будівельні конструкції. – Київ: НДІБК, 2000. – Вип. 53, кн. 1. – С. 69-77.

8. Бугаевский Г.Н. Экспериментальное изучение реакции сооружения на механическое воздействие / Бугаевский Г. Н. // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь: НАПКС, 2005. – Вып. 9. – С. 44–51.
9. Бугаевский Г.Н. Спектрально–динамические и диссипативные свойства элементов сооружения / Бугаевский Г. Н. // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь: НАПКС, 2005. – Вып. 11. – С. 85–88.
10. Егупов В.К. Практические методы расчета зданий на сейсмостойкость / Егупов В.К., Егупов К.В., Лукаш Э.П. – К.: Будівельник. 1982. – 144 с.
11. Бугаевский Г.Н. Кинематические и динамические закономерности распространения волн в реальном сооружении / Бугаевский Г. Н. // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь: КАПКС, 2002. – Вып. 7. – С. 118-120.
12. Бугаевский Г.Н. Характеристики колебательных систем / Бугаевский Г. Н., Цмыкал Д.А., Спрожецкий В.В. // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь: КАПКС, 2006. – Вып. 15-16. – С. 48-51.
13. Немчинов Ю.И. Динамическая паспортизация сооружений как составная часть СНиПа / Немчинов Ю. И., Кендзера А. В., Бугаевский Г. Н. // Будівельні конструкції. – Київ: НДІБК, 2004. – Вып. 60. – С. 193–198.
14. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР – М.: Наука, 1974. – 244 с.
3. 15. Бугаевский Г.Н., Белов В.П. Однокомпонентный стенд для испытаний сейсмометрической аппаратуры. В сб.: Инженерносейсмометрическая служба страны (сбор, обработка и использование информации. Тез. докл. школы-семинара (Махачкала, 14-18 октября 1987г.) Махачкала, Изд. МСССС при През. АН СССР, 1987, с.33-34
15. Бугаевский Г.Н. Стенд для испытаний и калибровки сейсмометрической аппаратуры. / Бугаевский Г.Н., Белов В.П., Нестеренко С.Д., Герашенко А.А. // Строительство и техногенная безопасность – Симферополь, КАПКС, 2001. – Вып. 5. – С. 92-97.
16. Бугаевский Г.Н. Динамическая паспортизация зданий и сооружений – основа повышения качества строительных объектов./ Бугаевский Г.Н., Волосович О.В., Бугаевский А.Г.// Строительство и техногенная безопасность – Симферополь: НАПКС, 2008. – Вып. 24 -25. – С. 10-13.