

ВИБРОДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА ЭВОЛЮЦИИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЦИКЛИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ НА БАЗЕ ВИБРОДОЗИМЕТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ СВД-60У

УДК 624.131.1; 624.042.7; 624.01:550.34

Михаил Сергеевич Хлыстунов

*Директор Центра управления научной и инновационной деятельностью
Московского государственного строительного университета
кандидат технических наук, почетный доктор наук, профессор*

Жанна Геннадьевна Мозилюк

*Заведующая сектором ОНИЛ КГК, старший преподаватель кафедры прикладной
механики и математики Московского государственного строительного университета*

Статистический анализ данных микросейсмических наблюдений показывает, что только за десятилетний период эксплуатации зданий, например в Московском регионе, грунты оснований за 10 лет претерпевают более 10 млрд. циклов микронагрузений, превышая, к сравнению, в 10^6 раз порог требований в машиностроении по обязательной аттестации циклической усталости конструкционных материалов, включая металлы.

До настоящего времени в техносфере пока применяется единственный общепризнанный метод оценки деградации остаточного ресурса, в том числе в результате циклической усталости, по параметрам аккумуляции энергии плавного (скрытого) процесса разрушения или износа.

Фактически, этот метод является техническим аналогом классического метода контроля уровня радиационного поражения объекта биосферы по дозе биологически эффективной радиации, полученной этим объектом.

В качестве иллюстрации на рис.1 показаны принципиальные отличия нормированных спектров или амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) возбуждения и поглощения.

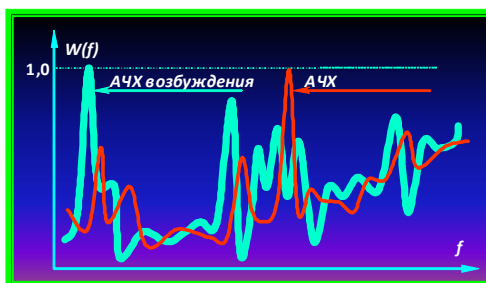


Рис.1. Спектры поглощения и возбуждения в реальных системах «объект-основание»

Геоэкологическая эффективность и риски влияния микросейсмических нагрузок на циклическую усталость грунтов неоднородных оснований до настоящего времени трудно поддавались корректной расчетной оценке, в том числе для многослойных оснований с наклонными и выклинивающимися границами пластов.

В последние годы целым рядом институтов МПР РФ и РАН, например, Институтом "СИНЭКО" совместно с ОИФЗ РАН, разрабатываются и применяются методы изучения микросейсмических полей, образуемых техногенными источниками, при этом, по существу, разрабатывается новый инструмент изучения верхней части литосферы. Это создаст возможность изучения и мониторинга динамики изменения свойств грунтов в пределах застроенных территорий и промышленных объектов, используя источник возбуждения монохроматических сейсмических сигналов. Технология таких исследований применялась при изучении оползневых объектов, площадок АС и других ответственных сооружений.

Для изучения "тонкой" структуры верхней части геологического разреза, в том числе оснований строительных объектов, применяется разрабатываемый совместно с ГеоРАП-консалтинг (г. Санкт-Петербург, В.П.Лазебник) метод резонансно-акустического профилирования (РАП).

В Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова также ведутся исследования в этой области, к которым можно отнести работы Вознесенского Е.А. [1] и авторского коллектива монографии по резонансным явлениям в упругом полупространстве оснований [2].

В МГСУ развиваются аналогичные направления исследований, связанные с инструментальной верификацией резонансных явлений в строительных конструкциях и в системах «объект-основание». К их числу следует отнести работы профессора Г.Э. Шаблинского [3] по мониторингу резонансов строительных конструкций и профессора С.И. Завалишина [4-6] по полигонным инструментальным исследованиям резонансных явлений на крупномасштабных моделях экологически опасных объектов, включая АС и другие ответственные сооружения промышленного, гражданского и специального назначения.

Среди классических методов неразрушающего контроля остаточного ресурса эксплуатации крупногабаритных строительных конструкций особое место занимает резонансный метод [7], являющийся базовым прототипом принципиально нового метода, предложенного в работах [8] и [9].

Сущность нового метода, в отличие от базового, заключается в регулярном контроле (начиная с момента геодезической подготовки строительной площадки и, далее, в период сооружения фундамента и монтажа строительной конструкции, вплоть до момента вывода объекта из проектного срока эксплуатации) параметров и эволюции не резонансных спектров вибросейсмического возбуждения диагностируемого объекта, а параметров насыщения аварийно эффективных спектров вибропоглоще-

ния как строительной конструкции и ее элементов, так и системы «объект-основание», в целом. Затем по характеру эволюции параметров спектров поглощения определяют степень и скорость уменьшения запаса устойчивости объекта и разупрочнения строительных материалов. Наиболее адекватное сущности метода и краткое название предлагаемого метода: «Вибродозиметрический метод контроля остаточного ресурса надежности».

В настоящее время при испытаниях эталонных грунтов оснований аттестуются только квазистатические параметры циклической усталости грунтов оснований, когда величины импульса и момента импульса, излучаемых и, соответственно, поглощаемых в грунтах, практически равны нулю.

Используемые методики не позволяют учитывать естественные физико-механические, геохимические и гидрогеологические связи между собой пластов тонкой структуры как в расчетном объеме основания, так и с окружающей его геологической средой, в том числе пластические деформации с постоянной релаксацией менее 1 с и целый ряд положительных обратных геоэкологических связей, сопровождающих и ускоряющих микроциклическую усталость (уплотнение или «разрушение») грунтов оснований.

В общем случае при верификации параметров вибросейсмической усталости грунтов оснований именно эти параметры необходимо учитывать для оценки динамических процессов. Например, в настоящее время, официально учитываемые параметры процессов долговременной (квазистатической) ползучести могут быть представлены суммой остаточных деформаций:

$$\varepsilon^{cm} = \varepsilon^{\sigma} + \varepsilon^{\gamma} + \varepsilon^{\sigma\gamma},$$

где ε^{σ} , ε^{γ} , $\varepsilon^{\sigma\gamma}$ – остаточные деформации в результате действия, соответственно, квазистатических продольных и касательных напряжений, а также их совместного действия, которые существенно отличаются от возможных проявлений вибросейсмических процессов и их вклада в полную сумму статических и динамических остаточных деформаций:

$$\varepsilon_{\Sigma ocm} = \varepsilon^{\sigma} + \varepsilon^{\gamma} + \varepsilon^{\sigma\gamma} + \varepsilon^p + \varepsilon^s + \varepsilon^R + \varepsilon^{St} + \varepsilon^{cm-p} + \varepsilon^{cm-s} + \varepsilon^{p-s} + \varepsilon^{cm-p-s} + \dots$$

где $\varepsilon^p, \varepsilon^s, \varepsilon^R, \varepsilon^{St}, \varepsilon^{cm-p}, \varepsilon^{cm-s}, \varepsilon^{p-s}, \varepsilon^{cm-p-s}$ – остаточные деформации в результате многоциклового воздействия, соответственно продольных (индекс ^p), поперечных (^s) и поверхностных (Рэлея^Rи СтоунлиSt) микросейсмических волн, а также совместного действия их возможных сочетаний.

При возникновении в твердой упругой среде статического напряженно-деформированного состояния (НДС) в ней распределяется только

удельная потенциальная энергия упругих деформаций, которая определяется формулой Клайперона:

$$w = 0,5(\sigma_{11}\varepsilon_{11} + \sigma_{22}\varepsilon_{22} + \sigma_{33}\varepsilon_{33} + \sigma_{12}\gamma_{12} + \sigma_{23}\gamma_{23} + \sigma_{31}\gamma_{31}), \quad (1)$$

которую можно представить в более общей тензорной форме

$$w_{ynp} = 0,5 \sum_{i=j=1}^3 \tilde{\sigma}_{ij} \tilde{\varepsilon}_{ij} + 0,25 \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 \tilde{\tau}_{ij} \tilde{\gamma}_{ij}. \quad (2)$$

При вибросейсмическом возбуждении среды применение формулы Клайперона, в общем случае, будет не корректным, так как удельная энергия упругих волновых деформаций среды будет равна сумме двух компонент, упругой и инерциальной:

$$w_{дин} = w_{ynp} + w_{ин}.$$

Причем, в том числе и упругая составляющая w_{ynp} , сохраняя форму представления, будет принципиально отличаться по физической сущности от тензорных компонент формулы (1), которые должны быть заменены динамическими:

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \hat{\sigma}_{ij} [a_{ij}^{\sigma} \text{Cos}(\omega t) + b_{ij}^{\sigma} \omega \text{Sin}(\omega t)]$$

и

$$\tilde{\varepsilon}_{ij} = \hat{\varepsilon}_{ij} [a_{ij}^{\varepsilon} \text{Cos}(\omega t) + b_{ij}^{\varepsilon} \omega \text{Sin}(\omega t)].$$

Инерциальная составляющая удельной энергии вибросейсмического возбуждения изотропной упругой твердой среды также может быть представлена в тензорной форме:

$$w_{ин} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^3 \dot{u}_i^2 + \frac{1}{24} \rho r_o^2 \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 \dot{\gamma}_{ij}^2,$$

где r_o – единица измерения.

В результате проведенных преобразований для полной удельной энергии вибросейсмического возбуждения среды получим

$$w = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \tilde{\sigma}_{ii} \tilde{\varepsilon}_{ii} + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^3 \tilde{\tau}_{ij} \tilde{\gamma}_{ij} + \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^3 \dot{u}_i^2 + \frac{1}{24} \rho r_o^2 \sum_{i=1}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^3 \dot{\gamma}_{ij}^2. \quad (3)$$

В каждом элементарном объеме среды в результате пластических деформаций, обусловленных механическим гистерезисом, являющимся причиной затухания сейсмической волны, циклическое поглощение энергии уплотнения подчиняется закону:

$$w_{уп} = wbe^{-\bar{\beta}\omega t},$$

где $b, \bar{\beta}$ – соответственно, начальный коэффициент затухания и коэффициент ослабления затухания (гистерезиса) по мере приближения к предельному уплотнению грунта, отражающий процессы, подробно описанные в ряде работ и отчетов д-ра техн. наук, профессора З.Г. Тер-Мартirosяна и канд. техн. наук, доцента Л.И. Черкасовой.

При малых амплитудах вибросейсмического возбуждения процесс динамических деформаций среды можно считать фактически изотермическим и с большой точностью линейным, а коэффициенты затухания b и поглощения $\beta \ll b$ настолько малыми, что только после 10^6 циклов колебательных волновых деформаций остаточные деформации достигают требующих учета значений. По этим же причинам можно сделать вывод, что при изотермическом процессе поглощаемая энергия затрачивается только на остаточное изменение объема среды, например, на ее уплотнение, и формоизменение.

Тогда можно найти эквивалентные упругие статические деформации среды, удельная потенциальная энергии которых может быть равна энергии поглощения, то есть

$$w_{уп} = be^{-\bar{\beta}\omega t} \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \tilde{\sigma}_{ii} \tilde{\varepsilon}_{ii} + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 \tilde{\tau}_{ij} \tilde{\gamma}_{ij} + \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^3 \dot{u}_i^2 + \frac{1}{24} \rho r_o^2 \sum_{i=1}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 \dot{\gamma}_{ij}^2 \right) \quad (4)$$

Используя формулу (4), можно составить уравнение условной эквивалентности для составляющих поглощения за $N=f^*t$ циклов волновых колебаний на частоте f , которые связаны непосредственно с уплотнением элементарного объема и с изменением его формы:

$$\sum_{i=1}^3 \sigma_{ii} \varepsilon_{ii}^2 = bNe^{-\beta_s \omega t} \left(\sum_{i=1}^3 \tilde{\sigma}_{ii} \tilde{\varepsilon}_{ii} + \rho \sum_{i=1}^3 \dot{u}_i^2 \right) \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 \tau_{ij} \gamma_{ij}^2 = bNe^{-\beta_s \omega t} \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 \tilde{\tau}_{ij} \tilde{\gamma}_{ij} + \frac{1}{6} \rho r_o^2 \sum_{i=1}^3 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 \dot{\gamma}_{ij}^2 \right). \quad (6)$$

Используя аналогичный прием, а также принимая условие $\beta \ll b$ можно также составить уравнения эквивалентности для каждой из тензорных компонент деформаций:

$$\sigma_{ii}^2 \varepsilon_{ii}^2 = c_{ii} (\varepsilon_{ii}^2)^2 = s_{ii} (\sigma_{ii}^2)^2 \cong b_{ii} tf (\tilde{\sigma}_{ii} \tilde{\varepsilon}_{ii} + \rho i_i^2) \quad (7)$$

$$\tau_{ij}^2 \gamma_{ij}^2 \Big|_{i \neq j} = c_{ij} (\gamma_{ij}^2)^2 \Big|_{i \neq j} = s_{ij} (\tau_{ij}^2)^2 \Big|_{i \neq j} \cong b_{ij} tf \left(\tilde{\tau}_{ij} \tilde{\gamma}_{ij} + \frac{1}{6} \rho r_o^2 \tilde{\gamma}_{ij}^2 \right) \Big|_{i \neq j} . \quad (8)$$

Откуда, заменив выражения в скобках в уравнениях (7) и (8) значением удельной энергии соответствующей сейсмической моды, получим:

$$\varepsilon_{ii}^2 \cong \sqrt{2s_{ii} b_{ii} tf w_{ii}} ; \quad (9)$$

$$\gamma_{ij}^2 \Big|_{i \neq j} \cong \sqrt{2s_{ij} b_{ij} tf w_{ij}} \Big|_{i \neq j} . \quad (10)$$

Уравнения (7)-(10) могут быть использованы для получения значений ожидаемых механических напряжений, эквивалентных многоцикловому накоплению грунтами суммарной энергии остаточных деформаций,

$$\sigma_{ii}^2 = b_{ii} tf \frac{1}{\varepsilon_{ii}^2} w_{ii} = \sqrt{\frac{b_{ii} w_{ii} tf}{2s_{ii}}} \quad (11)$$

$$\tau_{ij}^2 \Big|_{i \neq j} = b_{ij} tf \frac{1}{\gamma_{ij}^2} w_{ij} \Big|_{i \neq j} = \sqrt{\frac{b_{ij} w_{ij} tf}{2s_{ij}}} \Big|_{i \neq j} , \quad (12)$$

которые, в свою очередь, могут быть использованы для вычисления остаточного ресурса времени, по истечении которого эквивалентные суммарным остаточным деформациям напряжения в среде превысят заданный порог, например, предельные проектные напряжения в среде основания или фундамента. В теории рисков к потенциальной возможности реализации таких сверхпроектных или неучтенных напряжений применяют термин постулируемое исходное событие (ПИС).

Аналогичным образом можно получить, например, эквивалентные циклической усталости многоцикловые остаточные деформации для вычисления остаточного ресурса времени, по истечении которого эти деформации превысят допустимые, согласно проекту или СНИПу:

$$\varepsilon_{ii}^2 = \sqrt{\frac{b_{ii} w_{ii} tf}{2c_{ii}}} , \quad (13)$$

$$\gamma_{ij}^2 \Big|_{i \neq j} = \sqrt{\frac{b_{ij} w_{ij} t f}{2c_{ij}}} \Big|_{i \neq j} . \quad (14)$$

Окончательно формулы для вычисления ресурса времени достижения заданного предела или ограничения по каждой из компонент тензоров напряжений или деформаций для продольного и поперечного сейсмического возбуждения среды примут следующий вид:

$$t_{ii}^p = \frac{2c_{ii} (\varepsilon_{ii}^2)^2}{b_{ii} w_{ii} f} \quad (15)$$

$$t_{ij}^s = \frac{2c_{ij} (\varepsilon_{ij}^2)^2}{b_{ij} w_{ij} f} \Big|_{i \neq j} \quad (16)$$

В случае мониторинга и нестационарной амплитуды вибровозмущения на постоянной доминирующей частоте вибросейсмического возбуждения процент амортизации η определяется следующими формулами по каждой из компонент тензора, в том числе: для продольных

$$\eta_{ii}^p = \frac{\varepsilon_{ii}^2}{\varepsilon_{ii}^{\text{lim}}} = \frac{1}{2\varepsilon_{ii}^{\text{lim}}} \int_0^t \left[\sqrt{\frac{2c_{ii} t}{b_{ii} w_{ii} f}} w'_{ii} + \sqrt{\frac{b_{ii} w_{ii} f}{2c_{ii} t}} \right] dt$$

и касательных:

$$\eta_{ij}^s \Big|_{i \neq j} = \frac{\gamma_{ij}^2}{\gamma_{ij}^{\text{lim}}} \Big|_{i \neq j} = \left\{ \frac{1}{2\varepsilon_{ij}^{\text{lim}}} \int_0^t \left[\sqrt{\frac{2c_{ij} t}{b_{ij} w_{ij} f}} w'_{ii} + \sqrt{\frac{b_{ij} w_{ij} f}{2c_{ij} t}} \right] dt \right\} \Big|_{i \neq j} .$$

В случае многомодового вибросейсмического возбуждения системы «объект-основание» амортизация объекта требует более сложных вычислений, так как существует взаимная зависимость влияния каждой из мод на общую надежность системы в целом, включая изменение скорости распространения волны, плотность и динамические упругие постоянные среды.

Вместе с тем вибродозиметрический метод может быть применен и в этом случае с использованием оценок условной вероятности реализации постулируемых событий по всем компонентам тензора вибросейсмического возбуждения. Алгоритмы вычисления таких оценок были разработаны в 1997 году по заказу Росавиакосмоса для контроля остаточного ресурса крупногабаритных космических конструкций орбитального комплекса «Мир» и Международной космической станции. Они созданы с

применением перспективных инжиниринговых информационных технологий и являются объектами «ноу-хау», принадлежащими Международному научно-техническому центру полезных нагрузок космических объектов.

Несмотря на интегральный характер оценок метода, отражающих только суммарный потенциал реализации малоизученного или неизвестного сочетания причинно-следственных связей развития аварийных процессов, энергетический подход впервые позволил получить физически обоснованную оценку рисков независимо от природы и степени изученности каждой из этих связей. Поэтому вибродозиметрический метод обладает определенной универсальностью и впервые открывает перспективы реализации метрологически обоснованного неразрушающего контроля, компьютерного моделирования и количественного расчета степени износа строительных конструкций и материалов, неоднородных и много-связных систем типа «объект-основание», а также связанных с ними рисков реализации нештатных ситуаций и аварий.

Для практической реализации метода МГСУ в кооперации с конверсионными предприятиями была разработана вибродозиметрическая станция СВД-60МВ, которая позволяет автоматически вести мониторинг циклической усталости материалов строительных конструкций, а в комплекте с грависейсмометрической станцией СГМ-03В и циклическую «усталость» грунтов оснований, обеспечивая, тем самым, контроль деградации запаса надежности и устойчивости системы «объект-основание» в целом.

Вибродозиметрическая станция укомплектована унифицированными вибродозиметрическими модулями (рис.2), позволяющими путем агрегатизации наращивать необходимое число каналов станции, например, с использованием серийной локальной компьютерной сети.

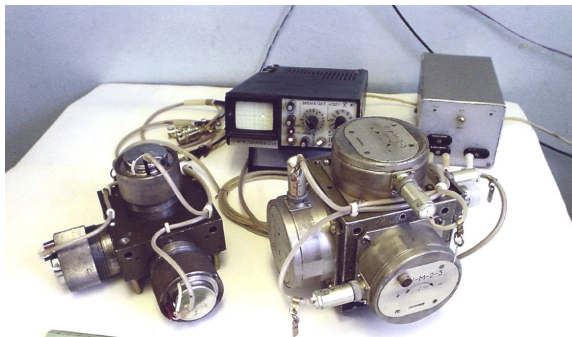


Рис.2. Унифицированные виброметрические модули вибродозиметрической станции СВД-60МВ

Унифицированный модуль содержит, измерительную платформу, в водонепроницаемом антивандальном корпусе с устройством жесткого крепления к строительной конструкции, один вибродатчик для измерения вертикальных виброускорений, два вибродатчика для измерения горизонтальных и три для измерения торсионных виброускорений в горизонтальной и вертикальной плоскостях стрижательной конструкции, а также компьютер для управления работой и настройкой измерительной платформы и подключения к локальной компьютерной сети, для сбора (накопления и съема), предварительной и прикладной обработки виброметрической информации;

Унифицированный модуль имеет следующие эксплуатационные характеристики:

- | | |
|--|-----------------------|
| – рабочий диапазон температур, °С | от -50 до +50; |
| – рабочий диапазон влажности, % | до 90; |
| – удароустойчивость, в том числе: | |
| амплитуда однократных ударов, о.е. | до 24; |
| амплитуда вибрации на 50 Гц, о.е. | до 0,1; |
| диапазон измерения, о.е. | от 10^3 до 10^4 ; |
| – нижняя граница полосы частот, Гц | не более 1; |
| – верхняя граница полосы частот, Гц | 80; |
| – погрешность измерения по частоте, Гц | 0,1; |
| – погрешность измерения амплитуды, % | 1,0. |
| – ресурс эксплуатации с возможностью замены отдельных блоков и деталей с ограниченным ресурсом эксплуатации, лет | не менее 40; |
| – время безотказной работы, час | не менее 10000. |

Библиографический список

1. Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов. – М.: Соросовский Образовательный Журнал, №2, 1998. С.101-108.
2. Ворovich И.И., Бабешко В.А., Пряхина О.Д. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах. –М.: Научный Мир, 1999.
3. Шаблинский Г.Э. и др. Исследования динамических явлений в инженерных сооружениях и конструкциях. В сб. «Экспериментальная механика» –М.: МГСУ, 2001.
4. Завалишин С.И., Хлыстунов М.С. Аттестация резонансной устойчивости. Материалы коллоквиума. –М.: МГСУ, 1999.
5. Завалишин С.И., Хлыстунов М.С. Полигон для инструментальной аттестации строительных проектов. Журнал «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений», №3, 2001.

6. Завалишин С.И., Хлыстунов М.С. Метод инструментальной аттестации геодинамической надежности строительных конструкций АС. Сб. трудов научной сессии МИФИ.-М.: МИФИ, 2001.
7. Неразрушающий контроль / Под. ред. А.И. Клюева. - М.: Приборостроение, 1986.
8. Хлыстунов М.С. Теория геодинамической безопасности АС. В сб. трудов I Научно-технической конференции «Научно-инновационное сотрудничество» Минатома и Минобразования РФ. В 2 ч. Ч.1. -М.: МИФИ, 2002.
9. Хлыстунов М.С. Теория моделирования геоэкологических проявлений микросейсмических процессов в основаниях АС. В сб. трудов III Научно-технической конференции «Научно-инновационное сотрудничество» Минатома и Минобразования РФ. В 3 ч. Ч.1. –М.: МИФИ, 2004.