

Государственное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
Московский государственный строительный университет
Ассоциация московских вузов

Утверждаю
Проректор по УМР и МД

_____ Гагин В.И.
«__» _____ 2009 г.

ОТЧЕТ

о выполнении подраздела мероприятий по социальному
обслуживанию населения в части предоставления
образовательных услуг жителям города Москвы

Подраздел №11.5.3.4. *«Современные методы анализа и оценки
геофизической устойчивости строительных систем типа
"объект-основание»*

(Научно-образовательный материал)

Научный руководитель подраздела	Зав. каф. ПММ МГСУ	Савостьянов В.Н.		
Отв.исполнитель	Нач. сектора ОНИЛ КГК МГСУ	Могилюк Ж.Г.		
	Должность	Телефон	Подпись Дата	ФИО

Москва, 2009 г.

АННОТАЦИЯ

Подраздел №11.5.3.4. «Современные методы анализа и оценки геофизической устойчивости строительных систем типа "объект-основание»

Объектом исследования причинно-следственных связей и закономерностей влияния грависейсмических процессов на долговременную надежность и устойчивость систем типа "объект-основание" являлись схемы реализации причинно-следственных связей и закономерностей формирования грависейсмических нагрузок в неоднородной структуре оснований

Основной целью работы было исследование схем реализации аварийно опасных грависейсмических процессов на долговременную надежность и устойчивость систем типа "объект-основание" необходимых для разработки метода и алгоритмов проектного исследования, оценки и прогноза эволюции интенсивности геодеформационных проявлений долговременных гравидинамических и других циклических нагрузок в основаниях зданий и сооружений.

Исследования проводились методом теоретического моделирование схем реализации малоизученных механизмов и закономерностей влияния на эволюцию надежности и устойчивости систем типа "объект-основание" гравидинамических и вибросейсмических возмущений различного происхождения, проявляющихся как в глобальном, планетарном масштабе, так и на локальном уровне в пределах расчетного объема оснований отдельных строительных объектов. Даны теоретические оценки негативного развития долговременных геотехнических проявлений в результате действия циклических и резонансных гравидинамических и микросейсмических процессов, являющихся основным звеньями в процессе реализации схемы динамического механизма зарождения и развития неоднородных и неравномерных геодеформационных процессов в основаниях объектов.

Под научным руководством и при непосредственном участии зав. кафедрой ПММ, профессора Савостьянова В.Н. (отв.исп. ст.преподаватель Могилюк Ж.Г.) в рамках подраздела 11.5.3.4. были разработаны, коллегиально рассмотрены и протестированы, а также вручены для практического использования заинтересованным специалистам строительного комплекса Москвы научно-информационные и научно-образовательные материалы в области современных методов анализа и оценки геофизической устойчивости строительных систем типа "объект-основание" на примере вибродозиметрического метода проектной оценки циклической усталости грунтов оснований. Авторами теорий, методов и алгоритмов, использованных в разработке НИМ и НОМ по настоящему подразделу, являются ведущие ученые МГСУ в данной области строительных наук.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Схемы алгоритмов прикладной динамической теории упругости и математического моделирования динамических нагрузок в системах типа «объект-основание»	7
2. Алгоритмы вибродозиметрического метода мониторинга и прогноза эволюции остаточного ресурса циклической усталости материалов строительных конструкций и грунтов оснований	14
3. Алгоритмы мониторинга и прогноза эволюции геодеформационных рисков неравномерных осадок зданий и сооружений методами динамической теории упругости	24
4. Состояние нормативного обеспечения устойчивости систем типа «объект-основание» ответственных строительных объектов Москвы в условиях экстремальных динамических нагрузок	37
5. Модальный анализ микросейсмических процессов и моделирование геодеформационных рисков в основаниях ответственных объектов	
Список использованных источников	56

ВВЕДЕНИЕ

В результате выполнения работ был установлен достаточный набор звеньев схемы реализации причинно-следственных связей и закономерностей распределения грависейсмических нагрузок в неоднородных основаниях и причинно-следственных связей их влияния на долговременную надежность и устойчивость систем типа "объект-основание", в том числе с необходимым теоретическим обоснованием и на естественном языке представлены схемы:

- алгоритмов прикладной динамической теории упругости и математическое моделирование динамических нагрузок в системах типа «объект-основание»;
- алгоритмов вибродозиметрического метода мониторинга и прогноза эволюции остаточного ресурса циклической усталости материалов строительных конструкций и грунтов оснований;
- алгоритмов мониторинга и прогноза эволюции геодеформационных рисков неравномерных осадок зданий и сооружений методами динамической теории упругости;
- применения методов и программно-аппаратных комплексов резонансного геодинамического профилирования строительных площадок в зонах плотной исторической застройки;
- грависейсмометрического мониторинга устойчивости систем «объект-основание» высотных зданий;
- реализации глобальных факторов эволюции устойчивости систем типа «объект-основание»;

- нормативного обеспечения устойчивости систем типа «объект-основание» ответственных строительных объектов Москвы в условиях экстремальных динамических нагрузок;
- решения тестовых задач устойчивости систем «объект-основание» для верификации результатов применения динамической теории упругости в статическом приближении.

Основные характеристики полученных результатов, подтверждающие их уникальность, представлены теоретическими алгоритмическими схемами, раскрывающими механизм сопутствующей реализации комплекса ранее мало изученных явлений и эффектов возбуждения гравидинамических резонансов объектов и геосфер Земли и их вибродозиметрического проявления в результате возбуждения гравидинамических резонансов и соответствующей эволюции интенсивности сейсмических и/или многоцикловых геодеформационных процессов деградации устойчивости систем типа «объект-основание».

Результаты теоретических исследований и разработок в рамках настоящего проекта могут быть рекомендованы в качестве важной базовой составляющей при выполнении результативных прикладных исследований и разработок принципиально новых методов проектирования. Обследования и мониторинга ответственных строительных объектов в сложных геолого-геофизических условиях, а также научно-методических материалов для повышения квалификации проектировщиков уникальных зданий и сооружений, включая атомные станции, наземные и подводные газо-, нефтепроводы, высотные комплексы, шельфовые добывающие платформы и т.п. объекты. Наряду с этим по результатам проекта будут сформулированы темы и программы подготовки аспирантов соответствующего профиля в области прикладной механики.

Экономическая эффективность и практическая значимость результатов первого этапа НИР позволит проводить достоверную идентификацию более 25%

предаварийных ситуаций связанных с малоизученными механизмами и закономерностями развития неравномерных геодеформационных процессов в основаниях зданий и сооружений. Наряду с этим эти результаты являются необходимым этапом для создания проектных методов предотвращения строительных аварий и ускоренного износа строительных конструкций, общий ущерб от реализации которых в целом только по ЖКХ России превышает по разным оценкам 100-250 млрд.руб. в год.

1. Схемы алгоритмов прикладной динамической теории упругости и математического моделирования динамических нагрузок в системах типа «объект-основание»

Согласно классическим работам по теории сейсмических волн [1] и в геометрической акустике, по аналогии с принципом Френеля-Гюйгенса в оптике, каждая точка бесконечной, сплошной изотропной твердой упругой среды, динамические смещения которой возбуждаются сейсмической волной, участвуя в волновом процессе, сама становится вторичным источником этой волны, сохраняя при этом тип возбуждающей ее первичной волны, например, продольной или поперечной, плоской, цилиндрической или сферической. Исключение составляют случаи прохождения волн сквозь неоднородные, анизотропные, нелинейные или слоистые среды, когда, например, при преломления или отражения продольных волн в результате модальной трансформации на границах слоев возбуждаются также и поверхностные, преломленные и отраженные поперечные волны. Данные о некоторых скоростях таких волн в грунтах геологических оснований строительных объектов, согласно действующим СНИПам [2], подлежат аттестации [3].

Для бесконечного изотропного твердого тела волновой процесс описывается волновым дифференциальным уравнением второго порядка. Этим уравнением устанавливается связь изменения колебательных смещений во времени и пространстве.

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u}, \quad (1)$$

где \mathbf{u} , ρ , λ и μ – соответственно, матрица-вектор смещения частиц, плотность и упругие постоянные Ламе среды.

Согласно выводам векторного анализа, например, в работе [4] любое векторное поле можно представить в виде двух частей, одна из которых имеет скалярный потенциал волнового процесса φ для продольных волн, другая – векторный ψ для поперечных волн.

Тогда волновое уравнение (1) можно записать в виде

$$\mathbf{u} = \text{grad } \varphi + \text{rot } \psi, \quad (2)$$

где $\mathbf{u} = \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_s$ является векторной суммой смещений для продольных и поперечных волн,

а $\text{rot } \mathbf{u}_p = 0$, $\text{div } \mathbf{u}_s = 0$.

Используя такое представление, из уравнения (1) получим отдельные уравнения для продольной и поперечной волн:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}_p}{\partial t^2} = c_p^2 \Delta \mathbf{u}_p; \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}_s}{\partial t^2} = c_s^2 \Delta \mathbf{u}_s, \quad (4)$$

где скорости продольных и поперечных волн определяются по формулам:

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (5)$$

Однако следует согласиться с авторами критического анализа заформализованного подхода к решению уравнений математической физики, который, зачастую, не обеспечивает требуемой адекватности полученных решений реальным техническим процессам или из-за малоизученных, или из-за неизвестных науке тонкостей «нелинейного» преобразования и трансформации процессов на границе среды. Особенно очевидным это становится при сопоставлении или «настройке» таких виртуальных решений на реальных и метрологически достоверных показаниях приборов. Например, математически

изящное векторное и комплексное представление решений волновых уравнений сейсмоакустики на частоте $\omega=2\pi f$:

$$A(r, t) = A_o e^{j(\omega t - 2\pi r / \lambda)} = A_o \cos(\omega t - 2\pi r / \lambda) + jA_o \sin(\omega t - 2\pi r / \lambda), \quad (6)$$

особенно в трехмерном случае, на низких частотах и при больших длинах волн явно не может быть подтверждено в конкретной точке наблюдения путем прямого измерения техническими средствами. При инструментальной верификации моночастотного вибросейсмического возбуждения среды будет регистрироваться гармонический сигнал:

$$A(r, t) = A_o(r) \cos[\omega t - \varphi(r, t)], \quad (7)$$

где $\varphi(r, t)$ - отставание возбуждения по фазе, обусловленное временем распространения волны от источника до точки наблюдения.

В результате, особенно при математическом моделировании динамических процессов, математическая физика может увести исследователя в виртуальный мир идеализированных решений, граничных условий и тривиальных, но некорректных преобразований.

В связи с этим автором теории модального анализа интенсивности вибросейсм в основаниях [5] было выбрано для моделирования, например продольных сферических волн, гармоническое решение волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad \text{или} \quad \Delta \Phi = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \quad (8)$$

где $\Phi = \frac{A_o}{r} \text{Cos}(\omega t - \frac{r - r_o}{\lambda_p})$ - скалярный волновой потенциал гармонического

сферического точечного источника продольных сферических волн.

Для сейсмоперемещений в точке наблюдения это решение для продольных сферических волн определяется частной производной волнового потенциала

$$u_r(r, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial r} = -\frac{A_o}{r^2} \left[\text{Cos}(\omega t - \frac{r - r_o}{\lambda_p}) + \frac{r}{\lambda_p} \text{Sin}(\omega t - \frac{r - r_o}{\lambda_p}) \right], \quad (9)$$

где $r_o, \lambda = c_p / \omega = c_p / 2\pi f, c_p$ - соответственно, радиус источника,

приведенная длина волны и скорость продольных сейсмических волн в среде, а амплитуда этих перемещений будет зависимой от длины волны и расстояния от источника до точки наблюдения r .

$$u_{ra}(r) = \frac{A_o}{r^2} \sqrt{1 + \left(\frac{r}{\tilde{\lambda}_p}\right)^2}. \quad (10)$$

Полученное для перемещений решение (9) подтверждает, что в отличие от статического случая динамическое перемещение содержит две компоненты: упругую, зависящую только от r ,

$$u_r^y(r, t) = -\frac{A_o}{r^2} \text{Cos}\left(\omega t - \frac{r - r_o}{\tilde{\lambda}_p}\right) \quad (11)$$

и инерциальную, зависящую как от r , так и от частоты или длины волны сейсмической волны,

$$u_r^u(r, t) = -\frac{A_o}{r} \frac{1}{\tilde{\lambda}_p} \text{Sin}\left(\omega t - \frac{r - r_o}{\tilde{\lambda}_p}\right). \quad (12)$$

Из сопоставления уравнений (11) и (12) можно сделать вывод, что по мере роста расстояния от источника до точки наблюдения удельный вес инерциальной составляющей увеличивается от нуля вплоть до превышения амплитуд упругой компоненты на расстояниях больших приведенной длины волны. Эта закономерность выявляет существенное отличие алгоритмов расчетов мгновенных статических напряженно-деформированных состояний (НДС) и предлагаемой теории модального анализа интенсивности вибросейсм в основании.

Этот вывод распространяется и на полученную для расчета амплитуды вибросейсмических перемещений формулу (10), согласно которой геометрическое рассеяние упругой компоненты (A_o/r^2) растет по мере удаления от источника быстрее, чем инерциальной ($A_o/\tilde{\lambda}r$).

Для иллюстрации на рис.1 приведен график зависимости от частоты и удаления от источника отношения постоянных Ламе $\mu/\tilde{\mu}$, вычисленных для приповерхностного слоя грунтов оснований по статическим и динамическим

алгоритмам для продольных волн со скоростью распространения 500 м/с, коэффициентом Пуассона 0,38 и при отсутствии резонансов.

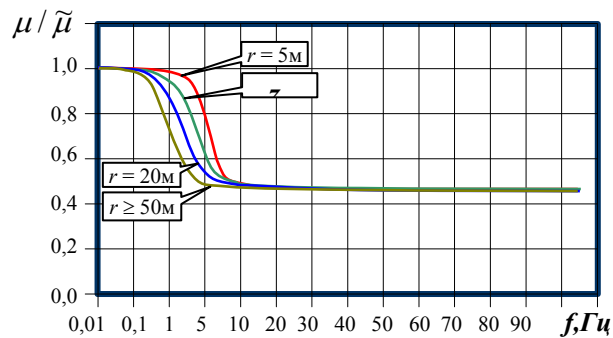


Рис. 1. Зависимость отношения статического и динамического модуля $\mu/\tilde{\mu}$ от частоты на разных глубинах или расстояниях от источника возбуждения при отсутствии резонансов

Остальные параметры НДС, например деформации в любой точке наблюдения среды, могут быть определены с использованием следующих дифференциальных уравнений, в том числе:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \quad (137)$$

для радиальных продольных деформаций, перпендикулярных фронту волны, и

$$\varepsilon_t = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \quad (14)$$

для продольных деформаций, параллельных фронту волны.

В случае твердого упругого изотропного полупространства возникает проблема выполнения краевых условий на свободной поверхности, на которой напряжения должны быть равны нулю.

Рассмотрим, используя выводы работы [5], «естественное» физическое решение этой проблемы для точечного источника сферических продольных волн, расположенного на поверхности полупространства.

В настоящее время известен и достаточно корректно верифицирован инструментальными средствами только один тип наблюдаемой сейсмической

волны, которая может создавать на поверхности полупространства компенсирующие напряжения. Это волна Рэлея.

Однако результаты решения волновых уравнений для волн Рэлея в рамках моделей математической физики, например полученных или рассмотренных в работах [1] и [6], не позволяют вывести эту проблему из области виртуальных решений в пространство реальных и экспериментально наблюдаемых физических волновых процессов.

Первая попытка преодолеть «виртуальный кризис» решения волновых уравнений была предпринята в работе [5]. Согласно проведенному в ней анализу было установлено, что волна Рэлея является единственным и естественным волновым динамическим явлением на свободной поверхности, которое может обеспечить выполнение условия сохранения кинематической неподвижности полупространства, в целом, в рамках действия закона сохранения импульса и нулевого баланса напряжений на свободной поверхности. В данном случае имеется в виду компенсирующее действие поверхностной волны на вертикальную компоненту интегрального объемного импульса, а также на вертикальную компоненту поверхностных напряжений, создаваемых в полупространстве и на свободной поверхности источником продольных сферических волн.

Таким образом, в общей физической постановке задачи необходимо найти совместные решения для двух, одновременно возбуждаемых типов волн (продольной сферической и поверхностной Рэлея), которые должны удовлетворять условиям сохранения кинематической неподвижности полупространства в целом, то есть

$$K_{cp} = \iiint_{V_{nn}} \mathbf{k} dV = \iiint_{V_{nn}} (\mathbf{k}_p + \mathbf{k}_R) dV = 0, \quad (15)$$

где \mathbf{k}_p и \mathbf{k}_R – соответственно, элементарные импульсы, возбуждаемые продольной и рэлеевской волнами в элементарном объеме среды, и нулевого баланса напряжений на свободной поверхности полупространства, в большом:

$$F_{cp} = \iint_S \sigma_{nn} \mathbf{n} dS = \iint_S (\sigma_{pnn} + \sigma_{Rnn}) \mathbf{n} dS = 0 \quad (16)$$

$$\text{и в малом } \sigma_{pnn} + \sigma_{Rnn} = 0 \quad (17)$$

Найденное в работе [5] совместное решение уравнений (15), (16) и (17) позволяет сделать следующий принципиально новый и физически корректный вывод. Условия кинематической неподвижности полупространства и нулевого баланса нормальных к свободной поверхности напряжений может быть обеспечено только при выполнении следующих условий.

Во-первых, интегральный импульс рэлеевской волны в вертикальном цилиндрическом слое, радиус которого равен горизонтальному радиусу центра «тяжести» r_c распределения вертикальной компоненты плотности импульса продольной волны в любом сферическом слое радиуса R , должен быть равен по величине и противоположен по знаку интегральному импульсу вертикальной компоненты продольной волны в этом сферическом слое.

Во-вторых, скорость распространения c_R поверхностной волны должна быть равна скорости движения проекции на свободную поверхность центра «тяжести» r_c распределения вертикальной компоненты плотности импульса продольной волны в соответствующем сферическом слое полупространства, которая для любой упругой среды приближенно может быть вычислена по формуле:

$$c_R \cong \frac{(0,87 + 1,12\nu)}{(1 + \nu)} c_s = \frac{(0,87 + 1,12\nu)}{(1 + \nu)} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (18)$$

Результаты вычислений по представленной в работе [5] формуле (18) позволяют убедиться, что скорость перемещения следа или проекции центра «тяжести» импульса продольной сферической волны на свободную поверхность полупространства с достаточно убедительной точностью совпадает со скоростью распространения волны Рэлея, полученной экспериментальным путем или установленной другими формальными методами, например в работах [1] и [6].

Наряду с этим, полученный в работах [5] и [7] результат в линейном случае позволяет использовать теорию модального анализа и моделирования интенсивности вибросейсм в упругой изотропной среде для расчета динамического НДС в расчетном объеме оснований путем тривиальной суперпозиции

(интерференции) всех участвующих в возбуждении среды типов (мод) сейсмических волн, включая продольные и поперечные, поверхностные: Рэлея и Стоунли. Дальнейшее развитие в работе [7] теории модального анализа [5] позволило автору разработать инженеринговые технологии комплексирования схем, состоящих из множества элементарных источников, для моделирования объемных сейсмических полей (динамических НДС) в основаниях виброактивных дорожных покрытий и фундаментов любой сложной конфигурации, а также для преломленных, отраженных и трансформированных волн в многослойных основаниях с вибропассивными фундаментами и с реально встречающимися неоднородностями тонкой структуры геологического разреза.

2. Алгоритмы вибродозиметрического метода мониторинга и прогноза эволюции остаточного ресурса циклической усталости материалов строительных конструкций и грунтов оснований

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

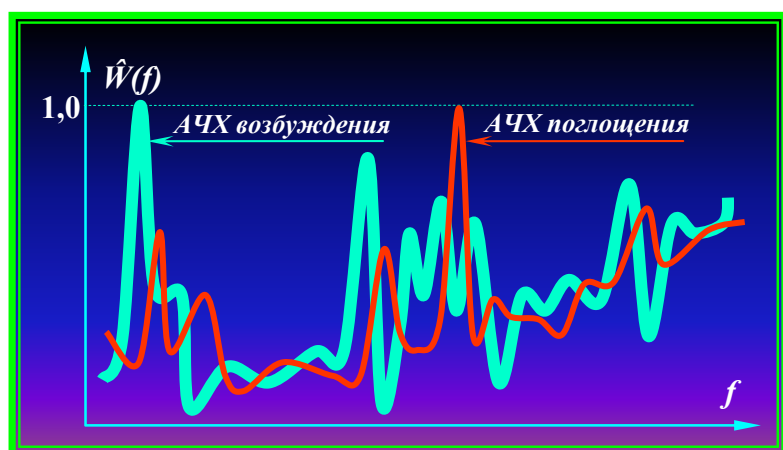


Рис.2. Спектры поглощения и возбуждения в реальных системах «объект-основание»

конструкционных матери-алов, включая металлы.

До настоящего времени в техносфере пока приме-няется единственный об-щепризнанный метод оценки деградации оста-точного 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.2 показаны принципиальные отличия нормированных спектров или амплитудночастотных характеристик (АЧХ) возбуждения и поглощения.

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 создаёт 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 проф. Шаблинского Г.Э. [3] по мониторингу резонансов строительных конструкций и проф. Хлыстунова М.С. [4,5,6] 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 вибропоглощения 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

релаксации 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:

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

где $\varepsilon^{\sigma}, \varepsilon^{\gamma}, \varepsilon^{\sigma\gamma}$ – 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:

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

где $\varepsilon^p, \varepsilon^s, \varepsilon^R, \varepsilon^{St}, \varepsilon^{ст-p}, \varepsilon^{ст-s}, \varepsilon^{p-s}, \varepsilon^{ст-p-s}$ – остаточные деформации в результате многоциклового воздействия, соответственно продольных (индекс p), поперечных (s) и поверхностных (Рэлея R и Стоунли St) 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

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

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: $W_{дин} = W_{упр} + W_{ин}$.

Причем, в том числе и упругая составляющая $W_{упр}$, 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

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

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

$$w_{ин} = w b e^{-\bar{\beta} \omega t},$$

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.т.н., проф. З.Г.Тер-Мартirosяном и к.т.н., доц.Черкасовой

Л.И..

При малых амплитудах виброрейсмического 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

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

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

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

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

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

$$\sigma_{ii}^2 \varepsilon_{ii}^2 = c_{ii} (\varepsilon_{ii}^2)^2 = s_{ii} (\sigma_{ii}^2)^2 \cong b_{ii} t f (\tilde{\sigma}_{ii} \tilde{\varepsilon}_{ii} + \rho \dot{u}_i^2) \quad (7)$$

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

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

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

$$\gamma_{ij}^2 \Big|_{i \neq j} \cong \sqrt{2s_{ij}b_{ij}tfw_{ij}} \Big|_{i \neq j} \quad (10) \text{ Уравнения (7), (8), (9) и (10)}$$

могут быть использованы для получения значений ожидаемых механических напряжений, эквивалентных многоциклового 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 многоциклового остаточные деформации для вычисления остаточного ресурса времени, по истечении которого эти деформации превысят допустимые, согласно проекту или СНиПу:

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

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

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

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

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

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 многосвязных 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.



Рис.3. Унифицированные виброметрические модули вибродозиметрической станции СВД – 60МВ

Вибродозиметрическая станция укомплектована унифицированными вибродозиметрическими модулями (Рис.3), позволяющими путем агрегатизации наращивать необходимое число каналов станции, например, с использованием серийной локальной компьютерной сети.

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 строительной 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 вибродозиметрической 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.

3. Алгоритмы мониторинга и прогноза эволюции геодинамических рисков неравномерных осадков зданий и сооружений методами динамической теории упругости

В последнее десятилетие XX века мировая строительная наука столкнулась с целым рядом мало изученных геоэкологических процессов в районах массовой застройки промышленных зон и мегаполисов, а также в основаниях тяжелых строительных объектов, включая АС.

К числу наиболее опасных геологических проявлений в этих районах следует отнести сегментацию геологического чехла в основаниях строительных объектов, неравномерное уплотнение грунтов, нарушение естественного стока грунтовых и ливневых вод, ускоренное развитие карстовых процессов.

Инструментальные и теоретические исследования закономерностей реализации этих проявлений, выполненные профессором Хлыстуновым М.С. в 2000-2002 годах Научно-исследовательским институтом экспериментальной механики (НИИЭМ) МГСУ, позволили установить одну из основных причин ускоренного развития этих процессов, связанную с неравномерной микроциклической усталостью грунтов оснований в результате многолетнего воздействия на них природных и техногенных микросейсмических и микрогравитационных нагрузок. Статистический анализ данных микросейсмических наблюдений показывает, что только за десятилетний период эксплуатации зданий, например в Московском регионе, грунты оснований 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.

Исследования НИИЭМ также позволили сделать вывод о существенном росте геоэкологической эффективности микросейсмических процессов в случае повышенной неоднородности тонкой структуры геологического разреза основания или его неравномерного вибросейсмического возбуждения, которые, в конечном

счете, и являются одной из основных причин сверхпроектного снижения уровня геотехнической надежности, кренов и неравномерных просадок сооружений и инженерных коммуникаций. Эта «неприятная» проблема современных городов существенно обостряется как в сейсмоактивных, так и в сеймопассивных районах планеты, если здания и сооружения имеют высокочастотные геодинамические резонансы, подробно рассмотренные в работах [5] и [6], которые не только концентрируют энергию вибросейсмического возбуждения оснований [4], но до 75 раз и более [2] могут усилить их интенсивность.

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

В связи с этим в рамках научно-инновационного сотрудничества Минобразования с Минатомом и ФССС РФ в НИИЭМ МГСУ (проект № 3.01-02 и др. – рук.проф.Хлыстунов М.С.) была проведена инструментальная верификация в условиях Мытищинского строительного полигона разработанной в лаборатории ОНИЛ КГК теории и алгоритмов расчета геоэкологической эффективности вибросейсмического возбуждения неоднородных оснований, которая позволяет выделять зоны повышенных рисков не учитываемого уплотнения («усталости») грунтов оснований, а также учитывать модальную геоэкологическую эффективность различных типов сейсмических волн, в том числе продольных и поперечных, а также поверхностных волн Рэлея и Стоунли.

В основание этой теории был положено существующее различие в формировании напряженно-деформированного состояния упругой среды при статической и вибросейсмической нагрузках, что, в отличие от статических задач теории упругости, позволяет рассчитывать результирующую интенсивность линейных волновых процессов в упругой среде в виде суммы («интерференции») интенсивностей отдельных типов волн. Линейная постановка такой задачи вполне корректна в связи с малой амплитудой (до 0,01g) микросейсмического и

микрогравитационного возбуждения оснований в реальных геологических условиях.

На базе основных положений данной теории в настоящей работе была исследована интенсивность проявления на границе двух пластов (в верхнем приближении к плоскости границы) наиболее мощных падающих продольных сферических волн для двух типовых микросейсмических источников возбуждения: точечного и линейного. Выбор таких типов источников обусловлен необходимостью обеспечения определенной универсальности расчетных алгоритмов объемного аналитического моделирования и сохранения возможности их дальнейшего применения для сложных типов и конфигураций фундаментов и оснований зданий, включая комплекс строительных объектов и основания районов массовой застройки.

Постановка конкретных задач исследования сводилась к следующему:

- 1) расчету и построению эпюр распределения амплитуд нормальных (σ_{33}) и касательных (τ_{31}) напряжений в верхнем приближении к плоскости наклонной границы;
- 2) выявлению зон повышенных рисков просадок, кренов и оползневых проявлений под виброисточниками или зданиями;
- 3) разработке корреляционного алгоритма для инструментального выявления зон ускоренной деградации оснований, которая, как правило, сопровождается сейсмической эмиссией и может быть зарегистрирована сейсмодатчиками.

Для упрощения решения данных задач грунты пластов рассматриваются как упругая изотропная среда, что вполне корректно для малых амплитуд реальных вибраций и выявления локальных зон максимальных геоэкологических рисков микросейсмического происхождения. Учитывая, что длины волн реального спектра микросейсм в реальной геологической среде существенно больше размеров расчетного объема оснований и мощности пластов тонкой структуры геологического разреза, то при моделировании распространения, отражения, трансформации и преломления волн от точечного сферического виброисточника применение удобных методов геометрической акустики не будет корректным.

Поэтому, согласно принципу Френеля-Гюйгенса, используемому как в оптике, так и в акустике, теория требует рассматривать каждую точку отражения, преломления и трансформации как композицию вторичных источников возбуждения сферических волн соответствующего типа (продольных, поперечных и поверхностных).

С другой стороны, это в определенной степени упрощает задачу выполнения краевых условий на границах, так как на дневной поверхности выполнение краевых условий реализуется в результате «естественного» возбуждения поверхностной волны Рэлея, а на границе слоев – поверхностной волны Стоунли. Причем расчеты краевых эффектов с использованием поверхностных волн имеют большую «прозрачность» физических причинно-следственных связей, по сравнению с принципом Сен-Венана в статике. Ранее такой подход фактически не рассматривался из-за отсутствия мощных персональных компьютеров и локальных компьютерных сетей, вычислительная мощность которых только в последние три года достигла необходимого уровня.

На рис.4 представлена расчетная схема вибросейсмического нагружения точечным источником продольных сферических сейсмических волн двухслойного основания с наклонной границей пластов.

Согласно схеме на рис.1 идеальный точечный источник виброреформаций I_{po} равномерно по всем направлениям излучает в упругое двухслойное полупространство гармоническую сферическую продольную сейсмическую волну.

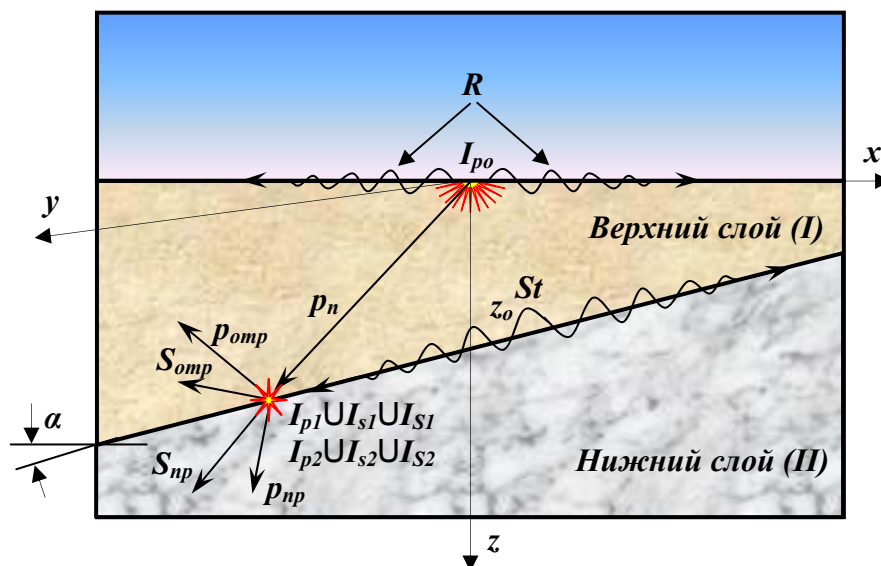


Рис.4. Расчетная схема вибросейсмического нагружения двухслойного основания с наклонной границей пластов

Наряду с этим на дневной поверхности возбуждается поверхностная волна Рэлея (**R**), быстро затухающая с глубиной, существование которой обеспечивает выполнение краевых условий отсутствия напряжений на свободной границе исследуемого полупространства. При падении, например, одного из лучей \mathbf{p}_n (прямой сферической волны) на границу слоев с разными акустическими импедансами $\rho_1 C_{p1} \neq \rho_2 C_{p2}$ (где ρ и C_p – соответственно, плотность среды и скорость распространения в ней продольной сейсмической волны) происходит как отражение, так преломление и трансформация волны. Так как в рассматриваемом случае приемы геометрической акустики неприменимы, то, в общем случае, необходимо рассматривать каждую точку границы, возбужденную падающей сферической продольной волной, как композицию вторичных сферических источников отраженных, преломленных и трансформированных сейсмических волн, включая отраженную ($\mathbf{p}_{отр}$) и преломленную ($\mathbf{p}_{пр}$) продольные, трансформированные при отражении и при преломлении поперечные сферические волны ($\mathbf{s}_{отр}$ и $\mathbf{s}_{пр}$), а также выравнивающую краевые условия на границе слоев волну Стоунли (**S**), быстро затухающую при удалении от границы. Точные решения волновых уравнений для рассмотренных типов волн можно найти в целом ряде классических монографий [5]. Следует также отметить, что при таком походе отпадает необходимость введения ряда «виртуальных» сейсмических волн, например, таких как головная, проходная и другие, которые являются отображениями интерференционных наложений нескольких реальных волновых процессов, необходимых при обработке данных вступлений в сейсморазведке или при моделировании акустических радиоэлектронных устройств. Наряду с этим легко проверить, например, по движению фронта отраженной волны, что при замене точечного источника на плоскую волну будут выполняться принципы геометрической акустики.

С учетом вышеизложенного суммарный тензор амплитуд напряжений (без учета фаз) в верхнем слое основания **I**, в том числе в приграничном слое, можно представить в виде суммы:

$$T_{\Sigma I} = T_{\Sigma I}^p + T_{\Sigma I}^s + T_{\Sigma I}^R + T_{\Sigma I}^S \quad (1)$$

где $T_{\Sigma I}^p$ - суммарный тензор амплитуд интенсивности

прямых и отраженных продольных сейсмических волн в **I** слое;

$T_{\Sigma I}^s$ - суммарный тензор амплитуд интенсивности прямых и отраженных (трансформированных) поперечных сейсмических волн в **I** слое;

$T_{\Sigma I}^R$ - суммарный тензор амплитуд интенсивности поверхностных сейсмических волн Рэлея, возбуждаемых на дневной поверхности;

$T_{\Sigma I}^S$ - суммарный тензор амплитуд интенсивности поверхностных сейсмических волн Стоунли, возбуждаемых на границе **I-II** слоев.

В свою очередь, суммарные тензоры по типам волн также можно выразить суммами тензоров амплитуд однотипных волн в **I** слое, в том числе:

$$T_{\Sigma I}^p = T_n^p + T_{om\Sigma I}^p + T_{mp\Sigma I}^{sp}; \quad (2)$$

$$T_{\Sigma I}^s = T_n^s + T_{om\Sigma I}^s + T_{mp\Sigma I}^{ps}; \quad (3)$$

$$T_{\Sigma I}^R = T_{np}^R + T_{om\Sigma I}^R + T_{mp\Sigma I}^{pR} + T_{mp\Sigma I}^{sR}; \quad (4)$$

$$T_{\Sigma I}^S = T_{np}^S + T_{om\Sigma I}^S + T_{mp\Sigma I}^{pS} + T_{mp\Sigma I}^{sS}, \quad (5)$$

где тензоры с индексом «п» относятся к прямой волне непосредственно поступающей в исследуемую точку от источника, с индексом «от» - для суммы тензоров амплитуд всех отраженных волн, указанного в верхнем индексе типа, с индексом «пр» - для преломленных волн, с индексом «тр» - для волн, трансформированных при отражении или преломлении из одного типа в другой согласно верхнему индексу.

Более детальные алгоритмы вычисления сумм тензоров несинфазных динамических возмущений с неравными длинами волн типа «Фазотрон» и вычисления динамических коэффициентов отражения, преломления и трансформации типа «Фрактал», в том числе поверхностных волн, являются объектами «ноу-хау» и находятся в собственности НИИЭМ МГСУ, МНТЦ ПНКО и авторов соответствующих разработок.

В случае отсутствия потерь при распространении сейсмической волны, по аналогии и с использованием индексов уравнения (1), можно записать, что сумма мощностей всех типов волн в первом и во втором слое должны быть равны мощности источника, то есть

$$P_u = P_{\Sigma I} + P_{\Sigma II} \quad (6)$$

а мощность поступающей непосредственно от источника прямой волны, которая существует только в первом слое, должна быть больше всех остальных порождаемых ее отраженных, трансформированных и поверхностных волн:

$$P_n^p > P_{om\Sigma I}^p + P_{\Sigma I}^s + P_{\Sigma I}^R + P_{\Sigma I}^S \quad (7)$$

Как показали результаты экспериментальных исследований по проекту №3.01-02 в реальных геологических условиях Московского региона мощность прямой сейсмической волны достигает или превышает 70% всей мощности сейсмического возбуждения в первом слое.

Аналитические исследования только квазистатических многоцикловых пластических деформаций в рамках проекта №3.01-02, выполненные на каф. ПММ МГСУ проф., д.т.н. Савостьяновым В.Н. и проф., д.т.н. Золотовым Б.А. даже в статическом случае убедительно показывают, что на ряде типовых геологических неоднородностей основания неравномерность просадок зданий может превышать 25%.

С другой стороны, в случае присутствия нелинейных потерь, например на механический гистерезис, который согласно исследованиям в рамках проекта Минатома д.т.н., проф. Тер-Мартirosяна З.Г. и к.т.н., профессором Черкасовой Л.И. (каф. МГрОиФ МГСУ) имеет место практически во всех грунтах чехла

приповерхностных слоев геологического разреза, можно для обеспечения повышенного запаса надежности расчетов положить, что вся энергия этих потерь уходит на уплотнение грунтов оснований. Тогда для баланса мощностей упругих $P_{уп\Sigma I}$ и пластических $P_{пл\Sigma I}$ волновых деформаций в первом слое можно записать уравнение

$$P_{\Sigma I} = P_{уп\Sigma I} + P_{пл\Sigma I} . \quad (8)$$

Откуда следует, что исследование распределения интенсивности прямой волны, в том числе вблизи границы пластов, уже позволит с определенной достоверностью (более 70%) оценить распределение локальных зон повышенных рисков нарушения устойчивости основания, например за счет неравномерного многолетнего многоциклового уплотнения грунтов, приводящего, в конечном счете, к техногенной сегментации пластов расчетного объема основания, к изменению пористости, коэффициентов фильтрации, плотности и других физико-механических характеристик грунтов. То есть будет иметь место техногенный вибросейсмический геоэкологический эффект нарушения естественных геологических и гидрогеологических процессов, что уже, само по себе, требует оценки рисков потери геотехнической надежности строительных объектов и районов массовой застройки, включая мегаполисы.

Для иллюстрации возможностей теории и алгоритмов геоэкологической эффективности микросейсмических процессов в основаниях строительных объектов на рис.2 приведены эпюры амплитуд вибросейсмических напряжений прямой волны от точечного источника продольных сейсмических волн $\sigma'_{33}{}^p$ и $\tau'_{13}{}^p$, действующих, соответственно, перпендикулярно и в плоскости близкой и параллельной к границе слоев разреза на рис.1. Причем продольное напряжение ответственно за микроцикловое уплотнение грунтов, касательное или сдвиговое – за непосредственный запуск механизма сегментации приграничной области пластов, которая потенциально может привести к образованию гидрогеологических образований канального типа и(или) к ускорению карстовых процессов непосредственно в расчетном объеме основания строительного объекта.

Для расчета этих эпюр использовался специально разработанный авторами алгоритм и программа «К-Эффект» для ПЭВМ, которые позволяют оценить распределение рисков реализации указанных процессов в первом верхнем слое расчетного объема основания виброактивных объектов с любой конфигурацией фундамента при различных углах и азимутах наклона первой отражающей границы в результате действия прямых продольных сейсмических волн, например от точечного источника вибросейсмических деформаций на дневной поверхности полупространства, как показано на рис.1.

Согласно блок-схеме алгоритма на первом этапе вычислений проводился расчет напряжений в главной системе координат, сориентированной вдоль фронта волны, а на втором – как в геодезической, так и в приграничной системе координат, сориентированной вдоль плоскости границы пластов.

Для расчета распределения интенсивности в качестве решения классического волнового уравнения для продольной сферической гармонической волны [1] использовалась гиперболическая форма записи этого решения, удовлетворяющая теореме Остроградского-Гаусса.

Закономерность распределения рисков, например для продольной падающей волны, рассчитывалась в относительных единицах удельной мощности ее воздействия на элементарную площадку $\Delta S_{ij} = 1$ в расчетной плоскости (x', y') границы $S_{гр}$ с сеткой $N \times K$ по формуле:

$$R_n^p(x'_i, y'_j) = \frac{P_n^p(x'_i, y'_j)}{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^N P_n^p(x'_i, y'_j)} \quad (9)$$

или в интегральной форме

$$R_n^p(x'_i, y'_j) = \frac{P_n^p(x'_i, y'_j)}{\frac{1}{S_{ep}} \iint_{S_{ep}} P_n^p(x', y') dx dy} \quad (10)$$

Для иллюстрации влияния наклона границы на риск несимметричной просадки грунтов под объектом, а, следовательно, и на риск сверхпроектного

крена объекта (источника), на рис.5 приведены эпюры, иллюстрирующие распределение амплитуд продольных, перпендикулярных границе напряжений σ'_{33} , при углах падения пластов $\alpha=0$ и $\alpha=15^\circ$.

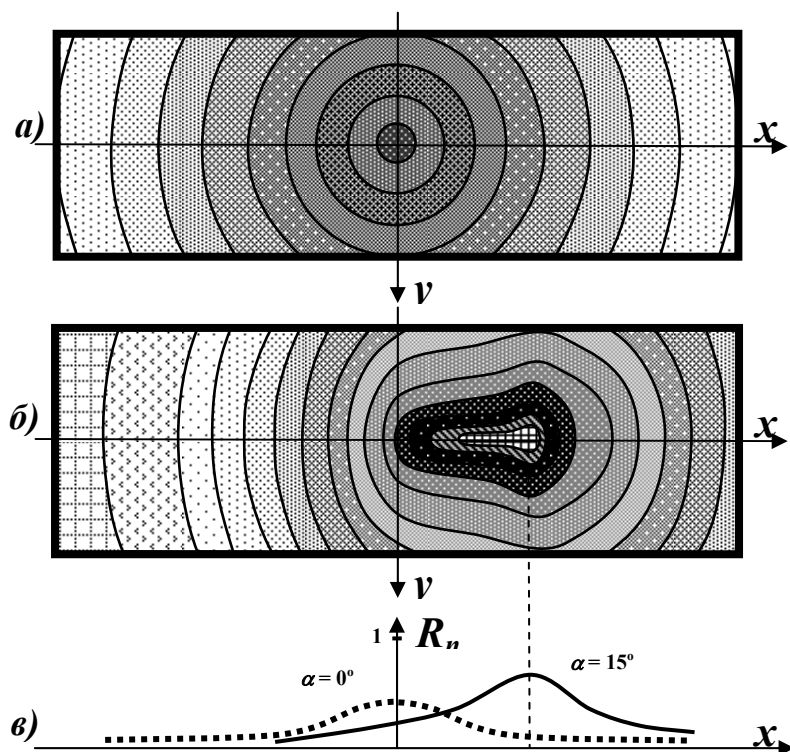


Рис.5. Эпюры распределения амплитуд вибросейсмических напряжений σ'_{33} вдоль наклонной границы слоев при $\alpha = 0$ (а) и $\alpha = 15^\circ$ (б) и распределение рисков (в) просадки грунтов, изменение контраста эпюр соответствует $0,01 \max \{ \sigma'_{33} \}$

Как видно из эпюр при появлении угла наклона границы симметрия распределения интенсивности этих напряжений нарушается, а риск реализации крена источника увеличивается.

Для сопоставления на рис.6 приведены эпюры, иллюстрирующие распределение амплитуд касательных напряжений и рисков сегментации канального типа вдоль границы пластов под углами $\alpha=0$ и $\alpha=15^\circ$, на которых видно, что при появлении угла наклона границы симметрия распределения интенсивности этих напряжений также нарушается, а риск крена и(или)

ускоренного карстообразования и провала под объектом (источником) со стороны подъема границы увеличивается.

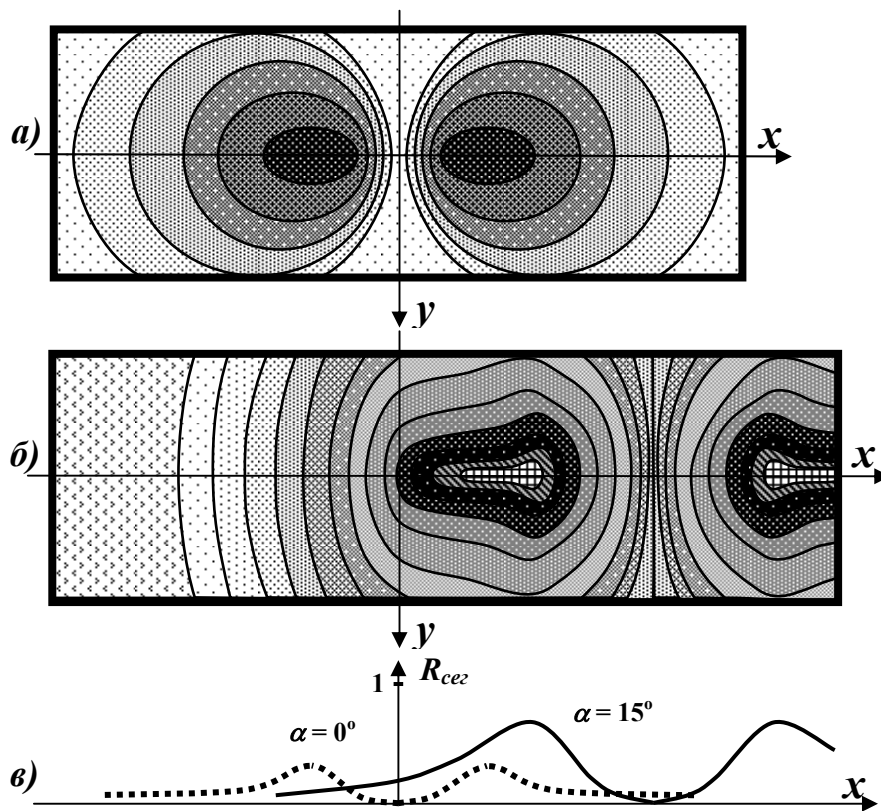


Рис.6. Эпюры распределения амплитуд вибросейсмических напряжений τ'_{13} вдоль наклонной границы слоев при $\alpha = 0^\circ$ (а) и $\alpha = 15^\circ$ (б) и распределение рисков (в) сдвига и сегментации пластов, изменение контраста и узора участков эпюр соответствует $0,01\max\{\tau'_{13}\}$

В иллюстрациях на рис.5 и рис.6 в виде проекции на дневную поверхность показан характер изменения амплитуды вибросейсмических напряжений σ'_{33} и τ'_{13} при повороте плоскости границы относительно оси y' , лежащей в этой плоскости и параллельной оси y в геодезической системе координат на дневной поверхности основания (x,y) .

Учитывая, что характер изменения распределения рассмотренных рисков в зависимости от угла наклона границы сохраняется как при анализе геоэкологической эффективности других типов сейсмических волн, так и для типовых конфигураций фундаментов и топологий тонкой структуры геологических разрезов оснований, в данной статье мы ограничились

представлением эпюр только для прямых сейсмических волн, падающих на плоскость границы.

Вместе с тем при необходимости проектной оценки геодформационных и геоэкологических рисков микросейсмического происхождения в основаниях объектов промышленного, гражданского и транспортного строительства можно воспользоваться разработанным на основе прикладной динамической теории упругости в ОНИЛ КГК и НИИЭМ МГСУ программно-алгоритмическим комплексом «Композит-7» (авторы профессор Хлыстунов М.С. и ст.преподаватель каф. ПММ Могилюк Ж.Г.), который успешно применяется при обследовании технического состояния и при исследованиях причинно-следственных связей и механизмов ускоренного износа или обрушения ответственных зданий и сооружений как в Московском регионе, так и других регионах Центральной России .

Наряду с этим на кафедре МГрОиФ МГСУ разработана опытная методика, позволяющая проводить аттестацию нелинейных механических характеристик эталонных грунтов, включая циклическое уплотнение под действием микросейсмических нагрузок. Первые результаты использования этих характеристик для оценки процессов накопления остаточных деформаций в грунтах при квазистатическом микроциклическом нагружении, полученные на кафедре Прикладной механики и математики МГСУ проф. Савостьяновым В.Н. с коллегами с кафедры Информатики и прикладной математики Золотовым Б.А. и Акимовым П.А., подтвердили, что в этом случае учет нелинейных свойств грунтов позволяет не менее, чем на 25% повысить точность расчета геотехнической надежности строительных объектов.

Существующие технические решения и принципы мониторинга состояния строительных конструкций предназначены, главным образом, для контроля линейных характеристик, вибросейсмических нагрузок и передаточных функций зданий и сооружений. Вместе с тем процессы разупрочнения и отражающие их динамические характеристики являются по своей физической сущности принципиально нелинейными.

«Линейный» подход к решению задачи контроля эволюции остаточного ресурса устойчивости и надежности зданий и сооружений позволяет моделировать линейные динамические свойства строительных конструкций, что, несомненно, является полезным при его использовании, например, в образовательном процессе или при расчетном моделировании без учета нелинейных проявлений износа и деградации ресурса надежности.

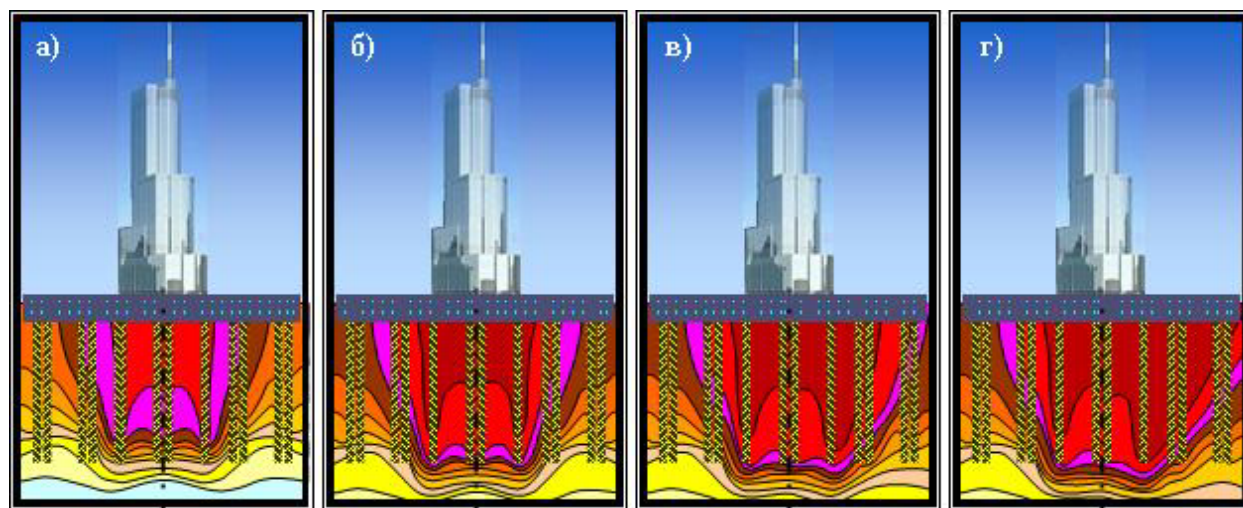


Рис.7. Сравнительные эпюры вертикальных перемещений с учетом (б, в, г) и без учета (а) геодинамических проявлений природных и техногенных микродинамических процессов: а) симметричный эпюр, характерный для программ «Лири 9.2» и «FEMmodels»; б), в) и г) эпюры разработанной в МГСУ конверсионной программы «Композит-7» с учетом проявлений за 5 лет эксплуатации, соответственно, для однородного по сейсмоакустическим свойствам основания, при отклонении градиента неоднородностей на 0° , $2,5^\circ$ и на 5° от вертикали

Широко распространенные расчетные программные комплексы интерпретации данных мониторинга, базирующиеся на различных модификациях метода «конечных элементов», корректно применимы для проектного моделирования только квазистатической устойчивости, но не обладают необходимой математической достаточностью для расчетного и прогнозного моделирования принципиально нелинейных процессов (см. рис.7), представляющих физическую сущность процессов износа и деградации запаса прочности строительных материалов, непрерывно распределенных жесткостей и масс сложно построенных механических колебательных систем, включая существенно неоднородные основания. Это удалось обнаружить методом численного моделирования с использованием разработанного Могилюк Ж.Г.

программно-алгоритмического комплекса «Композит-7» на базе математического аппарата теории модального анализа, прикладной динамической теории упругости и вибродозиметрического метода профессора Хлыстунова М.С.

4. Состояние нормативного обеспечения устойчивости систем типа «объект-основание» ответственных строительных объектов Москвы в условиях экстремальных динамических нагрузок

Несмотря на целый ряд несомненных успехов в созидательной деятельности строительного комплекса столицы, имеют место тревожащие тенденции в текущем состоянии системного обеспечения комплексной безопасности жизнеобеспечения граждан с учетом новых глобальных рисков и угроз.

Действующая сегодня в России система контроля и обеспечения безопасности зданий и сооружений в течение всего жизненного цикла: «От геотехнического обоснования до вывода зданий и сооружений из эксплуатации», существенно отстает в своем развитии от высоких темпов строительства, достигнутых в Москве. Старая система не в полной мере соответствует возрастающим требованиям по обеспечению безопасности населения столицы в условиях роста интенсивности природных и техногенных процессов и проявлений террористической угрозы.

До настоящего времени в строительном комплексе и в ЖКХ города не нашел эффективного решения целый ряд принципиально новых проблем и задач безопасности. Одна часть из них связана с неконтролируемыми трудностями переходного этапа российской экономики, другая с ошибочными градостроительными концепциями советского периода.

В связи с этим население и правительство Москвы могли бы надеяться, что сосредоточенные в столице головные НИИ и проектные организации строительного комплекса России и региона смогут оперативно и эффективно решить текущие и перспективные проблемы безопасности.

Вместе с тем нельзя не отметить, что в наступивший век высоких технологий и при благоприятной рыночной конъюнктуре в строительстве откладывается на

неопределенный срок решение именно тонких и перетекающих одна в другую проблем повышения качества и надежности изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации строительных объектов.

Несмотря на многочисленные запросы специалистов и общественных организаций учитываются далеко не все текущие и отложенные угрозы технической безопасности, качеству жизни и здоровью населения столицы, связанные с застройкой геологических «неудобий» города, с флюидной и активностью геологических структур и с резко возросшей микродинамической интенсивностью транспортной техносферы мегаполиса.

Не достигнута необходимая надежность проектной оценки природных и техногенных рисков неравномерных осадок и ускоренного износа строительных конструкций в реальных геологических условиях города.

Не ведется мониторинг и учет на долгосрочную перспективу микроциклической усталости строительных конструкции и скрытых аккумулятивных процессов разупрочнения строительных материалов, грунтов оснований и т.п. аварийно опасных явлений.

Не соответствует современному мировому уровню и не реализуется конвейерный контроль надежности и качества строительных материалов, строительных конструкций, технологий и качества монтажно-строительных работ в плане их суммарного влияния на деградацию остаточного ресурса надежности в период всего гарантийного срока эксплуатации зданий и сооружений.

В связи с коротким сроком существования большого числа подрядных строительных организаций и проектных мастерских, не доживающих до истечения и четверти гарантийного срока безопасной эксплуатации спроектированных и возведенных ими объектов, вся материальная, политическая и моральная ответственность уже начинает перемещаться на Мэрию и Правительство Москвы. Это является непозволительной роскошью для бюджета города.

Экспертная, инспекционная и надзорная деятельности в строительстве и в ЖКХ Москвы не имеет современного теоретического, методического и инструментального обеспечения. Отсутствуют комплексные технологии

системного анализа материалов обследований и экспертизы проектов по всем частным аспектам безопасности в целом.

Из материалов следствия по аварии в аквапарке следует, что имеет место подмена трудоемкой расчетной экспертной и надзорной деятельности совещаниями, протоколами, локальными выводами или мнениями, пусть даже очень авторитетных специалистов по узким вопросам. Следствие по аквапарку полностью подтвердило, что достоверное экспертное заключение и сертификация проектов по системной безопасности объекта требует выполнения целого комплекса расчетных оценок по объему приближающемуся к затратам на проектирование.

В целом ряде частных строительных компаний города имеет место перекоп в использовании инженерных кадров. Если во всем цивилизованном мире непосредственный руководитель строительного производственного процесса и предприятия – это экономически подкованный талантливый инженер, то в российском строительном бизнесе, по необъяснимым причинам, – это экономически подкованный экономист при строительстве. В таких случаях реализуется подмена понятия хозяина предприятия или предпринимателя, с одной стороны, и непосредственного руководителя производственного процесса – высококвалифицированного инженера, с другой.

В страховой и инвестиционной деятельности не учитывается, а также в законодательных органах не разрабатывается система эффективного правового регулирования ответственности за ущерб из-за не полного учета природных, антропогенных и техногенных рисков или ошибок при геотехническом обосновании, проектировании и эксплуатации в течение всего гарантийного срока эксплуатации объекта. В связи с этим уже через несколько лет эта ответственность может стать непосильной финансовой нагрузкой на бюджет и морально-политической на правительство города.

Применяемые технологии и методы мониторинга не отличаются новизной высоких технологий и не отвечают, как современным достижениям науки, так и

проблемам предотвращения роста аварийности в строительном комплексе и в ЖКХ.

Предлагаемые новые инструментальные методы мониторинга не отвечают требованиям рентабельности строительства и фактически являются аналогами классических опорных геодезических методов, только насыщенных еще более дорогостоящей современной аппаратурой, гарантийный срок эксплуатации которой на порядок меньше аналогичных параметров для строительных объектов.

Действующая и, в основном, устаревшая нормативно-техническая документация, включая СНиПы, МГСН, рекомендации и инструкции, не дают прямых ответов и гарантий безусловного обеспечения безаварийной эксплуатации строительных объектов, а ограничиваются требованиями по косвенным признакам и параметрам, не поддающимся однозначной интерпретации и не гарантирующим в общем случае достижения необходимого уровня безопасности эксплуатации зданий и сооружений.

К сожалению, такими дефектами обладает и свежие нормативные документы Москвы, например, введенные в действие с 01 марта 2005 года МГСН 2.10-04 «Предпроектные комплексные обследования и мониторинг зданий и сооружений для восстановления, реконструкции и капитального ремонта», а также РМ-2957 «Рекомендации по эксплуатации многофункциональных высотных зданий и комплексов». Несомненно, важные для решения задач безопасности динамические обследования в этих документах ограничены, к сожалению, перечнем параметров, не дающих ни прямого, ни косвенного ответа по оценке параметров надежности объектов.

Такой фрагментарный поход наблюдается и в использовании потенциала конверсии. Зачастую конверсия мировых достижений нашего ВПК воспринимается как тривиальное «перетаскивание» уникальных технических решений из одной области в другую, что категорически не соответствует самому смыслу конверсии и тончайшим особенностям и механизмам реализации высоких технологий в смежных областях науки и производства.

К нашему большому сожалению, увлечение «быстрыми» деньгами привело к существенному отставанию в формировании научно-технического и методического задела в области эффективного решения комплексных текущих и перспективных задач безопасности в строительном комплексе и в ЖКХ.

В Москве, как и в других регионах, наблюдается стихийный перенос основной нагрузки на формирование передовых научных идей, технологий и опережающего научно-технического задела по решению новых комплексных проблем безопасности с головных научно-исследовательских и проектных институтов отрасли на МГСУ и региональные строительные вузы.

С одной стороны, это соответствует сложившейся на западе системе формирования опережающего комплексного научного и технологического задела на отраслевые университеты. С другой, не подкреплено давно сложившейся на западе системой финансирования и спонсирования университетской науки. Эту проблему, по крайней мере, в рамках нашего региона, необходимо срочно решить и поддержать роль головного университета строительной отрасли России в интересах строительного комплекса столицы.

Система предлицензионного повышения квалификации и квалификационные критерии выдачи лицензий не соответствуют современным требованиям обеспечения безопасности в строительном комплексе.

Отмечается низкий остаточный уровень фундаментальных инженерных знаний в среднем звене руководителей строительства, в том числе мигрантов, непосредственно связанных с инженерным (по квалификационным требованиям) уровнем обеспечения контроля качества и надежности строительно-монтажных работ и эксплуатации строительных объектов.

Вместе с тем имеется весьма позитивный опыт в горнодобывающей отрасли России, где для получения лицензии необходимо не менее чем трем высшим руководителям предприятия проходить один раз в пять лет повышение квалификации по фундаментальным и практическим проблемам обеспечения безопасности собственного производства.

Судя по анализу материалов проекта по аквапарку, а также согласно другим источникам по целому ряду проектных мастерских и организаций в проектировании и при оценке надежности строительных объектов наблюдается непродуманное увлечение информационными технологиями. Если во всем цивилизованном мире внедрение информационных технологий главным образом связано с уменьшением затрат на расчетно-техническое и дизайнерское сопровождение инженера, то у нас все с точностью «до наоборот». Информационными технологиями пытаются подменить или даже заменить квалифицированную инженерную деятельность.

Например, в Германии до информационного бума для технического обеспечения интеллектуальной деятельности одного инженера требовалось до 5 техников и выпускников строительных колледжей (техникумов), то после внедрения информационных технологий осталось один-два. Налицо суммарный экономический эффект по трудозатратам, а не в связи с подменой инженера.

В МГСУ имеется единственный в России и в Европе эталонированный геодинамический строительный полигон, на котором можно в натуральных условиях провести экспериментальную сертификацию и новых информационных технологий и отработку новых нормативных требований, а также модельную аттестацию комплексной безопасности новых архитектурно-строительных решений и проектов, в том числе по высотному домостроению. Вместе с тем возможности полигона до сих пор не востребованы ни проектными, ни экспертными, ни надзорными организациями Москвы, хотя на нем уже более 10 лет успешно решались аналогичные задачи безопасности строительных объектов в интересах Минатома, ФССС и Минобороны.

На основании вышеизложенного, строительному комплексу Москвы целесообразно поручить МГСУ с привлечением профильных головных научно-исследовательских, проектных и проектно-изыскательских организаций столицы и смежных отраслей разработать:

- 1) программу и концепцию практической системной реализации комплексной безопасности многофункциональных высотных комплексов и подземных

сооружений Москвы на базе современных достижений строительной и смежных отраслей науки и техники, а также конверсионных разработок отраслевых лабораторий ВПК. В отличие от действующей в настоящее время системы контроля безопасности в строительном комплексе и в ЖКХ эта концепция должна объединить все частные задачи обеспечения высокой системной надежности и безопасности строительных объектов, начиная с геотехнического обоснования строительства и вплоть до вывода объекта из эксплуатации;

2.) комплексные проектные, строительные и инструментальные технологии, обеспечивающие системную безопасность критически важных объектов Москвы в условиях роста интенсивности природных и техногенных рисков, а также террористических угроз. В связи с этим также должны быть существенно переработаны нормативные требования к:

- оценке геотехнических рисков с учетом тонких геодинамических, геолого-геофизических и техногенных процессов на территории города;
- порядку экспертизы строительных проектов и программ и сертификации систем расчетной оценки и мониторинга остаточного ресурса надежности и динамической устойчивости высотных зданий, инженерно-коммуникационных сетей жизнеобеспечения объектов, средств и систем комплексной динамической, противоударной и противопожарной защиты.

3) высокотехнологическую систему технической безопасности и жизнеобеспечения критически важных объектов, включая программно-аппаратный комплекс обнаружения аварийно- и пожароопасных нештатных ситуаций и оперативного реагирования по организации их устранения, а также рентабельную встроенную систему безопорного мониторинга неравномерных осадок и кренов зданий и сооружений.

4) нормативно-методические документы по сертификации проектов, по проведению комплексных модельных, полигонных и натурных испытаний, инструментальных обследований зданий, сооружений, систем и материалов, а также программ по подготовке, повышению квалификации и предлицензионной аттестации специалистов в области обеспечения комплексной безопасности критически важных объектов;

5) продолжить на стадии ОКР разработку комплексных технологий обеспечения безопасности высотных зданий и подземных сооружений столицы в условиях террористических проявлений на базе результатов научно-исследовательских работ, выполненных в 2004 году МГСУ в кооперации с смежными организациями по проекту № БТ-13.2/004 в федеральной целевой научно-технической программы: «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники».

5. Модальный анализ микросейсмических процессов и моделирование геодеформационных рисков в основаниях ответственных объектов

Эффективность и риски влияния микросейсмических нагрузок на циклическую усталость грунтов неоднородных оснований до настоящего времени трудно поддаются корректной расчетной оценке [1], в том числе для многослойных оснований с наклонными границами пластов геологического разреза.

В связи с этим в рамках научно-инновационного сотрудничества Минобразования с Минатомом и ФССС РФ в НИИЭМ МГСУ (проект № 3.01-02 и др.) была проведена инструментальная верификация в условиях Мытищинского строительного полигона разработанной в лаборатории ОНИЛ КГК теории и алгоритмов расчета геоэкологической эффективности вибросейсмического возбуждения неоднородных оснований, которая позволяет выделять зоны повышенных рисков не учитываемого уплотнения («усталости») грунтов оснований, а также учитывать модальную геоэкологическую эффективность различных типов сейсмических волн, в том числе продольных и поперечных, а также поверхностных волн Рэлея и Стоунли.

В основание этой теории было положено существующее различие в формировании напряженно-деформированного состояния упругой среды при статической и вибросейсмической нагрузках, что, в отличие от статических задач теории упругости, позволяет рассчитывать результирующую интенсивность линейных волновых процессов в упругой среде в виде суммы («интерференции») интенсивностей отдельных типов волн. Линейная постановка такой задачи вполне корректна в связи с малой амплитудой (до 0,01g) микросейсмического и микрогравитационного возбуждения оснований в реальных геологических

условиях.

На базе основных положений данной теории была исследована интенсивность проявления на границе двух пластов (в верхнем приближении к плоскости границы) наиболее мощных падающих продольных сферических волн для двух типовых микросейсмических источников возбуждения: точечного и линейного. Выбор таких типов источников обусловлен необходимостью обеспечения определенной универсальности расчетных алгоритмов объемного аналитического моделирования и сохранения возможности их дальнейшего применения для сложных типов и конфигураций фундаментов и оснований зданий, включая комплекс строительных объектов и основания районов массовой застройки.

Постановка конкретных задач исследования сводилась к следующему:

- 4) расчету и построению эпюр распределения амплитуд нормальных (σ_{33}) и касательных (τ_{31}) напряжений в верхнем приближении к плоскости наклонной границы;
- 5) выявлению зон повышенных рисков просадок, кренов и оползневых проявлений под виброисточниками или зданиями;
- 6) разработке корреляционного алгоритма для инструментального выявления зон ускоренной деградации оснований, которая, как правило, сопровождается сейсмической эмиссией и может быть зарегистрирована сейсмодатчиками.

Для упрощения решения данных задач грунты пластов рассматривались как упругая изотропная среда, что вполне корректно для малых амплитуд реальных вибраций и выявления локальных зон максимальных геоэкологических рисков микросейсмического происхождения. Учитывая, что длины волн реального спектра микросейсм в реальной геологической среде существенно больше размеров расчетного объема оснований и мощности пластов тонкой структуры геологического разреза, то при моделировании распространения, отражения, трансформации и преломления волн от точечного сферического виброисточника применение удобных методов геометрической акустики не будет корректным. Поэтому, согласно принципу Френеля-Гюйгенса, используемому как в оптике, так и в акустике, теория требует рассматривать каждую точку отражения, преломления и трансформации как композицию вторичных источников возбуждения сферических волн соответствующего типа (продольных, поперечных и поверхностных).

С другой стороны, это в определенной степени упрощает задачу выполнения краевых условий на границах, так как на дневной поверхности выполнение краевых условий реализуется в результате «естественного» возбуждения поверхностной волны Рэлея, а на границе слоев – поверхностной волны Стоунли. Причем расчеты краевых эффектов с использованием поверхностных волн имеют большую «прозрачность» физических причинно-следственных связей, по сравнению с принципом Сен-Венана в статике. Ранее такой подход фактически не рассматривался из-за отсутствия мощных персональных компьютеров и локальных компьютерных сетей, вычислительная мощность которых только в последние годы достигла необходимого уровня.

Учитывая, что характер изменения распределения рассмотренных рисков в

зависимости от угла наклона границы сохраняется как при анализе геоэкологической эффективности других типов сейсмических волн, так и для типовых конфигураций фундаментов и топологий тонкой структуры геологических разрезов оснований, можно ограничиться представлением эпюр только для прямых сейсмических волн, падающих на плоскость границы.

В качестве объекта модельного анализа геодеформационных рисков в данной статье взята виртуальная АЭС с некоторым типовым набором энергоблоков. Экстренные проверки и инструментальная верификация экспертами МАГАТЭ микросейсмических проявлений в районах расположения и на промплощадках целого ряда европейских и российских АЭС убедительно подтверждает, что авторитетные международные организации и эксперты имеют веские теоретические или практические основания для проведения инспекционного контроля состояния микросейсмического фона в плане возможных рисков аварийной реализации последствий его многолетнего воздействия на строительную конструкцию и оборудование станций.

Наряду с этим результаты проведенных в МГСУ исследований по проектам Минатома России следует, что возможные риски многолетнего микросейсмического воздействия и дестабилизации геоэкологических связей и процессов могут существенно ускорить геодеформационные процессы под основаниями любых тяжелых сооружений и АЭС с реакторами любого типа, включая зарубежные.

Эта проблема не менее важна и для других объектов промышленного и гражданского строительства, особенно, в мегаполисах с высоким уровнем техногенной вибросейсмической нагрузки грунтов оснований.

В связи с этим в процессе исследования много неопределенностей возникло при анализе отечественной и зарубежной информации о «безопасных» происшествиях на АЭС. В частности было достаточно убедительно установлено, что многие мелкие нештатные ситуации имели, как правило, механическую природу реализации. Например, на одном из реакторов при загрузке топливом произошел незначительный перекоп крышки активной зоны (котла), на другом – были выявлены системные волосные трещины на панелях ограждения турбинного корпуса, на третьем – ранее регламентного срока разрушились подшипники турбины и т.д.

Предположим, что моделируемая виртуальная АЭС является первенцем освоения энергоблоков с реакторами типа ВВЭР. Каждый из пяти реакторов станции является прототипом серийных энергетических реакторов установленных на других АЭС. Всего на АЭС построено пять энергоблоков: *энергоблок 1* с реактором ВВЭР-210, *энергоблок 2* с реактором ВВЭР-365, *энергоблоки 3, 4* с реакторами ВВЭР-440, *энергоблок 5* с реактором ВВЭР-1000.

Характерной особенностью этих мелких происшествий было то, что они не постулировались при теоретическом обосновании безопасности станций и, как правило, происходили в пределах локальных зон промплощадки, отличающихся повышенной виброактивностью.

Подобные мелкие «неприятности» имели место на целом ряде отечественных и зарубежных станций с реакторами и оборудованием, спроектированными и изготовленными в разных странах и на разных предприятиях.

В связи с этим имеет несомненное и убедительное право на существование и на дополнительное расследование версия о существовании некоторых скрытых малоамплитудных процессов, например вибросейсмических, обладающих аккумулятивным эффектом, приводящим к плавным отказам конструкции или оснований станций.

В пользу такой версии указывают статистические материалы обследований причин микроциклической усталости грунтов оснований в мегаполисах, особенно в районах с повышенным уровнем микросейсм, с перегруженными транспортными развязками или с мощной виброактивной составляющей техногенных перегрузок геоэкологической среды оснований объектов городской или промышленной техносферы.

В связи с этим основной целью данной работы является рассмотрение геоэкологической эффективности воздействия малоамплитудных, но многоцикловых вибросейсмических нагрузок на основания виброактивных объектов на примере турбинного корпуса исследуемой АЭС.

Геодезические наблюдения за осадками и кренами зданий и сооружений второй очереди рассматриваемой АЭС начались в 1979 году. Периодичность выполнения наблюдений была регламентирована и выполнялись с периодичностью 3 года.

На рис.8 показаны изолинии вертикальных смещений осадочных марок главного корпуса 4 блока по состоянию на 2000 год (относительно февраля 1981г.).

Наблюдаемыми объектами блока 4 АЭС являются: внешние стороны главного корпуса; внутренние ограждения турбинного цеха; турбоагрегаты; градирни; вентиляционная труба блока 4 .

Как показывает анализ наблюдений на рис.8. в центре реакторно-турбинного цеха (РТЦ) 4 имеются осадки, достигающие ~ 20-30 мм. Скорость осадки в среднем достигает 2 мм/год. Предположительно, причиной этого являются техногенные воздействия со стороны динамически активного технологического оборудования и многое другое, что сопровождает эксплуатацию технологического оборудования.

В целом здание главного корпуса испытывает вертикальные смещения, котлообразно активизирующиеся к центру реакторно-турбинного цеха. По краям РТЦ 4 скорости вертикальных смещений минимальны и составляют величины порядка $\pm 0,2$ мм/год. В центре РТЦ III-IV – до 2-2,5 мм/год. На текущий год суммарные вертикальные смещения в центре РТЦ 4 составили величины порядка 20 мм. На фоне общей картины вертикальных смещений отмечаются локальные осадки, связанные с индивидуальными техногенными особенностями оборудования главного корпуса.

Вертикальные смещения верхних фундаментных плит турбоагрегатов в основном связаны с общей картиной осадок. По всем без исключения верхним фундаментным плитам турбоагрегатов отслеживаются максимальные осадки в

районе наибольших нагрузок от динамически активного оборудования (по цилиндрам высокого и низкого давления). Прирост скоростей вертикальных смещений в этих точках составляет от 0,5 до 1,5 мм/год от общего проседания. Следует отметить, что проекции вертикальных смещений, снесенные к оси валопровода на уровне горизонтального разъема (прогибы оси валопровода), в основном однознаковы и в большинстве случаев равномерны, за исключением небольшого разнознакового прогиба оси валопровода ТА-9.

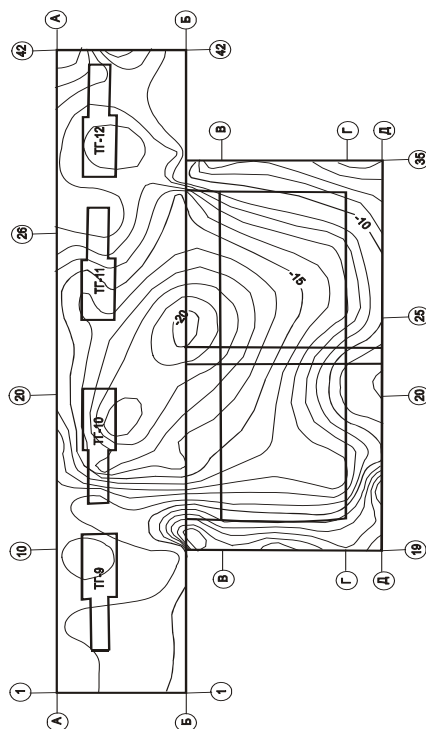


Рис.8. Изолинии вертикальных смещений осадочных марок главного корпуса блока 4 (суммарные, относительно марта 1976 г.)

Суммарные вертикальные смещения оболочки аппаратного отделения блока 4 относительно февраля 1981 года неравномерны и находятся в пределах от 1,0 мм (м.103) до 9,1 мм (м.97). Значительны текущие вертикальные смещения, которые в среднем составляют 7 мм.

Вертикальные смещения вентиляционной трубы блока 4 стабильны, прогибов и кренов не наблюдается.

Начальный цикл измерений был выполнен по гадирням в разные сроки, так гадирен № 1, 2, 3, 7 – в феврале 1981 г., № 4, 6 – в феврале 1984 г., № 5 – август 1984 г. Для приведения к единой эпохе наблюдений и получения общей картины вертикальных смещений опор гадирен суммарные смещения дополнительно вычислены относительно февраля 1981 года.

На рис.9 приведены суммарные вертикальные смещения осадочных марок гадирен по состоянию на 2007 год (относительно 1981 года).

Вертикальные деформации гадирен можно разделить на две части по признаку размещения относительно сбросного водоканала. Если гадирни 1-5 имеют отрицательные вертикальные смещения (осадку), то гадирни 6 и 7 имеют положительные вертикальные смещения, т.е. фундаменты этих гадирен

испытывают поднятия. Отрицательные вертикальные смещения фундаментов градирен 1-5 примерно равномерны, если исключить отдельные случайные «выбросы» (Гр.№1 – м.7/139, -30,6 мм, Гр.3 – м.2/157, -20,2 мм и др.), средние осадки составляют – 8 - 12 мм с креном в направлении поймы реки. Поднятия фундаментов градирен 6 и 7 составляют в среднем от минус 5 до плюс 9 мм с прежним направлением крена.

Как видно, максимальные осадки реакторно-турбинного цеха блока 4 за двадцатипятилетний период (с 1981 по 2006 г.) не превышают 20 мм. За двадцатилетний период (с 1981 по 2007 г.) максимальные осадки градирни не превышают 15 мм.

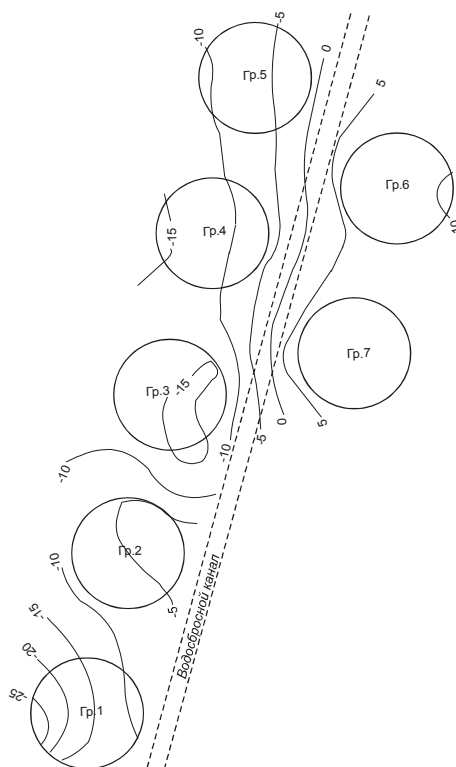


Рис.9. Изолинии вертикальных смещений осадочных марок градирен (суммарные, относительно февраля 1981 года)

Наблюдения за кренами и осадками объектов блока 4 АЭС свидетельствуют о том, что их величины находятся в допустимых пределах, а, следовательно, исходные физико-механические параметры грунтов, принятые в проекте, достаточно адекватно отражают их реальные величины.

В настоящее время вопрос о напряженно-деформированном состоянии и методах оценки ресурса прочности оснований сооружений АЭС с достаточной полнотой рассмотрен в методической и инструктивной литературе.

На современном этапе развития прикладных исследований в числе нагрузочных факторов, определяющих долговременную безопасную работу сооружений, наименее исследованными являются низкочастотные грависейсмические воздействия.

Особенностью этих воздействий является их многоцикловый характер, что дает основание для предположений о возможном наследовании и накоплении энергии нелинейных эффектов, сопутствующих этим воздействиям, что, в свою очередь, может привести к нарушению устойчивости грунтовых оснований, их эррозии, неравномерным осадкам сооружений и т.д.

В комплексе натуральных и теоретических исследований гравидинамических и грависейсмических воздействий целью данной статьи является обоснование возможности применения для их анализа расчётных моделей, включая вибродозиметрический метод оценки и мониторинга остаточного ресурса надёжности строительных конструкций и метод возмущений для линейного моделирования нелинейных аккумулятивных процессов и гистерезисных вибросейсмических явлений в грунтах оснований.

Учитывая новизну данной работы и отсутствие соответствующей нормативно-технической документации, было также необходимо представить результаты в доступной для инженерного анализа форме, например, посредством отображения результатов в единицах сейсмической опасности, в баллах по шкале Рихтера.

Для комплексного и корректного решения поставленной общей проблемы расчеты и инженерные исследования были спланированы в виде взаимосвязанной последовательности этапов и частных задач.

Исследуемая АЭС расположена на берегу реки, захватывая пойму, I и II надпойменные террасы, коренной склон.

Площадка размещения главного корпуса АЭС расположена на первой надпойменной террасе эрозионно-аккумулятивного генезиса. В естественных условиях поверхность террасы ровная, пологонаклоненная в сторону реки. В процессе строительства поверхность была спланирована.

В гидрогеологическом разрезе описываемой площадки выделяются подземные воды в четвертичных, плиоценовых и девонских отложениях чехла и в кристаллических породах фундамента.

В пределах промплощадки развиты два водоносных горизонта, а также локально встречающаяся верховодка.

Первый от поверхности водоносный горизонт приурочен к песчаным отложениям первой надпойменной террасы. Водовмещающие отложения представлены разнозернистыми песками. Мощность водоносного горизонта составляет от 4,0 до 7,3 м, в среднем – 6,0 м. Подземные воды безнапорные. В естественных условиях поверхность водоносного горизонта находилась на глубинах от 1,0 м до 6,8 м.

Средняя годовая амплитуда колебаний уровня воды в пределах первой надпойменной террасы составляет 0,7 м. Максимальные значения уровня отмечались в паводковый период. По химическому составу подземные воды горизонта гидрокарбонатные, кальциевые с минерализацией от 0,1 до 0,3 г/л.

Второй водоносный горизонт развит повсеместно. Водовмещающими породами являются трещиноватые известняки. Мощность водоносного горизонта составляет от 5 до 18 м.

Горизонт напорный, величина напора достигает от 9,0 до 10,5 м. Верхним водоупором служит толща глин. Коэффициент фильтрации – от 0,5 до 30,5 м/сут. По химическому составу подземные воды второго горизонта гидрокарбонатные, кальциевые.

Площадка, на которой размещаются сооружения главного корпуса АЭС, представляет собой спланированную территорию с системой регулирования поверхности стока, поэтому здесь практически отсутствуют условия для естественной активизации экзогенных процессов.

В процессе изысканий поверхностных карстовых и суффозионных форм в пределах промплощадки выявлено не было.

Крупных карстовых пустот в известняках не обнаружено.

Известняк на большей части территории перекрыт достаточно мощным (от 2,5 до 6,0 м) слоем водоупорных пород - глинами и глинистым элювием.

Таким образом, анализ геологического строения и гидрогеологических условий площадки размещения главного корпуса исследуемой АЭС показал, что на рассматриваемой территории отсутствуют условия для развития экзогенных геологических процессов, могущих создать опасность для сооружений АЭС.

Данные инженерно-геологических изысканий на площадке АЭС представлены в таблице 1.

Стабильность грунтов площадки при динамических нагрузках не определялась.

По результатам инженерно-геологических изысканий за период с 1966 по 1996 год не отмечено изменение физико-механических параметров грунтов основания, могущее повлиять на устойчивость сооружений.

Схема размещения фундамента ограждения и турбоагрегатов турбинного цеха исследуемой АЭС приведена на рис. 10

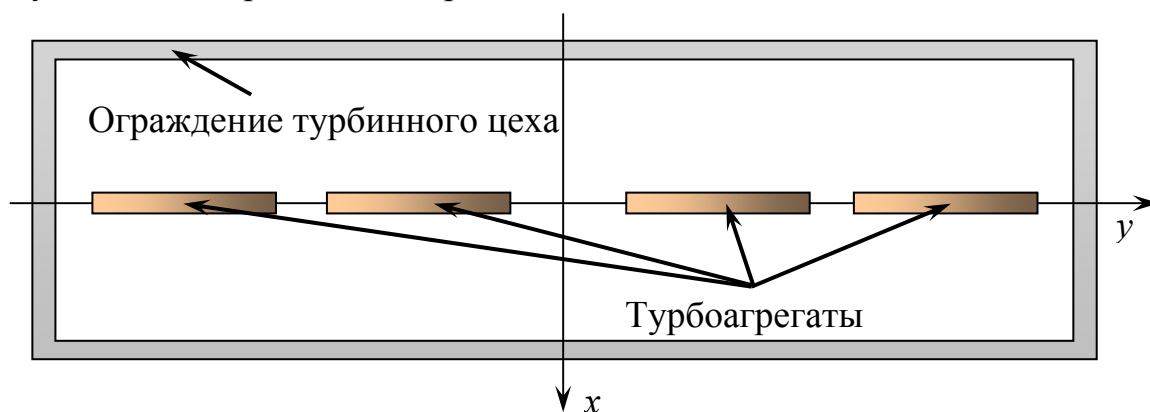


Рис. 10. Схема размещения турбоагрегатов

Таблица 1.

Нормативные показатели физико-механических свойств грунтов площадки 3 - 4 блоков																																	
Номер ИГЭ	Наименование грунта	Влажность, W д.е	Физические свойства																	Прочностные и деформационные свойства													
			Плотность, ρ г/см ³					Коэффициент пористости, e (%)	Степень влажности, S _r	Коэффициент фильтрации K _ф м/сут	Влажность W д.е		Число пластичности I _p д.е	Показатель текучести, I _L	Набухание, %	Гранулометрический состав, %								Степень неоднородности, C _u	R _c , МПа		tgφ	Удельное сцепление C, кПа	Угол внутреннего трения, φ град	Модуль деформации E, МПа			
			Плотность, в предельно рыхлом состоянии γ _{рх}	Плотность, в предельно плотном состоянии γ _{пл}	Плотность грунта, γ	Плотность сухого грунта, γ _d	Плотность частиц грунта, γ _s				На пределе текучести, W _L	На пределе пластичности, W _P				>5 мм	5-2 мм	2-1 мм	1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,1 мм	0,1-0,05 мм	0,05-0,01 мм		0,01-0,005 мм	<0,005мм					Воздушно сухое состояние	Водонасыщенное состояние	
1	Песок пылеватый	$\frac{0,05}{0,15}$	1,37	1,8	$\frac{1,64}{1,79}$	1,56	2,65	0,7	$\frac{0,19}{0,56}$	10							2	5,6	5	21,9	15,8	38	4,3	3,8	3,7	2,8			0,56	0	30	30	
	Песок мелкий	$\frac{0,05}{0,15}$	1,38	1,81	$\frac{1,64}{1,79}$	1,56	2,65	0,68	$\frac{0,19}{0,56}$								5,8	10,6	1,1	28	55,3	12,3	1,4	1,1	0,8	-							
	Песок средней крупности	$\frac{0,05}{0,15}$	1,36	1,8	$\frac{1,66}{1,82}$	1,58	2,65	0,68	$\frac{0,19}{0,56}$								4,6	8,5	10,5	26,3	33,2	7,7	1,1	1,4	3,5	4,6							
	Песок крупный	$\frac{0,05}{0,15}$	1,36	1,78	$\frac{1,66}{1,82}$	1,58	2,65		$\frac{0,19}{0,56}$											50	16	10	7,6	1,2	1,4	0,8	3,7						
2	Суглинки (прослой)	0,19			2,11	1,77	2,71	0,53	0,47			0,32	0,16	0,16	0,16															0,4	50	22	20
	Супеси (прослой)	0,2			2,3	1,91	2,68	0,4	1			0,19	0,16	0,03	0,56															0,4	50	22	20
3	Глина	0,15			2,14	1,86	2,72	0,46	0,88			0,37	0,17	0,2	>0	16,4	0,1	0,2	0,7	6,4	14,2	15	18	17,2	28,5	16,4			0,29	170	16	6	
	Глина опесчаненая	0,16			2,12	1,83	2,69	0,47	0,92			0,31	0,15	0,16	0,06	15,1		0,5	0,7	1,4	37,9	11,2	11,7	12,5	24,6								
	Пески пылеватые (прослой)	0,16	1,14	1,44														0,5	13,4	53,6	10,9	6,5	3,5	8,6									
	Песок мелкий (прослой)		1,13	1,49			2,67											0,5	13,4	64,5	4,8	4,2											
4	Глина опесчаненая	0,18			2,01	1,74	2,72	0,58	0,9			0,34	0,18	0,16	0,06				2	4,2	17,3	16,8	7,5	10	42,2				0,35	136	19	8,7	
5	Глина опесчаненая	0,21			2,02	1,69	2,74	0,63	0,9			0,4	0,25	0,16	<0				1,1	8,2	12,7	16,6	9,5	48,9				0,16	138	9	11		
6	Известняки трещиноватые				2,5			10																		100	90						

Дробью дано значение параметра: в числителе - в зоне аэрации; в знаменателе - в зоне полного водонасыщения

Анализ спектральной плотности микросейсм и форм колебаний строительных конструкций исследуемой АЭС показал, что в спектре микросейсм отчетливо выделяется более 10 резонансных компонент, а максимум плотности достигается на доминирующей частоте около 12 Гц. Основной вибросейсмической модой возбуждения основания площадки является продольная.

Эквивалентная схема для моделирования вибросейсмического взаимодействия фундамента и основания, приведенная на рис.11, составлена путем комплексирования элементарных источников продольных сейсмических волн на подошве фундаментных блоков каждого турбоагрегата.

Таблица 2

Динамические характеристики грунтов площадки 4 блока АЭС							
Наименование грунта	Интервала глубин, м	Плотность грунта ρ , г/см ³	Скорость продольных волн V_p , м/с	Скорость поперечных волн V_s , м/с	Динамический модуль упругости E_d , МПа	Динамический модуль сдвига G , МПа	Коэффициент Пуассона
Маловлажные пески	≤ 8	1,65	400	180	115	53	0,37
Водонасыщенные пески	8-14	1,82	1500	600	1404	671	0,39
Глины	14-17,5	2,07	1200	450	1160	414	0,41
Известняки	$\geq 17,5$	2,53	2400	1250	10500	4048	0,31

Анализ спектральной плотности микросейсм и форм колебаний строительных конструкций исследуемой АЭС показал, что в спектре микросейсм отчетливо выделяется более 10 резонансных компонент, а максимум плотности достигается на доминирующей частоте около 12 Гц. Основной вибросейсмической модой возбуждения основания площадки является продольная.

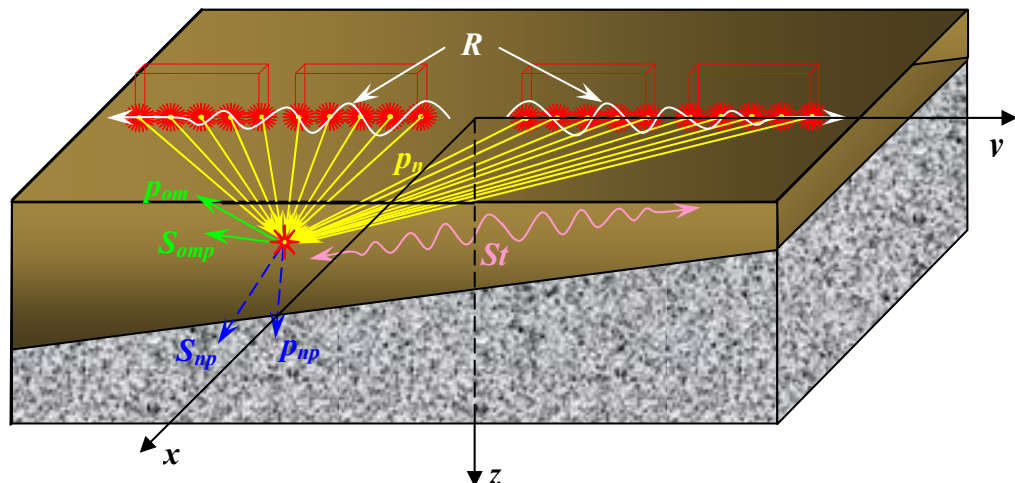


Рис.11. Эквивалентная схема моделирования вибросейсмического взаимодействия фундамента и основания

При моделировании вибросейсмического взаимодействия фундамента и основания, приведенной на рис.7, учитывалась что ограждение турбинного корпуса, реакторного здания АЭС и турбоагрегаты имеют отдельные фундаменты.

При моделировании и при построении эпюр в главной вертикальной плоскости турбинного корпуса и в плоскости первой сейсмически контрастной границы пластов использовались трехмерные расчетные сетки. Результаты расчетного моделирования получены в виде эпюр распределения интенсивности рисков.

Эпюр, полученный для плоскости первой сейсмически контрастной границы пластов, приведен на рис.12.

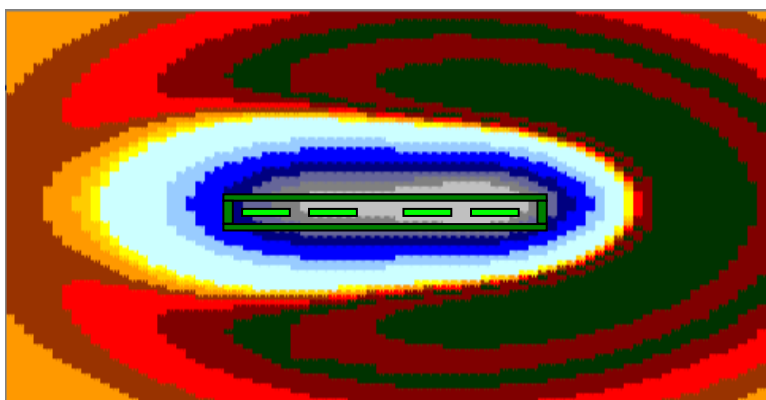


Рис.12. Эпюр распределения интенсивности рисков нормальных напряжений от действия продольных волн на первой границе пластов грунта основания

На рис.13 и 14 представлены эпюры распределения интенсивности рисков нормальных напряжений в проекциях на оси координат в двух вертикальных взаимно перпендикулярных плоскостях.

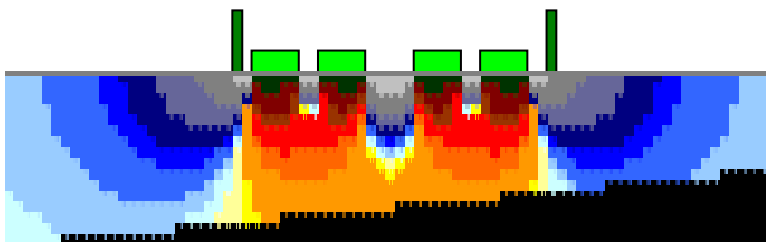


Рис.14. Эпюр распределения интенсивности рисков проекции нормальных напряжений на ось y от действия продольных волн в плоскости Oyz

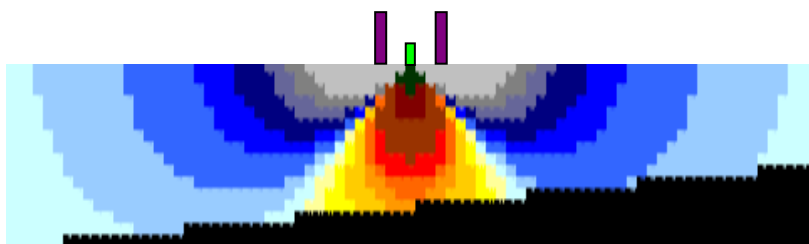


Рис.15. Эпюр распределения интенсивности рисков проекции нормальных напряжений на ось x от действия продольных волн в плоскости Oxz

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что помимо неравномерной осадки следует ожидать общего крена конструкции корпуса влево с одновременной реализацией оползневых процессов скольжения корпуса вдоль направления падения границы пластов.

Однако указанные деформационные процессы в основании и конструкции могут быть усилены не только геодинамическими (механическими) резонансами, но и за счет нарушения естественных геозеологических процессов.

В зонах максимального уплотнения грунтов (зоны эпюры темнозеленой и серой заливки) существенно уменьшится коэффициент фильтрации грунтов, в связи с чем реальны риски внутрипластовой водной эрозии и сноса мелких фракций грунтов на периферию расчетного объема основания, что автоматически нарушит проектный режим стабилизации его НДС.

Кроме того, в зонах виброрейсмического уплотнения повысится уровень капиллярной каймы с последующим нарушением естественного режима увлажнения грунтов и неравномерным вспучиванием глинистых включений.

На основании полученных результатов можно выполнить расчет дополнительных сверхпроектных напряжений в строительной конструкции турбинного корпуса АЭС в результате геозеологических проявлений виброрейсмических процессов или выразить потенциальную угрозу реализации рисков через остаточную энергию нелинейного затухания (потерь) виброрейсмических волновых процессов и адекватную ей балльность в эквиваленте сейсмической опасности по шкале Меркалли или Рихтера.

Выявленные зоны повышенных геодеформационных рисков и интерпретация потенциальной возможности их реализации с достаточной степенью точности подтверждается характером и топологией реальных внешних проявлений (трещин и нарушение стабилизации осадок) ускоренного сверхпроектного износа строительной конструкции турбинного корпуса.

Использование вибродозиметрической теории рисков геозеологических проявлений в результате многоциклового воздействия виброрейсмических процессов позволяет построить наглядные и удобные для интерпретации рисков эпюры распределения интенсивности виброрейсмических напряжений в расчетном объеме основания.

Применением метода перенормировки шкал можно существенно сократить объем вычислений и затрат машинного времени как на расчеты распределения интенсивности вибросейсмических процессов, так и тривиального отображения результатов в виде энергетических и эквивалентных сейсмических оценок уровня опасности долговременного действия этих процессов.

Список использованных источников:

- [1] Жуковский Ю.Б. Оценка устойчивости и эксплуатационной безопасности зданий и сооружений при экспертизе проектов. -М.: ВНИИНТПИ, «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений», №3, 2000
 - [2] Хлыстунов М.С. Баллистические и поплавковые резонансы строительных объектов. -М.: МГСУ, Материалы коллоквиума, 1999
 - [3] Бреховских Л.А. Волны в слоистых средах. –М.: Наука, 1974
 - [4] Хлыстунов М.С. Геодинамическая устойчивость геологических оснований. -М.: «Сейсмостойкое строительство», №4, 2001
 - [5] Могилюк Ж.Г. и др. Геоэкологическая эффективность микросейсмических процессов в неоднородных основаниях. –М.: «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений», №3, 2003
 - [6] Хлыстунов М.С., Могилюк Ж.Г. Теория геоэкологической эффективности геодинамических резонансов АС. II-ая Научно-техническая конференция «Научно-инновационное сотрудничество». Сб. научных трудов. В 3 частях. Ч.1. –М.: МИФИ, 2003
 - [7] Хлыстунов М.С., Могилюк Ж.Г. и др. «Теория геоэкологической эффективности геодинамических резонансов АС» Межотраслевая научная конференция, -М.: МИФИ, 2003
 - [8] Могилюк Ж.Г. Исследование и расчёт интенсивности микросейсмических проявлений в неоднородных основаниях зданий и сооружений. Научно-техническая конференция по итогам НИРС МГСУ, март 2003
 - [9] Могилюк Ж.Г., Карева О.В., Тыщенко А.А., Исаев Р.З. Компьютерное моделирование зон повышенных геоэкологических рисков в основании турбинного корпуса. Студенческая конференция МГСУ, март 2004
 - [10] Могилюк Ж.Г., Денисов А.В. и др. Компьютерное эмулирование геоэкологических рисков в неоднородных основаниях АС. Межотраслевая научная конференция, -М.: МИФИ, 2004
 - [11] Ковалевич О.М., Могилюк Ж.Г. и др. Исследования локальных геотехнических рисков при неравномерном вибросейсмическом возбуждении оснований АС. Межотраслевая научная конференция, -М.: МИФИ, 2004
-

