

ЛИВШИЦ Б.Р.

ПАО «ЦКБ «Коралл»
г. Севастополь, Украина

УДК 624.04.26

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ САМОПОДЪЕМНЫХ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК (СПБУ)

Ключевые слова: плавучая буровая установка, линейно-спектральный метод, прямой динамический метод.

В статті розглядаються основні підходи до визначення відгуку СПБУ на сейсмічний вплив, заданий прискоренням ґрунту.

В статье рассматриваются основные подходы к определению отклика СПБУ на сейсмическое воздействие, заданное ускорением грунта.

In the article we research the basic approaches to defining the response of the MODU to the seismic activity, determined by soil acceleration.

При оценке сейсмостойкости самоподъемных плавучих буровых установок (СПБУ) проектировщики должны использовать рекомендации ДБН В.1.1-12:2006 «Строительство в сейсмических районах Украины» [1], в соответствии с которыми подобные сооружения могут рассматриваться как гидротехнические. Для оценки возможен расчет в соответствии с линейно-спектральной теорией или с применением динамического метода.

Значения спектрального коэффициента динамичности β_p , зависящие от категории грунта по сейсмическим свойствам и от периода i -го тона собственных колебаний сооружения, определяются по графикам (рис. 1).

Линейно-спектральный метод

В расчетах сооружений по линейно-спектральному методу материалы сооружения и основания считаются линейно-упругими. Сейсмическое ускорение основания задается постоянной во времени векторной величиной, модуль которой определяется по формуле:

$$\left| \ddot{U}_0 \right| = k_A \cdot g \cdot a_0, \quad (1)$$

где a_0 - расчетная амплитуда ускорения основания (в долях g), определенная с учетом реальных грунтовых условий на площадке строительства для землетрясений с периодом повторяемости $T_{повт}^{норм}$; k_A - коэффициент, учитывающий вероятность сейсмического события в течение назначенного срока службы сооружения $T_{сл}$, а также переход от нормативного периода повторяемости $T_{повт}^{норм}$ к периоду повторяемости, принятому для ПЗ или МРЗ; g - ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$).

Спектральный метод расчета СПБУ на сейсмические воздействия хотя и является одним из основных, применяется на начальном этапе проектирования. По спектральному методу определяются преобладающие периоды колебаний, по которым выбирается акселерограмма для последующего применения динамического метода расчета.

При расчете спектральным методом расчетное ускорение как для грунтов III категории должно быть принято $a \sim 2 \text{ м/с}^2$ для нормированной сейсмичности площадки $I^{норм} = 7$ баллов и $a \sim 4$ и 5 м/с^2 для нормированной сейсмичности площадки $I^{норм} = 8$ и 9 баллов соответственно.

С учетом того, что срок службы СПБУ составляет около 30...35 лет коэффициент k_A может быть принят 0,66 для воздействия уровня ПЗ и 0,85 для воздействия уровня МРЗ.

Смотри рисунок 1, на стр. 2 обложки

Прямой динамический метод

Для уточнения отклика, определенного по спектральному методу должен быть проведен прямой динамический расчет. Прямой динамический расчет СПБУ выполняется с использованием расчетных акселерограмм $a_i(t) = A_i y_i(t)$, где i - номер составляющей вектора колебаний; A_i - максимальное значение амплитуды ускорений; $y_i(t)$ - нормированная на единицу функция, описывающая колебание грунта во времени. При проектировании нетиповых и ответственных сооружений в прямых динамических расчетах допускается использование синтезированных расчетных акселерограмм, построенных с учетом условий площадки и ее положения, относительно опасных сейсмогенных зон.

При проведении прямых динамических расчетов с использованием набора синтезированных акселерограмм в качестве расчетных принимаются акселерограммы, преобладающие периоды которых близки к периодам собственных колебаний СПБУ по первой форме. Значения сейсмических нагрузок, перемещений и деформаций конструкций должны быть определены с учетом особенностей нелинейного деформирования. При прямых динамических расчетах системы «основание – башмак СПБУ – корпус СПБУ с колоннами» рекомендуется принимать экспериментальные значения логарифмических декрементов колебаний грунта и конструкций.

Сейсмическое ускорение основания задается расчетной акселерограммой землетрясения, представляющей собой в общем случае функцию ускорения колебаний во времени $\ddot{U}(t)$. При этом смещения (деформации, напряжения и усилия) определяются на всем временном интервале сейсмического воздействия на сооружение. Расчет на ПЗ производится, как правило, с применением линейного временного динамического анализа, а на МРЗ - нелинейного или линейного временного динамического анализа (в зависимости от предварительной оценки).

Временной динамический анализ (линейный и нелинейный) производится с применением пошагового интегрирования дифференциальных уравнений, линейный динамический анализ допускается выполнять также методом разложения решения в ряд по формам собственных колебаний.

Значения максимального пикового ускорения в основании сооружения $a_n = \text{Max}|\ddot{U}_o(t)|$ должны быть не меньше ускорений, определяемых по соответствующей расчетной сейсмичности площадки для района установки СПБУ.

При выполнении динамического анализа СПБУ учитываются параметры затухания ζ , установленные на основе динамических исследований поведения сооруже-

ний при сейсмических воздействиях.

Рис. 2 демонстрирует, что запись ускорения грунта используется как входные данные, а общее ускорение в центре масс эквивалентно ускорению грунта плюс ускорению центра масс относительно движущегося основания. Сила инерции в центре тяжести определяется как масса, умноженная на суммарное ускорение.

Уравнение движения выглядит так [2]:

$$m[\ddot{u}_g(t) + \ddot{u}_r(t)] + c\dot{u}_r(t) + ku_r(t) = 0 \quad (2)$$

Демпфирующая сила вязкого трения в системе является функцией скорости движения верхней части относительно основания. Третий член уравнения дает реакцию (силу), зависящую от жесткости конструкции.

$$m\ddot{u}_r(t) + c\dot{u}_r(t) + ku_r(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

Поделив на m и выполнив замену $\frac{c}{m} = 2\zeta\omega$ и $\frac{k}{m} = \omega^2$, получим эквивалентное выражение с нулем в части, отвечающей за спектр ответа, которое показывает состояние системы в любой точке во времени.

Если расположить выражение, отвечающее за силу инерции от ускорения грунта в правой части, то все остальные силы, зависящие от ускорения, скорости и перемещения в левой. Это уравнение решается в виде отклика на перемещение грунта.

Упрощенный вид уравнения:

$$\ddot{u}_r(t) + 2\zeta\omega\dot{u}_r(t) + \omega^2 u_r(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (4)$$

Реакция любой упругой системы на компоненты воздействия может быть рассчитана путем суперпозиции параметров реакции на каждую отдельную компоненту. То есть, задача расчета сводится к стандартному определению реакции платформы при одном поступательном воздействии.

Вынужденные колебания СПБУ как механической системы с течением времени затухают. Причиной служат процессы, сопровождающие упругие колебания:

- трение в узлах соединения опорных колонн и корпуса;
- отступления от идеальных условий деформирования конструкции;
- взаимодействие башмаков с грунтом;
- взаимодействие колеблющейся системы с внешней средой (воздух, жидкость);
- наличие в корпусе СПБУ резервуаров (цистерн) с жидкостью.

Различные виды сопротивлений колебаниям СПБУ как системы условно можно разделить на две категории — внутреннее сопротивление (трение), связанное со свойствами материала и конструкции, и внешнее сопротивление. Применительно к СПБУ учет внутреннего сопротивления колебаниям может быть проведен с применением гипотезы В. Фойгта - вязкоупругого деформирования материала (частотно независимый).

Возможность применения гипотезы вязкого трения приводит к тому, что декремент колебаний линейно зависит от частоты т.е. гипотеза вязкого сопротивления дает эффект частотно-зависимого внутреннего трения. Многочисленные эксперименты показали следующие основные положения, которые легли в основу теории неупругого поглощения энергии колебаний, применимых к анализу динамики СПБУ:

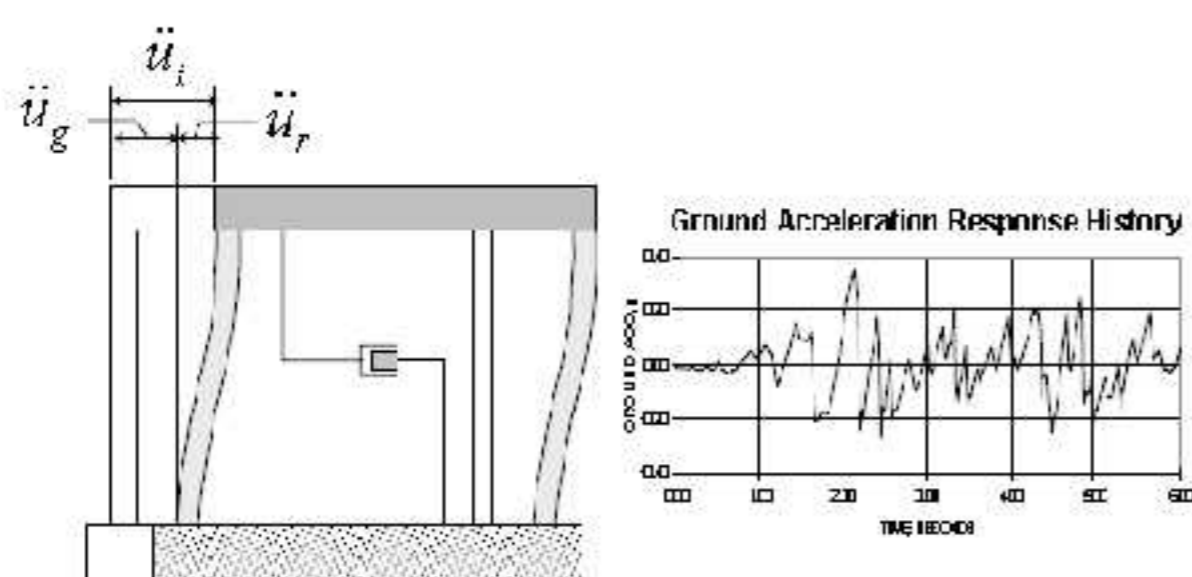


Рис. 2. Динамическая схема

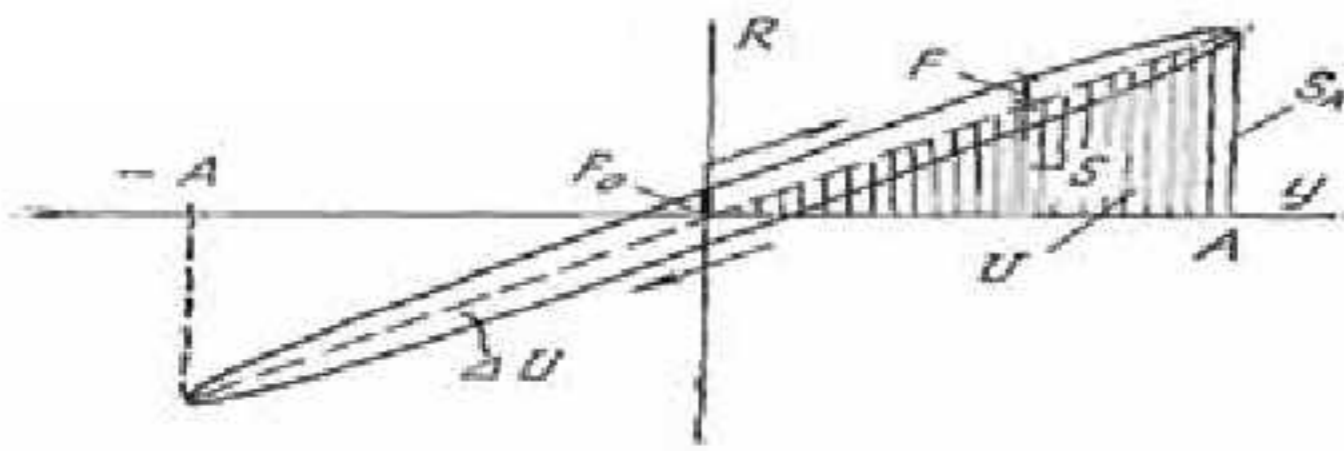
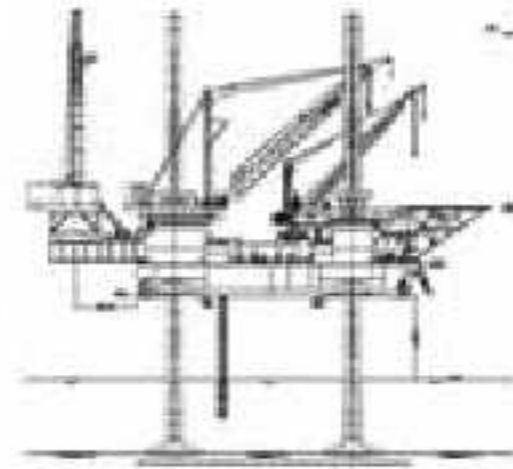


Рис. 3. Гистерезисная петля



$K=41.1 \text{ kips/in}$ $M=15880 \text{ kips}$

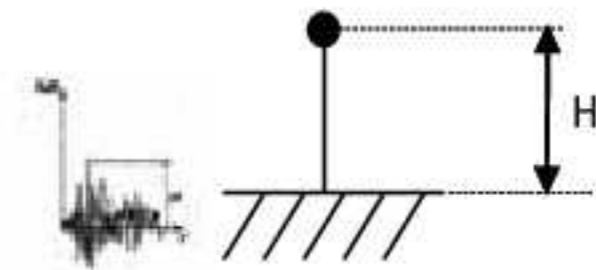


Рис. 5. Расчетная схема

- а) при установившемся циклическом изменении перемещения u в пределах (рис. 3) зависимость между силой R и перемещением u неоднозначна и полному циклу соответствует замкнутая петля.
- б) суммарная сила R может быть представлена в виде суммы упругой силы S и силы неупругого сопротивления F :

$$R=S+F. \quad (5)$$

Качественная разница состоит в том, что в отличие от гипотезы Фойгта сила неупругого сопротивления F не связана с вязкостью и практически не зависит от скорости нагружения - разгрузки, т. е. от частоты колебаний. Учет диссипации энергии в динамических расчетах представлен на рис. 4.

Проведем сопоставление расчетов, выполненных по двум вышеуказанным методам для воздействия уровня МРЗ, для чего в качестве примера рассмотрим СПБУ, установленную в зоне с сейсмической активностью 8 баллов (проект ЦКБ Коралл, г. Севастополь). Схема представлена на рис. 5. Расчет по линейно-спектральной теории дает расчетное ускорение грунта:

$$\left| \ddot{U}_0 \right| = k_A \cdot g \cdot a_0 = 0,85 \times 9,81 \times 0,4 = 3,33 \text{ м/с}^2,$$

а максимальное перемещение массы составляет 487 мм. Период колебаний СПБУ при этом составляет $T=1,1 \text{ с}$.

Расчет методом динамической теории выполнен с использованием программы BISPEC [3] (проведен расчет на акселерограммы при демпфировании 2%, 5% и 8%). Итоговый результат получен путем подбора и анализа акселерограмм, включающих несущую частоту, которая вызывает максимальный отклик конструкции. Пиковое перемещение составляет 737 мм при характерном для СПБУ демпфировании 5%, что в 1,5 раза больше, чем определенное линейно-спектральным методом.

ВЫВОДЫ:

Для сооружений типа СПБУ для выявления максимального отклика необходимо после расчета по линейно-спектральному методу проводить расчет динамическим методом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРИ

1. Будівництво у сейсмічних районах України : ДБН В.1.1-12:2006. – К.: Мінбуд України, 2006.– 84 с.
2. Structural Dynamics of Linear Elastic Single-Degree-of-Freedom (SDOF) Systems Instructional Material Complementing FEMA 451, Design Examples]. – Режим доступа: <http://www.nibs.org/client/assets/files/bssc/Topic03-StructuralDynamicsofSDOFSystems.pdf>
3. Mahmoud M.Hachem. Bispec Help Manual. Version 1.0 [Электронный ресурс] / Mahmoud M.Hachem. – Режим доступа : <http://eqsols.com/Bispec.aspx>

**РИСУНКИ К СТАТЬЕ КОРНЕВА Н.Г., ДАНИЛОВА Т.И.
«О СОЗДАНИИ ЕДИНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ (ЕИС) «СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТЬ РОССИИ»**

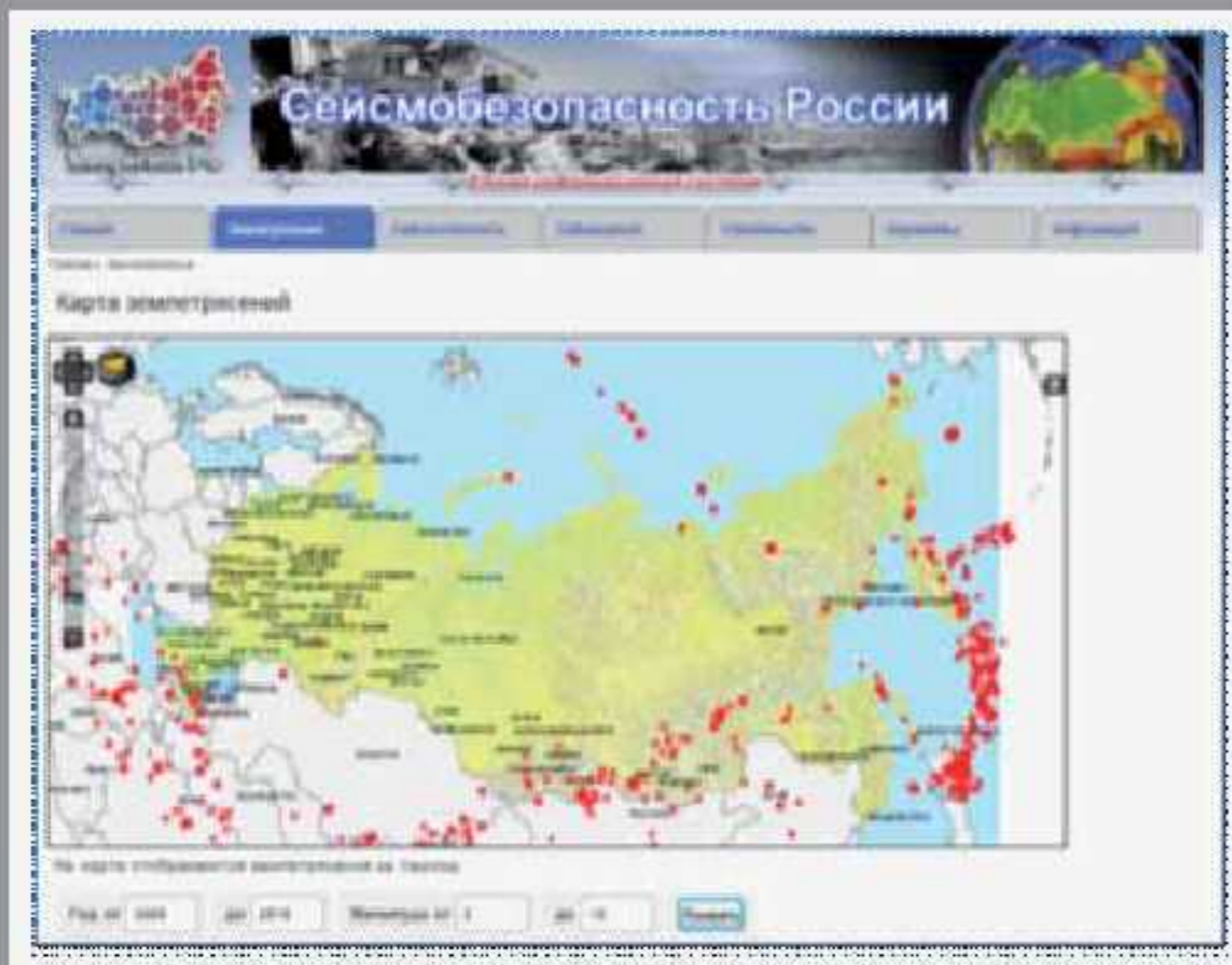


Рис. 1. Страница информационной системы (ЕИС) «Сейсмобезопасность России». Карта землетрясений



Рис. 2. Страница информационной системы (ЕИС) «Сейсмобезопасность России». ЛДФ-модель зон ВОЗ 97*

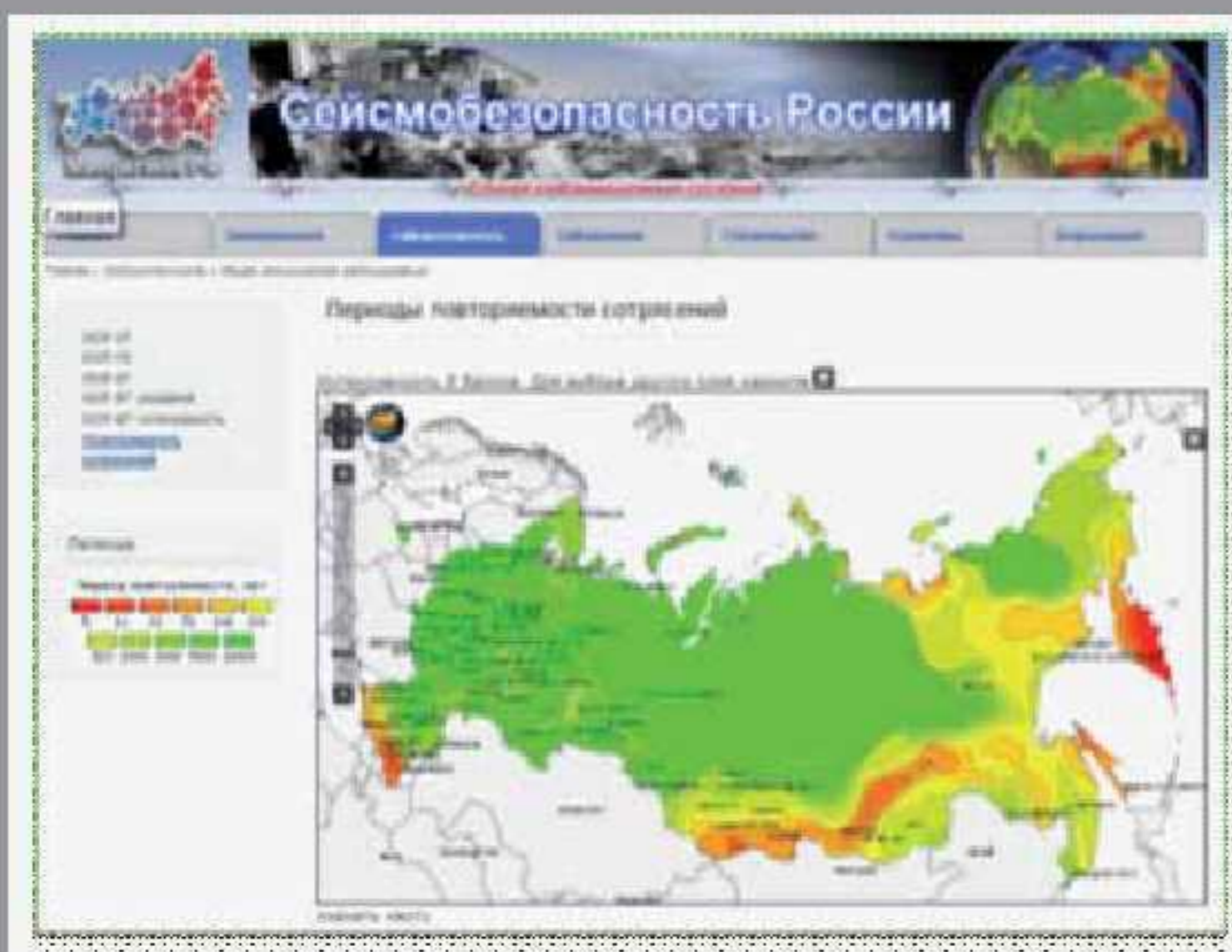


Рис. 3. Страница информационной системы (ЕИС) «Сейсмобезопасность России». Периоды повторяемости сотрясений

**РИСУНКИ К СТАТЬЕ ЛИВШИЦ Б.Р.
«ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ САМОПОДЪЕМНЫХ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК (СПБУ)»**

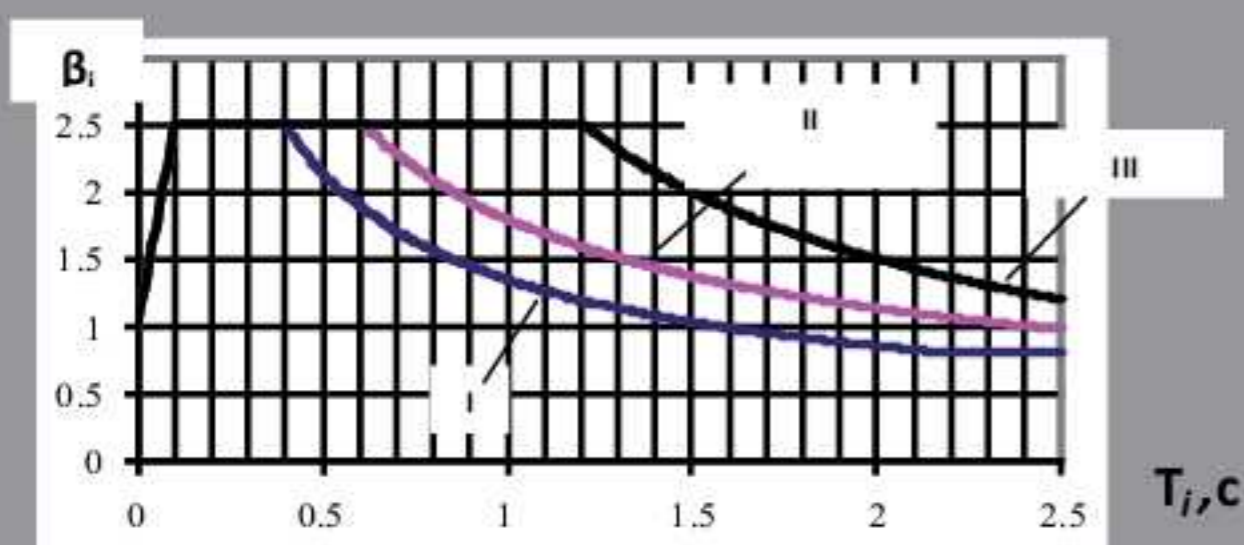


Рис. 1. Значения спектрального коэффициента динамичности β_i , в зависимости от категории (I-III) грунта по сейсмическим свойствам

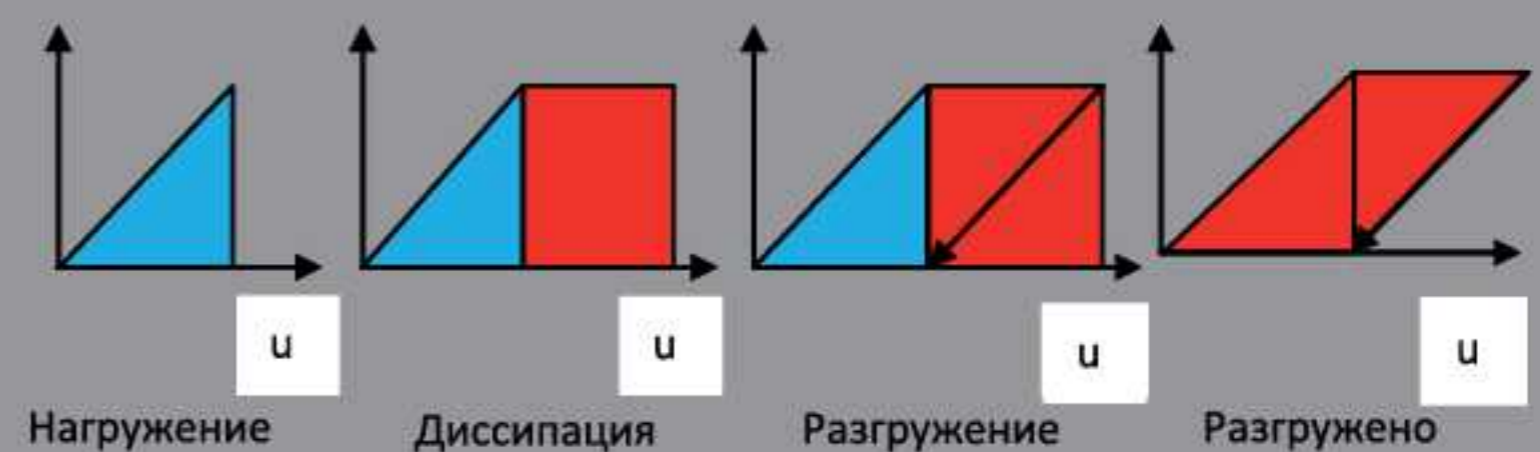


Рис. 4. Принцип учета диссипации энергии при расчете СПБУ