

## СРАВНЕНИЕ ДВУХ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО АГРЕГАТА

**А.В. Соболев\*, П.А. Данилов\*, А.С. Зевякин\*, С.В. Курков\*\***

\* *Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ»*

*249040, Обнинск, Калужская обл., Студгородок, д. 1*

\*\* *ООО НТП «ДИП»*

*192071, Санкт-Петербург, ул. Будапештская, д. 38, корп. 2*



Рассматривается расчетный анализ сейсмостойкости легкого оборудования АЭС на примере вентагрегата двумя наиболее распространенными методами: линейно-спектральным и методом прямого динамического анализа.

Приводятся основные положения, допущения и ограничения линейно-спектрального метода. Даются примеры расчетных случаев, когда данный метод в общепринятой постановке неприменим. В частности, при расчете протяженных пространственных конструкций следует учитывать разность фаз и, возможно, ускорений (перемещений) для удаленных друг от друга граничных условий. Другой пример – резервуары с жидкостью, имеющие неполное заполнение. Здесь могут формироваться волны жидкости, и их учет невозможен в линейно-спектральном методе.

Рассмотрены особенности использования метода динамического анализа – необходимые исходные данные, подходы и методики к синтезу расчетных акселерограмм. Приводится последовательность операций при синтезе расчетных акселерограмм, указаны материалы, в которых описаны математический аппарат для вывода конечных математических соотношений для расчета спектров ответа и расчетные соотношения. Описываются смысл коэффициента демпфирования, его влияние на результаты расчетов и подходы к его определению. Обсуждаются варианты полного отсутствия демпфирования и абсолютного демпфирования.

Для тестовой модели оборудования использован реальный радиальный вентагрегат, применяемый в системах спецвентиляции АЭС. Приводятся результаты расчета для разработанной в программном комплексе «Зенит-95» детальной конечно-элементной модели вентагрегата – распределение расчетных приведенных напряжений, полученных линейно-спектральным методом и методом прямого динамического анализа. Анализ результатов, полученных двумя методами, показал, что линейно-спектральный метод завышает приведенные расчетные напряжения в сравнении с методом динамического анализа, т.е. занижает стойкость оборудования к сейсмическому воздействию. Кроме того, динамический метод показывает дополнительные области вентагрегата, где реализуются значимые приведенные напряжения, в то время как линейно-спектральный метод оставляет эти области без внимания.

**Ключевые слова:** сейсмостойкость, линейно-спектральный метод, метод динамического анализа, приведенные напряжения, акселерограмма, конечно-элементная модель.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к конструкции оборудования и трубопроводов АЭС и других объектов использования атомной энергии включают в себя требования к сейсмостойкости [1]. В зависимости от влияния на безопасность выделяют три категории сейсмостойкости, самая высокая из которых первая. Так для первой категории сейсмостойкости оборудование (корпус реактора, стеллажи бассейна выдержки, циркуляционные насосы контура теплоносителя, элементы системы вентиляции и др.) должно сохранять работоспособность при прохождении землетрясения, падения самолета, воздействии воздушной ударной волны. При этом должны рассматриваться ситуации наложения каждого из рассматриваемых воздействий на условия нормальной эксплуатации вместе с наложением условий проектной аварии (например, разрыв контура теплоносителя). Все это позволяет обеспечить требуемые показатели безопасности конкретной реакторной установки. Однако в отношении методов анализа сейсмостойкости существует ряд неопределенностей и допущений, значительно влияющих на результат.

Непосредственный интерес представляет сравнение результатов анализа сейсмостойкости легкого оборудования двумя наиболее распространенными методами. Если говорить о тяжелом оборудовании, то в работах [2 – 4] показано, что результаты расчета линейно-спектральным методом завышают действительные нагрузки, а значит, занижают сейсмостойкость на 20 – 40%. Будет ли такая же картина для оборудования, нагруженного только собственным весом, величина которого невелика? Это основной вопрос, который рассматривается в статье. Кроме этого, коротко рассматриваются сопутствующие вопросы, включая синтез акселерограмм сейсмического воздействия.

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

В настоящее время получили наибольшее распространение два метода расчета: метод прямого динамического анализа и линейно-спектральный метод. Существуют и другие, менее распространенные методы, например, приведенный в [5].

Первый из указанных методов предполагает решение дифференциального уравнения, описывающего перемещения точки методами численного интегрирования [6].

$$\mathbf{M} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} + \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} + \mathbf{R} = -\mathbf{M} \frac{\partial^2 \mathbf{X}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  – матрицы масс и демпфирования;  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{X}$  – векторы перемещения узлов системы (степеней свободы) и опор;  $\mathbf{R}$  – вектор реакций;  $t$  – время.

В современной практике приведенную систему уравнений решают с использованием метода конечных элементов для поиска пространственного распределения перемещений и других искомым функционалов. В качестве исходных данных для решения (1) используются данные о перемещениях при прохождении сейсмического воздействия ( $\mathbf{X}(t)$  – зависимость перемещений опор от времени). Однако наиболее часто используются акселерограммы ускорений – зависимость ускорений на опорах от времени. При этом вводится несколько важных предположений: каждая опора ведет себя как единое жесткое тело [7] при использовании акселерограмм ускорений, ускорения от опор транслируются мгновенно на всю анализируемую конструкцию.

Демпфирование (рассеивание энергии) задается в матрице демпфирования и во многом определяет результаты расчетного анализа. Действующие нормативы реко-

мендуют задавать величину коэффициента демпфирования для всех элементов и конструкционных узлов 2%. Важно, что результаты расчетного анализа во многом определяются коэффициентом демпфирования. Если задать его нулевым, вся энергия, сообщаемая сейсмическим воздействием, сохраняется в анализируемой конструкции (т.е. тратится на перемещения ее элементов). Наряду с рассеиванием энергии демпфирование определяет сдвиг собственных частот, а это существенно.

Расчет коэффициента демпфирования – отдельная сложная задача, решению которой, в частности, посвящены работы [8 – 10]. Следует отметить, что демпфирование принято представлять как сумму упругой и неупругой составляющих [11, 12].

Метод прямого динамического анализа реализован в большинстве расчетных комплексов. Этот инструмент анализа сейсмостойкости позволяет учитывать любые типы нелинейности анализируемой конструкции. Примерами нелинейности могут служить всевозможные контакты [13, 14], пластические деформации, допустимые перемещения элементов (например, вращение колеса), учет влияния волн жидкости [15]. Полученные результаты относительно легко интерпретируются и укладываются в представление о физике процессов. Однако одним из самых главных недостатков данного метода является необходимость затрат значительно больших вычислительных ресурсов.

Линейно-спектральный метод в настоящее время самый распространенный. Он широко применяется как за рубежом, так и в России и в общих чертах является симбиозом динамического анализа и квазидинамического. Общность с квазидинамическим методом заключается в расчете сейсмических инерционных нагрузок  $s_j$ , которые прикладываются в центры масс  $m_j$  рассматриваемой системы. Затем конструкция рассчитывается на действие инерционных сил  $s_j$ , приложенных к анализируемой системе статически. Динамика конструкции учитывается при определении нагрузок  $s_j$ , нахождение которых является основным элементом анализа сейсмостойкости.

Сейсмическое воздействие определяется по каждой форме колебаний соотношением

$$s_{ij} = m_{ij} \cdot \eta_{ij} \cdot w_j, \quad (2)$$

где  $s_{ij}$  – сейсмическая нагрузка по  $j$ -ой форме колебаний, действующая на массу  $m_{ij}$ ;  $\eta_{ij}$  – коэффициент собственной формы, учитывающий проекцию собственной формы на текущую координатную плоскость;  $w_j$  – ускорение для  $j$ -ой формы по спектрам ответа креплений конструкции. В строительных правилах вместо ускорения, определенного по спектру, используется произведение ускорения свободного падения на коэффициент динамичности, зависящий от периода колебаний по  $j$ -ой форме  $T_j$ , коэффициента неупругого сопротивления  $\gamma_j$  и вида воздействия (расчетной акселерограммы основания).

Формула (2) выводится из уравнения колебаний произвольной многомассовой системы. Главным предположением при ее выводе служит малое влияние демпфирования на связь форм колебаний. Это условие выполняется при рассмотрении конструкций, у которых для всех элементов коэффициент неупругого сопротивления менее 0,3.

Спектральный метод принят в настоящее время как основной в нормативных документах в строительстве [16], в том числе АЭС [1].

Несмотря на обилие допущений, заложенных в линейно-спектральный метод, эта методика удовлетворительно согласуется с результатами наблюдений. Однако в рамках данного метода существуют разные подходы к определению конечной сейсмической нагрузки по известным нагрузкам для отдельных форм колебаний [17]. По этой причине для обеспечения требуемого уровня консерватизма рекомендации [8, 18] предписывают определять конечную сейсмическую нагрузку как сред-

неквадратичную сумму нагрузок для каждого узла анализируемой системы по отдельным формам колебаний.

Главное достоинство линейно-спектрального метода – значительно меньшие затраты вычислительных ресурсов на расчеты. Часто этот метод применялся для расчета вручную, без использования вычислительной техники [19]. Недостатки метода отражены в его названии – отсутствие учета нелинейности, в частности, при растяжении и сжатии перемещения предполагаются одинаковыми, что не всегда верно.

### **АКСЕЛЕРОГРАММЫ**

Одной из проблем, возникающей при использовании динамического метода для анализа сейсмостойкости оборудования и трубопроводов, является отсутствие акселерограмм и данных о перемещениях в процессе прохождения сейсмического воздействия. Как правило, в рамках разработки проекта сейсмостойкого здания выполняются расчеты с определением сейсмических спектров ответа для разных отметок расположения оборудования. Полученные спектры сейсмического воздействия представляют собой зависимость ускорения от частоты и используются в рамках анализа сейсмостойкости оборудования линейно-спектральным методом. Получение (синтез) акселерограммы сейсмического воздействия по спектрам далеко не тривиальная задача. Можно подобрать динамику сейсмического воздействия на поверхности грунта основания на основе сопоставления геологических условий и оценки расстояния до ближайшего эпицентра землетрясения по данным сейсмических наблюдений. Однако это совершенно не применимо к заданию сейсмического воздействия на оборудование, расположенное в здании. Здесь необходимо учитывать динамику строительных конструкций. К сожалению, отечественные нормы в атомной энергетике не содержат понятных рекомендаций по синтезу акселерограмм для анализа сейсмостойкости оборудования. Единственные указания приводятся в [20], и те достаточно ограниченные.

В строительстве используется два разных подхода к получению акселерограмм сейсмического воздействия: синтез на основании пакета близких акселерограмм, зафиксированных при наблюдениях [21]; синтез акселерограммы как случайного процесса с заданным уровнем максимального ускорения основания (зависит от магнитуды землетрясения и геологических условий).

В случае использования пакета акселерограмм должны быть выполнены условия: 1) представительность акселерограмм пакета, которая заключается в том, что преобладающие периоды покрывают диапазон изменения возможных периодов сейсмического воздействия; 2) отсутствие серьезных искажений в расчетных акселерограммах; 3) учет корреляции между расчетной балльностью, амплитудой и преобладающей частотой воздействия. Синтезированная акселерограмма должна давать после интегрирования сейсмический спектр отклика, близкий к заданному в проекте.

Наряду с синтезом расчетной акселерограммы по данным пакета реальных акселерограмм распространение получил синтез с использованием генерации случайного процесса на коротком интервале времени. Еще на заре теории сейсмостойкости ее основоположники в лице профессоров Мононобе и Сюэхиро моделировали сейсмическое воздействие отрезком функции [22]  $x''(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$ . Другая распространенная модель сейсмического воздействия предложена И.Л. Корчинским [23]:  $x''(t) = A \cdot \exp(-\xi \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t)$ , где  $\xi$  – коэффициент демпфирования. Последнее соотношение учитывает только преобладающую частоту воздействия, на которой сосредоточена вся сейсмическая энергия. Для учета реального спектра сейсмического воздействия используются другие более сложные аппроксимации.

Современные методики [24, 25] предлагают синтез акселерограмм по проектно-

му сейсмическому спектру ответа в следующей последовательности: 1) генерация случайного процесса со случайными амплитудами и фазовыми сдвигами; 2) нормировка случайных амплитуд на максимальное ускорение (ускорение нулевого периода), либо заданное в проектном спектре, либо определенное по заданной магнитуде землетрясения; 3) подстройка фазовых сдвигов и амплитуд сгенерированного случайного процесса так, чтобы его спектр ответа совпадал с проектным. При этом выполняется ряд требований к дискретизации частотной полосы и временного интервала при синтезе акселерограмм [26]. Так шаг по времени не должен быть меньше 0,01 с. Методики для построения спектра ответа по акселерограмме в отечественных документах не приводятся вовсе и доступны лишь в иностранной документации [27, 28]. Следует отметить, что сами подходы и реализации к синтезу акселерограмм имеют достаточно нерешенных вопросов, часть которых опыт синтеза акселерограмм показывает, что при использовании достоверных методик основная доля машинного времени расходуется на построение расчетного спектра отклика по акселерограмме, а не на генерацию собственно акселерограммы.

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ МЕТОДОВ НА ПРИМЕРЕ КОНСТРУКЦИИ ВЕНТИЛЯТОРА ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ АЭС**

Для сравнения расчета спектральным и динамическим методами была использована конструкция реального радиального вентагрегата, применяемого в системах спецвентиляции АЭС. Расчеты выполнены методом конечных элементов на разработанной в программном комплексе «Зенит-95» [29] детальной модели вентагрегата (рис. 1). Использованный расчетный программный комплекс «Зенит-95» решает широкий спектр статических и динамических задач методом конечных элементов и имеет широкий спектр типов конечных элементов.

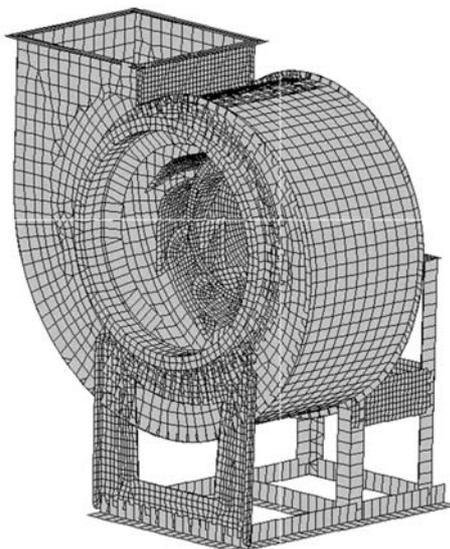


Рис. 1. Модель вентилятора

Материал модели вентилятора – сталь 3КП. Внутренний диаметр круглого фланца составляет 500 мм. Верхний фланец квадратный с внутренним размером 350 мм. Двигатель в модели представлен абсолютно жестким телом, масса которого составляет 18 кг. Двигатель соединен с рабочим колесом вентилятора при помощи вала  $\varnothing 24$  мм. Внутреннее давление не задавалось. Вентилятор жестко закреплен по

нижним узлам стойки. Соединение элементов производилось двумя способами. В первом случае части соединялись путем «сшивки» узлов, во втором – части взаимодействовали через «жесткий» контакт (аналог сварки), заданный по поверхностям соединения.

Для расчета использовались спектры воздействия реального здания АЭС в двух взаимно перпендикулярных горизонтальных направлениях и одном вертикальном. Спектр сейсмического воздействия в вертикальном направлении представлен на рис. 2. Спектр для горизонтальных направлений отличен от приведенного на рис. 2, но из-за громоздкости не приводится. Для синтеза расчетных акселерограмм, соответствующих выбранным спектрам, были использованы современные методики, описанные в [30]. Синтезированная акселерограмма сейсмического воздействия в вертикальном направлении показана на рис. 3. Акселерограммы для двух вертикальных направлений отличны от представленной на рис. 3, но здесь также не рассматриваются.

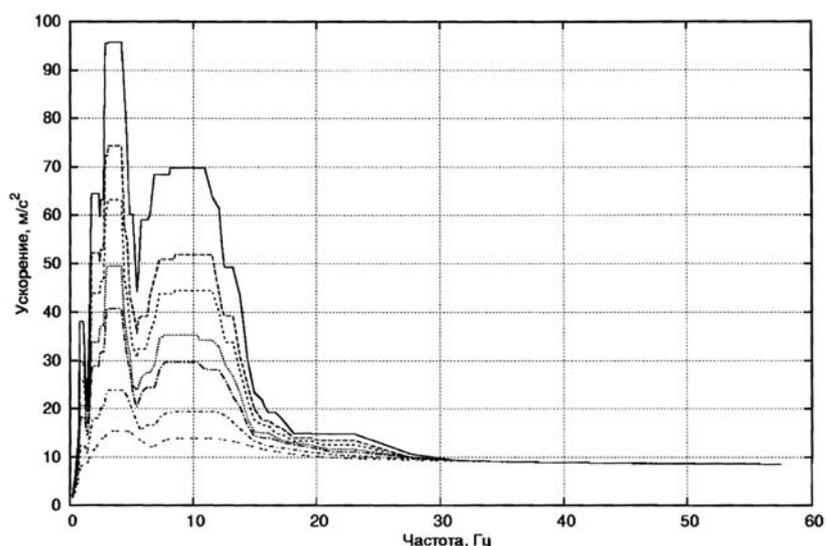


Рис. 2. Проектный спектр сейсмического воздействия. Вертикальный компонент

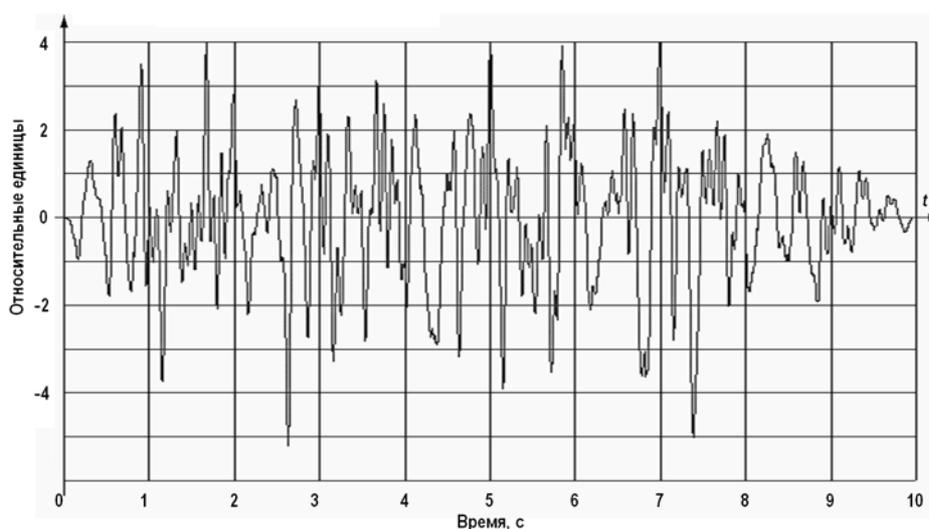


Рис. 3. Синтезированная акселерограмма сейсмического воздействия. Вертикальный компонент

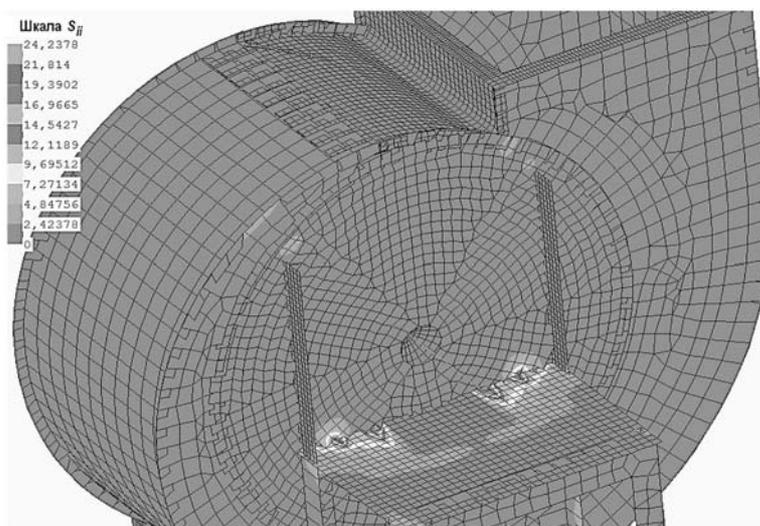


Рис. 4. Амплитудные значения расчетных приведенных напряжений вентилятора, полученные методом динамического анализа, МПа

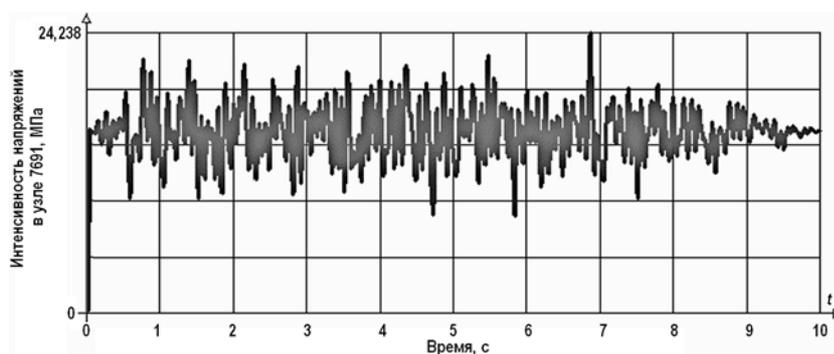


Рис. 5. Изменение во времени расчетных напряжений в критическом узле

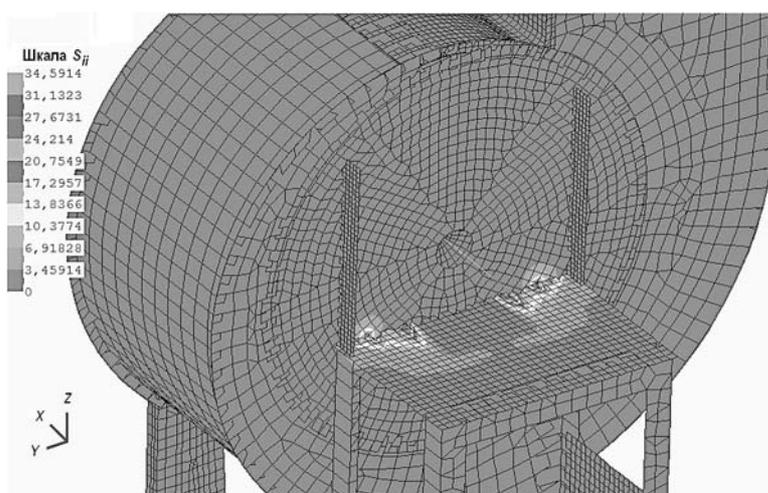


Рис. 6. Амплитудные значения расчетных приведенных напряжений вентилятора, полученные линейно-спектральным методом, МПа.

Максимальное приведенное напряжение в вентиляторе при анализе сейсмостойкости методом прямого динамического анализа составляет 24,2 МПа (рис. 4). Программа дает возможность просмотра анимации изменений напряжений модели на всем промежутке времени сейсмического воздействия. Также возможно получить график изменения напряжения в узле в зависимости от времени (рис. 5), который позволяет оценить момент времени возникновения максимального напряжения. В данном случае максимальные напряжения возникают между 6,8 и 6,9 секундами. Расчет спектральным методом показывает, что максимальное приведенное напряжение модели составляет 34,6 МПа (рис. 6). Как видно из рис. 4, 6, узлы, в которых возникают максимальные напряжения, в обоих случаях совпадают, но значения полученных наибольших напряжений двумя методами различаются на 30%.

Из полученных результатов следует, что спектральный метод, использующий интегральные характеристики сейсмического воздействия, завышает расчетные значения напряжений, тем самым занижая реальные показатели сейсмостойкости оборудования. Другими словами, при подтверждении критериев прочности для сейсмического воздействия по результатам линейно-спектрального расчета эти критерии будут гарантированно выполнены (с «запасом») при использовании динамического анализа. Несмотря на довольно схожую картину напряжений, в модели вентилятора, посчитанного динамическим методом, присутствуют дополнительные напряженные области. Наличие этих напряженных областей указывает на преимущество метода, состоящее в более детальном описании работы конструкции при прохождении сейсмического процесса.

Если сравнивать временные ресурсы, необходимые для выполнения расчетов двумя методами, то для реализации динамического расчета необходимо на один – два порядка больше машинного времени, чем на спектральный.

Таким образом, при необходимости детальной оценки поведения конструкции и ее отдельных элементов при сейсмическом воздействии либо при анализе особо ответственного оборудования (корпус реактора, парогенератор и т.п.) следует пользоваться методом прямого динамического анализа. В случае, когда нужно оценить сейсмостойкость в целом, не вникая в особенности динамики воздействия сейсмического процесса на анализируемую конструкцию, с экономией расчетных и временных ресурсов, достаточно линейно-спектрального метода, занижающего сейсмостойкость за счет смещения расчетных функционалов, характеризующих ее с худшей стороны.

### **Литература**

1. НП 031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – М.: НТЦ ЯРБ, 2001. – 50 с.
2. *Петренко А.В., Назаренко А.А., Филягин Д.В.* Анализ прочности и работоспособности системы аварийного расхолаживания реактора АЭС. / Научно-техническая конференция молодых специалистов ОКБ «Гидропресс» 21-22 марта 2012. Электронный ресурс: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2012/documents/kms2012-010.pdf> (дата обращения: 23.08.2017).
3. *Кангарлу К.* Расчет на сейсмические воздействия наземных стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти в условиях Ирана. Дисс. канд. техн. наук. – М.: МГСУ, 2012. – 19 с.
4. *Шипицын М.О.* Расчет вертикальных резервуаров на действие сейсмической нагрузки с использованием пакета Ansys. / Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Тюмень, 14-16 ноября 2012. – С. 398-404.
5. *Булушев С.В., Джинчвелашвили Г.А., Колесников А.В.* Нелинейный статический метод анализа сейсмостойкости зданий и сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2016. – № 5. – С. 39-47.
6. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных

- энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
7. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости. Гипотезы и заблуждения: монография, 2-е изд. – М.: МГСУ, 2014. – 192 с.
  8. Воробьева В.К., Зайнулабидова Х.Р., Фрезе М.В. Учет демпфирования в задачах оценки сейсмостойкости зданий и сооружений. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2016. – Т. 40. – № 1. – С. 108-118.
  9. Кутько Е.С. Сорокин Ф.Д. Расчет присоединенной массы и коэффициента демпфирования вибрирующих в жидкости тел методом конечных объемов с приложением к расчету параметров пучка твэлов реактора ВВЭР-440 // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 8. – С. 47-53.
  10. Edwards C.H., Penney D.E. Elementary Differential Equations with Boundary Value Problems, 6-th Edition. – Pearson Pbl., 2008, – 702 p.
  11. U.S. EPR Piping Analysis and Pipe Support Design. – AREVA, 2010, ANP-10264NP, Rev. 1. – 98 p.
  12. Петров В.А., Цейтлин Б.В., Скворцова А.Е., Скоморовская Е.Я., Судакова В.Н., Турчина О.А. Расчетная оценка сейсмостойкости основных сооружений Абаканской ТЭЦ // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – СПб.: 2002. – Т. 241. – С. 18-27.
  13. Миряха В.А. Численное моделирование волновых и деформационных процессов в упругих и упругопластических средах разрывным методом Галеркина. Дисс. канд. физ.-мат. наук. – М.: МФТИ, 2015. – 150 с.
  14. Evaluation of Seismic Designs – A Review of Seismic Design Requirements for Nuclear Power Plant Piping, NUREG-1061. Vol. 2. – Washington, 1985. – 184 p.
  15. Сахаров А.М. Евдокименко В.В. Сейсмический анализ стеллажей бассейна выдержки. / Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам АО. ОКБ «Гидропресс» 25-26 марта 2015. Электронный ресурс: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms-2015/documents/kms2015-043.pdf> (дата обращения: 23.08.2017).
  16. СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах. – М.: Минстрой России, 2014. – 125 с.
  17. Ушаков О.Ю. Методика учета пространственного характера сейсмического воздействия при расчете зданий и сооружений. Дисс. канд. техн. наук. – М.: МГСУ, 2015. – 181 с.
  18. Evolution of modal combination methods for seismic response spectrum analysis, BNL-NUREG-66410. – Washington, 1999. – 11 p.
  19. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. – СПб: Наука, 1998. – 225 с.
  20. РБ 006-98 Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ – М.: НТЦ ЯРБ, 2000. – 76 с.
  21. Мкртычев О.В., Решетов А.А. Методика определения исходных характеристик наиболее неблагоприятных акселерограмм для линейных систем с конечным числом степеней свободы. // Вестник МГСУ – 2015. – № 8. – С. 80-91.
  22. Гаскин В.В., Иванов И.А. Сейсмостойкость зданий и транспортных сооружений. Учебное пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 76 с.
  23. Корчинский И.Л., Поляков С.В., Быховский В.А., Дузинкевич С.Ю., Павлык В.С. Основы проектирования зданий в сейсмических районах. – М.: Стройиздат, 1961. – 488 с.
  24. Друновцева С.А. Синтез тестовых воздействий для анализа сейсмостойкости объектов атомной энергетики. Дисс. канд. техн. наук. – СПб: СПбГУ, 2013. – 129 с.
  25. Kumar Ashok Software for generation of spectrum compatible time history. XIII-th World Conference on Earthquake Engineering. – Vancouver, Canada, August 1-6, 2004.
  26. Друновцева С.А. Метод синтеза сейсмических колебаний, соответствующих заданному семейству спектров ответа. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10. Прикл. матем. Информ. Проц. упр. – 2013. – № 2. – С. 112-120.
  27. Gupta Ajaya K. Response spectrum method in seismic analysis and design of structures. – Boston: Blackwell Scientific Publications, 1990. – 170 p.
  28. Xing J.I.N., Qiang M.A. and Shanyou L.I. Comparison of Four Numerical Methods for Calculating Seismic Dynamic Response of SDOF System. XIII-th World Conference on Earthquake Engineering. – Vancouver, Canada, August 1-6, 2004. Электронный ресурс:

[http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13\\_2889.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_2889.pdf) (дата обращения: 23.08.2017).

29. Программа расчета конструкций методом конечных элементов «Зенит-95». Версия 6.612.2. Руководство пользователя. Основные алгоритмы. Библиотеки алгоритмов. Подготовка исходных данных. – СПб.: Научно-техническое предприятие «ДИП», 2015. – 271 с.

30. *Gaberson H.A.* Dynamic analysis using response spectrum seismic loading. Shock spectrum calculation from acceleration time histories. – California: Civil Engineering Laboratory, 1981. 66 p.

Поступила в редакцию 02.11.2017 г.

#### Авторы

Соболев Артем Владимирович, старший преподаватель

E-mail: sobolevartem82@gmail.com

Данилов Павел Анатольевич, аспирант

E-mail: chugunca3230@gmail.com

Зевякин Александр Сергеевич, ассистент

E-mail: alexzev1991@mail.ru

Курков Сергей Викторович, Генеральный директор ООО «НТП ДИП»

E-mail: dip\_zenit@mail.ru

UDC 621.01

## COMPARISON OF TWO KEY ANALYSIS METHODS FOR THE SEISMIC STABILITY OF EQUIPMENT ON THE EXAMPLE OF A VENTILATION UNIT

Sobolev A.V. \*, Danilov P.A. \*, Zevyakin A.S. \*, Kurkov S.V. \*\*

\* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «МЭФТИ»

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

\*\* OON NTP «ДИП»

38 Budapeshtskaya st., bld. 2, St. Petersburg, 192071 Russia

#### ABSTRACT

The paper considers a computational analysis of the NPP's light equipment seismic resistance on the example of a ventilation unit, using two most common techniques: linear spectral analysis and direct dynamic analysis method.

The basic provisions, assumptions and limitations of the linear spectral method are presented. Examples of computational cases are provided where the method in question is not applicable in a generally accepted formulation. In particular, an analysis of extended spatial structures shall take into account the phase difference and, possibly, the accelerations/displacements for mutually remote boundary conditions. Another example is reservoirs with a liquid which are not filled up. Here, liquid waves can form and they cannot be taken into account in the linear spectral method.

The paper considers the peculiarities involved in the use of the dynamic analysis method, including the required input data, and the approaches to and procedures for synthesizing the calculated accelerograms. A sequence of operations is presented for synthesizing the calculated accelerograms, and materials are listed which describe the mathematical apparatus used in the derivation of finite mathematical relations for the calculation of response spectra and calculated relations as such. The essence of the damping coefficient, its effects on the calculation results and the approaches to its determination are described. Variants with the absolute absence of damping and with absolute damping are discussed.

A real radial ventilation set used in active ventilation systems of nuclear power plants was taken as the test model. The calculation results for the detailed finite-element model of the ventilation unit developed using the Zenit-95 software package are presented. These include the distribution of the calculated reduced stresses obtained by the linear spectral method and by the direct dynamic analysis method. An analysis of the results obtained by the two methods has shown that the linear spectral method overstates the calculated reduced stresses as compared to the dynamic analysis method, that is, underestimates the equipment's resistance to seismic effects. In addition, the dynamic method shows additional areas of the ventilation unit where significant reduced stresses take place, while the linear spectral method leaves these areas unattended.

**Key words:** seismic stability, linear spectral method, dynamic analysis method, reduced stresses, accelerogram, finite element model.

#### REFERENCES

1. NP 031-01 *The design standards of earthquake-resistant nuclear power plants*. Moscow. NTC YaRB Publ., 2001, 50 p. (in Russian).
2. A.V. Petrenko, A.A. Nazarenko, D.V. Filyagin. Analysis of the strength and efficiency of the emergency cooling system of the NPP. Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh spetsialistov OKB «Gidropress» 21-22 March 2012. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2012/documents/kms2012-010.pdf> (accessed Aug 23, 2017) (in Russian).
3. Kangarlu K. Calculation of seismic effects of surface steel vertical cylindrical tanks for oil storage in Iran. Diss. kand. tekhn. nauk. Moscow, MGSU Publ., 2012, 19 p. (in Russian).
4. Shipitsyn M.O. Calculation of vertical tanks for the action of seismic load using the ANSYS package. *Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodyh uchyonih*. Tyumen', 14-16 November 2012, pp. 398-404 (in Russian).
5. Bulushev S.V., Dzhinchvelashvili G.A., Kolesnikov A.V. Nonlinear static method of analysis of seismic resistance of buildings and structures. *Sejmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2016, no. 5, pp. 39-47 (in Russian).
6. PNAE G-7-002-86 Norms for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 525 p. (in Russian).
7. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvily G.A. *Problems of Accounting for Nonlinearities in the Theory of Seismic Stability. Hypotheses and Misconceptions*. Moscow. MGSU Publ., 2014, 192 p. (in Russian).
8. Vorob'eva V.K., Zajnulabidova H.R., Freze M.V. Damping in the problems of seismic resistance assessment of buildings and structures. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2016, v. 40, no. 1, pp.108-118 (in Russian).
9. Kut'ko E.S. Sorokin F.D. Calculation of the attached mass and the coefficient of damping of bodies vibrating in liquid by the finite volume method with the application of the VVER-440 fuel rod bundle. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye*, 2013, no. 8, pp. 47-53 (in Russian).
10. Edwards C.H., Penney D.E. *Elementary Differential Equations with Boundary Value Problems*, VI-th Ed., Pearson Publ., 2008, 702 p.
11. U.S. EPR Piping Analysis and Pipe Support Design AREVA, 2010, ANP-10264NP, Rev. 1, 98 p.
12. Petrov V.A., Tseitlin B.V., Skvortsova A.E., Skomorovskaya E.YA., Sudakova V.N., Turchina O.A. Estimated estimation of seismic resistance of the main structures of the Abakan TPP. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva*, 2002, v. 241, pp. 18-27 (in Russian).
13. Miryaha V.A. Numerical simulation of wave and deformation processes in elastic and elastoplastic media by the Galerkin discontinuous method. Diss. kand. fiz.-mat. nauk. Moscow. MFTI Publ., 2015, 150 p. (in Russian).
14. Evaluation of Seismic Designs – A Review of Seismic Design Requirements for Nuclear Power Plant Piping, NUREG-1061. Vol.2, Washington, 1985, 184 p.

15. Saharov A.M. Evdokimenko V.V. Seismic Analysis of Shelving Pools. *Sbornik trudov XVII Mezhdunarodnoj Nauchno-tehnicheskoy Konferentsii Molodyh Spetsialistov po Yadernym Energeticheskim Ustanovkam AO OKB «Gidropress»* 25-26 March 2015. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms-2015/documents/kms2015-043.pdf> (accessed Aug 23, 2017) (in Russian).
16. SP 14.13330.2014 *Construction in seismic regions*. Moscow. Minstroy Rossii Publ., 2014, 125 p. (in Russian).
17. Ushakov O.Yu. Method of accounting for the spatial nature of the seismic effect in the calculation of buildings and structures. Diss. kand. tehn. nauk. Moscow. MGSU Publ., 2015, 181 p. (in Russian).
18. Evolution of modal combination methods for seismic response spectrum analysis, BNL-NUREG-66410, Washington, 1999, 11 p.
19. Birbraer A.N. *Calculation of Structures for Earthquake Resistance*. SPb. Nauka Publ., 1998, 225 p. (in Russian).
20. RB 006-98 *Determination of initial seismic ground motions for design basis*. Moscow. NTC YaRB Publ., 2000, 76 p. (in Russian).
21. Mkrtychev O.V., Reshetov A.A. A technique for determining the initial characteristics of the most unfavorable accelerograms for linear systems with a finite number of degrees of freedom. *Vestnik MGSb*, 2015, no. 8, pp. 80-91 (in Russian).
22. Gaskin V.V., Ivanov I.A. *Seismic Resistance of Buildings and Transport Structures*. Irkutsk. IrGUPS Publ., 2005, 76 p. (in Russian).
23. Korchinskij I.L., Polyakov S.V., Byhovskij V.A., Duzinkevich S.Yu., Pavlyk V.S. *Basics of Designing Buildings in Seismic Regions*. Moscow. Strojizdat Publ., 1961, 488 p. (in Russian).
24. Drunovtseva S.A. Synthesis of test actions for analysis of seismic resistance of nuclear power facilities. Diss. kand. tehn. nauk. SPb. SPbGU Publ., 2013, 129 p. (in Russian).
25. Kumar Ashok. Software for generation of spectrum compatible time history. XIII-th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 1-6, 2004.
26. Durnovtseva S.A. The method of synthesis of seismic oscillations corresponding to a given family of response spectra. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 10. Prikl. matem. Inform. Proc. upr.* 2013, no. 2, pp. 112-120 (in Russian).
27. Gupta Ajaya K. *Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design of Structures*. Boston. Blackwell Scientific Publ., 1990. 170 p.
28. Xing J.I.N., Qiang M.A. and Shanyou L.I. Comparison of Four Numerical Methods for Calculating Seismic Dynamic Response of SDOF System. XIII-th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 1-6, 2004. Available at: [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13\\_2889.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_2889.pdf) (accessed 23.08.2017).
29. The program of calculation of constructions by a finite element method «Zenith-95». Version 6.612.2. User guide. Basic algorithms. Libraries of algorithms. Preparation of initial data. SPb. Nauchno-tehnicheskoe predpriyatie «DIP» Publ., 2015, 271 p. (in Russian).
30. Gaberson H.A. *Dynamic Analysis Using Response Spectrum Seismic Loading; Shock Spectrum Calculation from Acceleration Time Histories*. California. Civil Engineering Laboratory, 1981, 66 p.

#### Authors

Sobolev Artem Vladimirovich, Senior Lecturer

E-mail: SobolevArtem82@gmail.com

Danilov Pavel Anatol'evich, PhD Student

E-mail: chugunca3230@gmail.com

Zevyakin Aleksandr Sergeevich, Assistant

E-mail: alexzev1991@mail.ru

Kurkov Sergej Viktorovich, General Director

E-mail: dip\_zenit@mail.ru