



**Тяпин А.Г.**  
доктор технических наук

АО «Атомэнергопроект», Москва, Российская Федерация

УДК 624.042.7

## Некоторые соображения о нормах нового поколения. Часть I: общие положения и задание сейсмического воздействия

**Аннотация:** Автор излагает свои предложения по поводу начавшегося процесса пересмотра российских норм сейсмостойкого строительства. Даются рекомендации по организации этого процесса и некоторые общие рекомендации по формату норм нового поколения. Далее автор более подробно останавливается на вопросах задания сейсмического воздействия. Цель данного текста - не столько предлагать ответы, сколько акцентировать основные вопросы, указать «развилки», на которых авторам новых норм придется делать тот или иной выбор. Автор обрисовывает контуры

возможных решений, из которых придется выбирать. Здесь и вопрос о многоуровневом воздействии, и вопрос о формате задания воздействия сейсмологами, и вопрос об обеспеченности параметров воздействия, и вопрос о точках, где это воздействие задается. Кроме того, обсуждаются вопросы о баллах интенсивности и максимальных ускорениях, о форме нормированных спектров ответа, о композиции волнового поля (т.е. об учете невертикальности волн). В заключение автор кратко останавливается на вопросе об «опасных направлениях сейсмического воздействия».

**Ключевые слова:** сейсмическое воздействие, линейно-спектральный расчет, нормы проектирования, опасные направления сейсмического воздействия.

**Tyapin A.G.**  
Doctor of Technical Science, JSC "Atomenergoprojekt", Moscow, Russian Federation

## Some Comments on the New Generation of Standards in Earthquake Engineering. Part I: General Requirements and Seismic Input

**Abstract:** The author gives his comments on the already started process of the revision of Russian Standards in earthquake engineering. He submits certain recommendations on the process and some recommendations of the general format of the new

generation of Standards. Then the author in details discusses the seismic input in the Standards. The goal of the present text is not to give answers, but rather to stress main questions and to list the points where the authors of the future Standard will have to make

*a certain choice between alternatives. The author describes the alternative solutions for these choices. Some of such issues follow. The multi-level seismic input; the format of the seismic input required from seismologists, the non-exceedance level for seismic input; the location of the control point where seismic input is given. Besides,*

*the issues of the intensity degrees and peak accelerations, the shape of the normalized response spectra, the composition of the wave field (i.e. non-vertical seismic waves) are also discussed. Finally, the authors comments on the «dangerous directions of the seismic excitation» concept.*

**Keywords:** seismic input, linear spectral method, Standards in earthquake engineering, dangerous directions of the seismic excitation.

В рамках национального проекта «Жилье и городская среда» начат новый этап процесса нормотворчества. Автор хотел бы поделиться своими соображениями по тому, как сделать этот процесс более эффективным. В данной публикации хотелось бы затронуть общие вопросы, а также более конкретно поговорить о задании сейсмических воздействий. Вопросы расчетов на сейсмические воздействия автор надеется более подробно обсудить в следующих публикациях.

### 1. Общие организационные соображения.

Конечным итогом процесса должно стать создание норм сейсмостойкого строительства нового поколения. Это большая работа, и в несколько месяцев ее не уложить. Поэтому, по мнению автора, сейчас надо параллельно вести две работы. Во-первых, в кратчайший срок (месяц-два) идентифицировать и редакторским образом устранить явные «ляпы» существующего СП [1], не меняя при этом его концепцию и содержание, включая формат. Во-вторых, уже сейчас надо думать о нормах действительно нового поколения – с существенно обновленным форматом и содержанием. Это надо обсуждать. Согласен с А.М.Уздиным, что хорошей основой для такого обсуждения может служить проект 2007 г. [2], которому в свое время, к сожалению, не было уделено должного внимания. Недавно появился новый проект, который тоже может стать основой для обсуждения. Площадкой для такого обсуждения может служить Совет по сейсмостойкому строительству при РААСН, печатной площадкой – журнал «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений».

Пригласить к участию следует всех, не разделяя на «своих» и «чужих», чтобы не повторять ошибки прошлого. Все попытки заранее исключить кого-то из обсуждения, на мой взгляд, контрпродуктивны и вредны. Это относится, прежде всего, к авторам последних редакций норм – их обязательно надо пригласить к участию в обсуждении. Многолетние «вендетты» как в среде сейсмологов, так и в среде специалистов по сейсмостойкому строительству как раз и привели к нынешней не очень веселой ситуации. Ожидая от ФАУ «ФЦС» железной воли в том, чтобы не позволить личным интересам участников (а эти интересы, конечно, есть) и старым счетам возобладать над интересами дела.

### 2. Общие соображения по структуре документа нового поколения.

2.1. Я не раз писал о том, что нормативный документ уже в момент выхода должен быть снабжен постатейными комментариями. Они даются отдельно от основного текста, но в той же нумерации разделов, что и основной текст. Комментарии пишутся авторами основного текста. Если к какому-то разделу у авторов нет комментариев, этот раздел в нумерации комментариев пропускается, так что нумерация в комментариях может идти не подряд – главное, чтобы она со-

ответствовала нумерации основного текста. Если основной текст должен быть по возможности кратким («все, что можно исключить – исключи»), то в комментариях авторы развернуто, со ссылками на литературу, должны пояснить, почему они избрали тот путь в основном тексте, который избрали. Возможны даже иллюстрирующие примеры. За образец я бы взял формат американских норм [3]. Здесь я говорю не о содержании, а именно о формате. Комментарий не должен вводить ничего нового (по сравнению с основным текстом) по существу, но должен, во-первых, обосновывать то, что написано в основном тексте, а во-вторых, – на примерах устранять возможность неправильного толкования основного текста.

2.2. Основной текст должен начинаться с толкового словаря основных терминов (гlossария). Поскольку по каждому из терминов существуют варианты толкований, которые можно обсуждать бесконечно долго, считаю нужным поставить перед этим гlossарием не задачу «как правильно», а задачу «как толкуют это термин в дальнейшем тексте авторы норм». Причины выбора и отброшенные варианты можно пояснить в комментариях к гlossарию. Конечно, совсем уж абсурдные толкования здесь не нужны, но их должно отнестись публичное обсуждение. Чтобы никому не было обидно, за «нулевое приближение» для обсуждения можно взять гlossарий из американских норм [3].

2.3. Предстоит обсудить непростой вопрос о специальных отраслях строительства – например, гидротехнического или транспортного. В боях гражданских войн последних лет некоторые специалисты этих отраслей предпочли, что называется, «выгородить свою поляну» и разработать нормы «для себя», чтобы не ждать появления чего-то общего и не вмешиваться в чужую драку. Их вполне можно понять. Возможно, не стоит сразу ставить задачу объединения всех этих норм. Однако после появления вменяемого документа нового поколения для массового гражданского строительства предстоит предметно обсудить, что мешает хотя бы в общей части объединить все эти нормы (оставив специфику в подразделах единого документа). Воссоединение, по моему убеждению, должно быть добровольным.

### 3. Основные части документа.

Общегосударственные нормы сейсмостойкого строительства традиционно состоят из трех основных частей. Это, во-первых, вопросы определения сейсмических воздействий (включая карты общего сейсмического районирования и списки населенных пунктов). Во-вторых, это положения о расчетах сооружений на эти воздействия. Наконец, в-третьих, это требования к конструктивным решениям. Позволю себе в данном тексте высказать некоторые соображения по первой части.

**3.1. Сейсмические воздействия.** Сейсмология – уважаемая наука со своей логикой развития. Как мы видели в последние годы, далеко не все там очевидно. Более того, с течением времени неизбежно происходит накопление информации о землетрясениях, поэтому любые карты обречены на эволюцию со временем, на регулярное обновление – и к этому надо относиться с пониманием. Окончательных карт сейсмического районирования нет и не будет никогда.

Никто не вправе диктовать сейсмологам направления развития их науки. Но я убежден, что в деле создания норм сейсмостойкого строительства заказчиками для сейсмологов должны выступать проектировщики (расчетчики и отчасти конструкторы). Они должны внятно сформулировать, что конкретно им нужно от сейсмологов. Пример Казахстана, где это успешно сделал И.Е. Ицков, – нам наука. Какие же «развилки» мы встретим на этом пути?

**3.2. Вопрос о многоуровневости расчетов.** Многие смешивают этот вопрос с вопросом о числе карт (в смысле числа разных средних периодов повторяемости воздействий), но для меня это разные вопросы. Поскольку здесь часто ссылаются на опыт атомной энергетики, напомним, в чем он заключается. Смысл нескольких уровней воздействия в атомной энергетике заключается в том, что ОДНО И ТО ЖЕ СООРУЖЕНИЕ рассчитывается на разные (по интенсивности, связанной с периодом повторяемости) воздействия. На самом деле, выделяются как бы разные предельные состояния для одного и того же сооружения, после чего критерий сейсмостойкости формулируется примерно так: «Мы требуем, чтобы предельное состояние номер 1 (условно) не достигалось при воздействиях с периодом повторяемости до 100 лет (условно), а предельное состояние номер 2 не достигалось бы вплоть до интенсивности воздействия с периодом повторяемости до 10000 лет». Более конкретно: мы требуем, чтобы все, что связано с выработкой электроэнергии на АЭС, продолжало функционировать после сейсмических воздействий повторяемостью раз в 100 лет (это землетрясение называется проектным (ПЗ) или землетрясением уровня SL1). Если сейсмическое воздействие более сильное, мы готовы смириться с прекращением выработки энергии и даже с разрушением части конструкций, но все-таки требуем, чтобы конструкции, связанные с радиационной безопасностью, выполняли свои функции вплоть до интенсивности воздействия с повторяемостью раз в 10000 лет (это землетрясение называют максимальным расчетным (МРЗ) или землетрясением уровня SL2). Цифры здесь условны, но суть ясна. Сейчас добавилось требование, чтобы и за пределами МРЗ вплоть до некоторого «запроектного» уровня SL3 какие-то системы продолжали функционировать, чтобы хотя бы минимизировать последствия аварии. Но подчеркну, что речь идет о расчетах одного и того же сооружения на разные воздействия.

В гражданском строительстве распространен несколько другой подход. В нем одно сооружение обычно рассчитывается на один уровень сейсмического воздействия (т.е. расчет одноуровневый), но этот самый один уровень зависит от ответственности сооружения: более ответственное сооружение должно выдерживать более сильное воздействие (имеющее больший период повторяемости, т.е. более редкое). Поэтому существование и применение раз-

ных карт с разными периодами повторяемости не означает автоматически многоуровневости воздействия – просто мы распределяем наши сооружения по разным картам в зависимости от функций и ответственности.

Много путаницы внесло в прошлом использование терминов ПЗ и МРЗ авторами гражданских норм в совершенно другом смысле. Они, в сущности, имели в виду одно и то же землетрясение (определяемое одним периодом повторяемости), но называли ПЗ проектный спектр ответа, используемый при линейно-спектральных расчетах, а МРЗ – акселерограмму ТОГО ЖЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ (воздействия с тем же периодом повторяемости), но используемую для расчетов во времени. К счастью, в редакции 2018 года [1] это несоответствие устранено. Два расчета остались от прежней редакции, но теперь воздействия для них называются РЗ и КЗ (расчетное и контрольное землетрясения). Еще более правильно было бы, по-моему, вообще говорить не о двух разных землетрясениях, а о двух расчетах – проектном и контрольном (скажем, ПР и КР). Сама по себе идея разделения проектного и контрольного расчетов вполне разумна, тем более что понятно методологическое различие между ними, которое лежит, прежде всего, в способах учета нелинейности: если в проектном расчете коэффициент  $K_1$  относится ко всему сооружению, то в контрольном расчете нелинейность рассматривается локально, что более физично. Но эта разница, повторяюсь, относится не к воздействию, а к методам моделирования и расчета. Хорошо, что теперь в СП 2018 года, по крайней мере, нет иллюзий многоуровневого расчета.

Что делать с многоуровневостью воздействия в нормах нового поколения? Повторюсь, что вопрос о многоуровневости воздействия определяется наличием у одного и того же сооружения разных предельных состояний, по которым мы хотим выставлять разные (с точки зрения интенсивности воздействия) требования сейсмостойкости. Если наше предельное состояние одно (скажем, обрушение несущих конструкций, способное привести к гибели людей), то и воздействие должно быть одно (а вот по какой карте с каким периодом повторяемости его определять, зависит от ответственности и т.п.). Для введения же многоуровневого расчета надо четко представлять, какие еще предельные состояния мы собираемся нормировать, кроме обрушения, – это повреждения фасадов? Еще что-то? Возможно, для специальных отраслей ответы на эти вопросы различаются (многоуровневость воздействия важна там, где, подобно атомной отрасли, существует различие между сохранением функциональности и обрушением, – для мостов, скажем). В любом случае отношение к многоуровневости надо внятно прописать (хотя бы в комментариях к основному тексту) авторам будущих норм.

**3.3. Вопрос о формате задания воздействий.** Этот формат очевидным образом зависит от формата расчетов, в которых эти воздействия потом используются. Самый «богатый» формат – это набор трехкомпонентных акселерограмм (минимум пять по требованиям американских норм [3]). По акселерограммам легко построить любые спектры – и спектры Фурье, и спектры ответа. После этого можно применять разные методы расчета – как традиционный линейно-спектральный, так и методы расчета во времени (их

много разных). Вопрос, стоящий перед авторами норм, – собираемся ли мы для массового строительства требовать расчеты во времени? Если такие расчеты требуются только для уникальных сооружений, для них можно потребовать индивидуального научного сопровождения и вообще не описывать в нормах (или описать в самых общих чертах, чтобы дать ориентиры органам экспертизы). Если же мы собираемся требовать эти расчеты от массовых гражданских проектировщиков, надо четко их описать и дать в руки инструменты. Соответственно тогда и от сейсмологов надо требовать информацию, позволяющую получать такой набор акселерограмм. Здесь снова развилка: либо мы ждем от сейсмологов сам набор (по типу «десятки» акселерограмм ИФЗ, разработанной в советские годы), либо требуем дать информацию, достаточную для самостоятельного построения проектировщиками такого набора. В первом приближении эта информация включает спектр ответа при известном демпфировании в осцилляторах, максимальное ускорение (если оно, как иногда бывает, не видно из спектра ответа), а также длительности участков возрастания, примерного постоянства и убывания огибающей акселерограмм. Атомные строители знают, как по этим данным синтезировать любое требуемое количество акселерограмм. Гражданских строителей при необходимости можно этому научить. Вопрос в том, есть ли такая необходимость здесь и сейчас.

Вопрос о продолжительности не так тривиален, как может показаться. Расчетчики привыкли иметь дело с сейсмическими воздействиями конечной продолжительности, т.е. начинающимися и кончающимися нулевыми ускорениями, скоростями и перемещениями. Но сейсмологи знают, что на площадке постоянно фиксируются т.н. «микросейсмы». Поэтому неплохо было бы как-то договориться, как мы по реальным записям будем определять момент начала и окончания сейсмического воздействия, а также угловые точки квазиогibaющей (начало и конец участка постоянства эффективных амплитуд). Напрашивается установление какого-то относительного барьера – скажем в 1% максимальной амплитуды ускорения. Альтернативой может стать фиксация момента первого достижения какого-то порогового абсолютного ускорения. Тут свое слово должны сказать сейсмологи; нам, расчетчикам, просто важно, чтобы они понимали, с какими форматами (той же квазиогibaющей) мы работаем в дальнейшем.

Здесь же надо решить вопрос о том, считаем ли мы вертикальную компоненту акселерограммы подобной или даже равной (по спектрам ответа) горизонтальным компонентам. Если нет, то задача картирования должна быть сформулирована для горизонтальной и вертикальной компонент по отдельности.

Если от сейсмологов мы потребуем готовых акселерограмм, то, наверное, их надо приводить к единичному максимальному ускорению, а значения максимального ускорения отдельно картировать.

**3.4.** Еще один концептуальный вопрос о воздействии для разработчиков норм нового поколения – а где (в какой точке на площадке) мы собираемся задавать это воздействие? Сейчас воздействие задается в картах ОСР как движение поверхности площадки «на средних грунтах». Не я первый заявляю о том, что это нефизично. Причина в том, что

средние (и мягкие) грунты всегда слоистые, и при одном и том же по происхождению сейсмическом воздействии картина колебаний свободной поверхности грунта может быть совершенно разной в зависимости от грунтового профиля площадки. Нынешние критерии группировки средних и мягких грунтов смешивают в один набор совершенно разные профили. Гораздо логичнее было бы потребовать от составителей карт ОСР выдачи информации о воздействии на открытой поверхности скальных грунтов, с тем, чтобы пересчет к поверхности реальных грунтов на площадке выполнялся бы, скажем, на этапе микросейсмрайонирования с учетом реальной слоистости (т.к. масштаб изменчивости грунтовых условий совсем другой, чем масштаб карт ОСР). Такую идею, в частности, неоднократно высказывала О.В.Павленко [4]. Проектировщикам нужно воздействие на поверхности, а география России такова, что большинство населенных пунктов построено не на скальных, а на осадочных грунтах разной толщины и слоистости. Идея с воздействием на скале и последующим пересчетом к поверхности физически логична, однако надо понимать, что на практике нас здесь ждут как минимум три проблемы. Первая – кто и каким инструментарием будет проводить этот пересчет от скалы к поверхности? У гражданских проектировщиков, насколько я понимаю, таких инструментов сейчас нет (у атомных проектировщиков они есть; не жалко передать, но снова потребуются обучение). Естественно поручить эту работу сейсмологам, но здесь встает вопрос о ресурсах – масштаб этой работы велик. Сюда же примыкает второй вопрос – откуда возьмутся данные о грунтовых профилях на глубину до скалы, необходимые для такого пересчета? Это огромный масштаб инженерных изысканий. И, наконец, третий вопрос – что делать с т.н. «глубокими грунтовыми площадками», на которых скала находится столь глубоко, что изыскания до скалы практически невозможны?

**3.5.** Если мы не требуем от массовых гражданских проектировщиков перехода на расчеты во времени, и если мы готовы предоставить им информацию о воздействии на поверхности, то тогда мы остаемся на позициях используемого сейчас линейно-спектрального метода. Что это значит с точки зрения задания воздействия? Проектировщику нужен спектр ответа с демпфированием в осцилляторах, которое соответствовало бы демпфированию в сооружении (оно разное для металлических конструкций, железобетона и кирпича). Традиционно сейсмологи задают спектр с демпфированием 5% (что считается соответствующим железобетону), а отклонения в демпфировании для других материалов (в частности, для стали) при необходимости учитывают специальным коэффициентом. Точность такого подхода проблематична: отношение спектров ответа с разным демпфированием в осцилляторах должно зависеть от частоты. Постоянство по частоте такого коэффициента требует специальной проверки и справедливо только для какого-то ограниченного диапазона частот. Но пусть демпфирование зафиксировано. Что значит задать нормативный спектр ответа, который является взаимосвязанностью максимальных ускорений осциллятора от частоты? В нынешних нормах кривая спектра нормируется к единичному «хвосту» (максимальному ускорению, которое мы видим в спектре ответа на бесконечно большой ча-



стоте). Таким образом, спектр ответа распадается в произведение некоторой безразмерной кривой с единичным «хвостом» (она обозначается в гражданских нормах буквой «бета») и максимального ускорения. Это ускорение сейчас привязано к баллам и картируется фактически по картам балльности, а форма кривой «беты» в трех вариантах в зависимости от грунтовых условий фиксируется в нормах. Естественным шагом вперед являлось бы составление непрерывных карт максимальных ускорений в изолиниях, чтобы избежать ступенчатости, присущей дискретным баллам (на границах зон различной балльности ускорение сейчас «прыгает» минимум в два раза).

Эта работа, насколько я понимаю, и была проделана в Казахстане. Но достаточно ли этого для России? На мой взгляд, нет. Я не специалист в сейсмологии, но Казахстан в моем представлении достаточно однороден с точки зрения сейсмотектоники. Зоны ВОЗ (возможных очагов землетрясений) расположены на юге республики. Дробность тектонических плит примерно одинакова. Это позволяет оставить кривые «бета» едиными для всей республики и картировать только максимальное ускорение.

В России ситуация другая. Она в чем-то напоминает ситуацию в США, где центральные и восточные штаты коренным образом отличаются в сейсмотектоническом смысле от западных штатов (от той же Калифорнии, к примеру). Примерным аналогом Калифорнии у нас, насколько я представляю, выступает Кавказ – это старая зона частых землетрясений с высокой раздробленностью тектонических плит. Записи сильных землетрясений здесь длительные по времени (больше 10 с) и сравнительно низкочастотные (конечно, и длительность, и частотный состав зависят еще и от эпицентрального расстояния, но все же). А что мы видим на Камчатке, которая у нас выступает примерным аналогом восточных штатов США? Мало раздробленные тектонические плиты способны долго копить энергию деформации и выплеснуть ее мгновенно. Воздействие будет очень коротким и высокочастотным. У него будет большое максимальное ускорение. Если же мы при фиксированной балльности возьмем максимальное ускорение с Камчатки и умножим на «бету» с Кавказа, мы получим чудовищное воздействие, против которого не устоит ни одно сооружение.

О чем это говорит? О том, что территорию России в сейсмотектоническом смысле при картировании надо разделить на зоны (как минимум на две, как в США), для которых требуется не только картировать максимальные ускорения, но менять кривые «бета». Грубо говоря, если на основной собственной частоте сооружения (обычно довольно низкой) высокое максимальное ускорение с Камчатки умножить на низкое значение камчатской «беты» (а оно низкое, потому что спектральный пик «беты» ушел на Камчатке на высокие частоты), то получившееся в результате такого умножения спектральное ускорение воздействия на собственной частоте сооружения будет примерно соответствовать результатам аналогичного расчета для Кавказа. Отсюда примерное соответствие поведения сооружений (которое и приводит к назначению одной и той же балльности), несмотря на гигантские различия в максимальных ускорениях и продолжительности.

Альтернативой здесь может выступить прямое картирование спектрального ускорения по некоторым характерным точкам – не только по «хвосту» (т.е. пиковому ускорению), как сделано сейчас в Казахстане, но и по некоторым заданным спектральным частотам – скажем, 2 Гц и 10 Гц. Имея три точки (и четвертую нулевую), уже можно пробовать строить индивидуальную «бету». Конечно, для синтеза акселерограмм надо будет еще знать длительности трех участков (в первом приближении можно задать длительность одного участка, а остальные две к ней привязать, хотя такой подход требует проверки на реальных записях).

Все это вопросы сейсмологические, и я с радостью прислушаюсь к мнению сейсмологов в данном вопросе. От нас (проектировщиков) главная просьба – понять, что нам нужны именно спектры ответа, а не просто максимальные ускорения.

Кстати, здесь предстоит разобраться еще с одной особенностью нынешних норм – ограничением уменьшения «беты» при низких частотах. Физический спектр ответа должен уходить в ноль на малых частотах. Нынешние нормы ограничивают такое уменьшение. В моем понимании, дополнительный закладываемый здесь консерватизм призван отразить эффект совсем другой природы – а именно, статистическую взаимосвязанность низкочастотных реакций по разным формам [5]. Сейчас этот вопрос приобретает растущую актуальность в связи с применением сейсмоизоляторов и строительством небоскребов, имеющих очень маленькие первые собственные частоты. Но учет взаимосвязанности реакций по разным формам можно проводить совсем по-другому – на этапе суммирования этих реакций.

**3.6. Баллы и максимальные ускорения.** Сейчас баллы и ускорения для расчетчика связаны жестко. Любой сейсмолог охотно подтвердит, что при фиксированной балльности и фиксированных грунтовых условиях существует значительный разброс в максимальных ускорениях; в лучшем случае можно говорить о соответствии определенному баллу интенсивности целого диапазона максимальных ускорений. Однако на практике для расчетчика это признание ничего не изменит: согласно требованиям норм расчетчик ставит в соответствие определенному баллу определенное ускорение. Собственно, из-за этого и возникают проблемы на границах зон разной балльности.

Может быть, тогда отказаться вообще от баллов, заменив их картами ускорений? Расчетчику такая идея кажется разумной (мы в атомной энергетике вообще баллами не пользуемся). Как-то в беседе с И.Е. Ицковым (напомню, это главный разработчик казахских норм) я прямо спросил его, зачем было оставлять карты в баллах после появления карт в ускорениях. В ответ мудрый И.Е.Ицков напомнил мне, что баллы используются не только расчетчиками. Те действительно способны работать без них, если есть ускорения. Но, кроме расчетчиков, существуют еще и конструкторы, которые выбирают решения, оглядываясь на балльность. Существуют также службы МЧС и, в конце концов, чиновники, которым тоже нужны достаточно простые и грубые оценки интенсивности воздействия. Поэтому даже после появления карт в ускорениях карты в баллах не исчезают автоматически, и в Казахстане их оставили.

Конечно, теоретически можно переставить баллы и ускорения местами в шкале приоритетов: первичными считать карты максимальных ускорений, дальше однозначно выделить определенные диапазоны ускорений, поставив их в соответствие определенным баллам, а потом из карты ускорений уже чисто формально получить карту зон разной балльности. Не исключаю, что можно было бы попробовать применить такой подход (сначала в рамках НИР, разумеется), чтобы для разных вариантов выделения диапазонов ускорений посмотреть, как будут новые зоны балльности соотноситься со старыми зонами. Разумеется, в этом случае ускорения должны задаваться на поверхности, как сейчас.

**3.7.** Еще один фундаментальный вопрос, на который предстоит что-то внятно ответить авторам новых норм, состоит в отношении к обеспеченности задаваемых воздействий. Если мы продолжаем ставить балльность в приоритет, то сейчас практически используются условные вероятности: скажем обеспеченность того или иного ускорения ПРИ УСЛОВИИ, ЧТО ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОСТАВИЛА СТОЛЬКО-ТО БАЛЛОВ. Если представить себе, что у сейсмологов есть богатая выборка записей, разложенных по полочкам фактически установленной балльности, то от коллег-сейсмологов можно потребовать выдать соответствующее интересующей балльности максимальное ускорение. Но при этом надо будет указать его требуемую обеспеченность: либо мы хотим узнать медианное (с условной вероятностью не превышения 50%) значение, либо же значение с какой-то другой обеспеченностью (скажем, с вероятностью не превышения 84%). Иными словами, при условии, что произошло землетрясение, вызвавшее, скажем, восьмibalльное сотрясение рассматриваемой площадки, максимальное ускорение может превзойти устанавливаемый нами уровень с какой условной вероятностью? В пяти случаях из десяти (50%)? В двух случаях из десяти (20%)? От ответа на этот вопрос будет зависеть выдаваемое сейсмологами ускорение для заданной балльности. Но определяться со своими желаниями должны не сейсмологи, а их заказчики – строители; сейсмологи только выполняют их заказ. Для примера скажу, что авторы американских норм прямо ориентируются на обеспеченность конечных результатов в 80%.

Может показаться, что если мы уйдем в расчетах от баллов к максимальным ускорениям, то эта проблема исчезнет. Однако это не так. Даже если совсем забыть о баллах и просто потребовать от сейсмологов выдать, скажем, максимальное ускорение, то ответ будет зависеть от требуемой обеспеченности результата. Природа этого разброса, как писал автор в [3], эпистемическая, а не алеаторическая; иными словами, неопределенность связана с ограниченностью наших знаний (в данном конкретном случае – с конечностью объема выборок записей, по которым проводится статистическая обработка). Я мог бы привести пример работы наших иранских коллег, которые выдавали кривые сейсмичности (зависимости спектральных ускорений от периода повторяемости) с разной обеспеченностью. Разница в ускорениях при смене обеспеченности была весьма велика. Так что сейсмологи в принципе умеют выдавать результаты с разной заданной обеспеченностью – вопрос в том, что именно хотят заказчики.

Кстати, работа с обеспеченностью могла бы ответить на вопрос об учете ответственности сооружения. Ска-

жем, вместо требования о том, что более ответственное сооружение должно выдерживать воздействия с большим периодом повторяемости, чем рядом стоящее менее ответственное сооружение, можно в принципе было бы потребовать, чтобы оно выдерживало воздействие с тем же периодом повторяемости, но с большей обеспеченностью. Скажем, больница должна рассчитываться на такое же восьмibalльное воздействие, как и жилая застройка (более высокой интенсивности может и не наблюдаться исторически), но если застройка должна выдерживать, к примеру, половину возможных восьмibalльных землетрясений, то больница – 80% из этих же восьмibalльных землетрясений (все числа условные). В итоге можно было бы обойтись не применением новых карт (с другим периодом повторяемости), а применением неких повышающих коэффициентов к воздействию с одних и тех же карт. Но для этого надо попросить у сейсмологов данные о разбросе ускорений при одной и той же балльности.

**3.8.** Есть еще один вопрос, который касается задания воздействия. Речь идет о композиции волнового сейсмического поля. Поясню, о чем идет речь. В традиционных нормах по умолчанию полагается, что основание по глубине однородное или горизонтально-слоистое, а сейсмические волны бегут по нему вертикально (изначально снизу вверх, но в силу отражения от границ слоев и от поверхности движение волн становится двухсторонним).

Вертикальное распространение волн вовсе не означает вертикального движения частиц в этих волнах; в поперечных (сдвиговых) вертикальных волнах частицы движутся по горизонтали (обычно сдвиговые волны поляризуют в двух ортогональных вертикальных плоскостях и говорят о двух сдвиговых вертикальных волнах, отвечающих за две горизонтальные компоненты трехкомпонентного сейсмического воздействия). В продольной вертикальной волне частицы движутся по вертикали. Следствием такого допущения является положение о том, что до появления сооружения все частицы, находящиеся в одной горизонтальной плоскости (в том числе и на свободной горизонтальной поверхности), движутся при сейсмическом воздействии одинаково (как говорят, синфазно). Как дополнительное следствие, это означает отсутствие вращения (повторюсь, до появления сооружения).

Всегда ли оправдано такое допущение? Конечно, нет! Против него работают, прежде всего, нарушения горизонтальности залегания слоев грунта в основании (как частный случай – топографическая негоризонтальность поверхности основания). Кроме того, идеальную волновую картину портит наличие всякого рода включений (как природных, так и искусственных – скажем, наличие тяжелых сооружений поблизости от рассматриваемого объекта). Наконец, существует некий просто статистический разброс свойств грунта даже в одном горизонтальном слое. Все это приводит к нарушению синфазности (как говорят – «некогерентности движения основания»). Разумеется, в результате возникают качание и кручение в основании еще до появления сооружения. Некогерентность разделяют на волновую некогерентность (это когда направление распространения сейсмических волн отклоняется от вертикали, и появляются т.н. «бегущие по поверхности» волны) и на стохастическую

некогерентность (когда разброс свойств грунтов случаен, и определенного горизонтального направления у волн нет).

Почему до последнего времени традиционные нормы игнорируют эти, казалось бы, очевидные факты? Первой причиной я бы назвал сравнительно высокую видимую скорость «бегущих волн». Здесь ключевую роль играет слово «видимая». Видимая горизонтальная скорость определяет длину волн по горизонтали и интенсивность связанного с этими волнами качания и кручения. Эта скорость в зависимости от направления волны варьируется от простой (она же – фазовая скорость) скорости волны в среде (определяемой, в свою очередь, жесткостью и плотностью) до бесконечности. Скажем, в рассмотренном выше случае вертикальных волн в горизонтально-слоистой среде видимая горизонтальная скорость равна бесконечности; соответствующая длина волны по горизонтали тоже равна бесконечности, поэтому ни качания, ни кручения до появления сооружения не наблюдается. На практике видимая скорость по данным записей на массивах сейсмографов (одного сейсмографа здесь недостаточно) составляет несколько километров в секунду, значительно превышая простую скорость. Поэтому качание и кручение чаще всего невелики. Для техногенной сейсмике (скажем, от вибраций метрополитена или от близких взрывов на поверхности) результат может быть другим. Попытки подменить видимую скорость простой скоростью и заявить о наличии существенного качания и кручения, которые можно оценить по записям одного сейсмографа (а не массива рядом установленных сейсмографов), на мой взгляд, порочны в принципе. Но этот вопрос тоже может быть обсужден в рамках подготовки норм нового поколения.

Есть и другие причины. Для описания некогерентности необходимо много дополнительной информации, которая всегда в дефиците. Поэтому, скажем, в американских нормах [3] волновая некогерентность в принципе не учитывается (выделенных направлений по горизонтали нет – все направления равноправны), а стохастическая некогерентность учитывается на высоких частотах и на скальных основаниях.

**3.9.** Вкратце еще об одном аспекте задания воздействия. В нынешних гражданских нормах России и некоторых стран СНГ используется концепция так называемого «опасного направления сейсмического воздействия». Ее происхождение, как я понимаю, связано с простейшей и самой ранней моделью задания сейсмического воздействия в расчетах – а именно, к приложению во всех точках сооружения статических внешних сил, равных произведению узловых масс в этих точках на максимальные ускорения фундамента. Зная трехкомпонентную акселерограмму на фундаменте, можно найти модуль вектора ускорения в каждый момент времени, а затем выбрать максимальный по времени модуль ускорения. После этого можно определить модули всех узловых нагрузок (умножением этого максимального модуля ускорения на узловые массы), а направление этих нагрузок в пространстве варьировать (одновременно во всех узлах) в поисках максимальной реакции. Найденное положение нагрузок, соответствующее максимальной реакции, можно объявить «опасным направлением сейсмического воздействия». В этом случае от сейсмологов надо требовать предоставления максимального по времени модуля вектора ускорения.

Однако сейчас статические расчеты на сейсмические воздействия практически не используются – господствующим в гражданских нормах является линейно-спектральный расчет, в котором реакции и воздействия определяются отдельно по формам собственных колебаний. В этом случае «даламберовы» модальные нагрузки, на которые производится статический расчет, уже не равны инерционным «переносным» нагрузкам, определяемым движением фундамента (как это было в предыдущем случае). Автор специально исследовал этот вопрос и показал, что нынешние «направленческие» формулы дают физически обоснованный результат только в том случае, когда спектры ответа всех трех компонент одинаковы. Но для этого именно спектры одной компоненты (а не модуля вектора ускорений) должны стоять в формулах «направленческого» подхода для получения разумного результата. Подробности можно найти в статьях [6,7].

На этом автор хотел бы завершить первую часть – вопросы расчетов требуют отдельного обсуждения.

В заключение позволю себе еще один небольшой общий комментарий. Сейсмологи часто (и обоснованно) жалуются на недостаток записей, мешающий достоверно определить те или иные требуемые параметры воздействия для площадок в России. Но хочется сказать, что в нормах уже сейчас по необходимости фактически задаются эти параметры, несмотря на недостаток записей, – задаются не всегда обоснованно. Поэтому, на мой взгляд, сначала надо определиться с тем, какие параметры мы хотим иметь в принципе (представив для этого идеальную картину наличия большого числа записей и сформулировав технологию получения требуемых параметров), а уже потом думать о том, как восполнить недостаток информации (использованием литературных данных о записях в сходных условиях и пр. – здесь отдельные приемы). В этом случае новые записи будут ложиться в уже заготовленные «полочки», пополняя разумно построенную базу данных.

Подведем итоги. Автор считает, что разработчики норм сейсмостойкого строительства нового поколения должны внятно определить свою позицию по ряду вопросов. По поводу организации работ и общих требований к тексту новых норм предложения автора изложены в начале настоящего текста – повторяться не будем. В части задания сейсмического воздействия это следующие вопросы.

1. Вопрос о многоуровневости расчетов, в отличие от вопроса о необходимости карт с разными периодами повторяемости. Где реально нужна такая многоуровневость?
2. Вопрос о формате задания воздействий. Только спектры или же информация, достаточная для синтеза акселерограмм или даже сами акселерограммы от сейсмологов? Ответ связан с вопросом о том, для каких сооружений мы потребуем расчета во времени. Здесь же – как соотносятся вертикальная и горизонтальные компоненты?
3. Вопрос о месте задания воздействий – на поверхности или на скале с последующим пересчетом к поверхности?
4. Вопрос о формах нормированных спектров – они едины для всей страны или различаются для разных регионов?
5. Отношение к баллам интенсивности. Являются ли они

приоритетными при выборе спектральных ускорений, или следуют за ними (к примеру, при соотношении диапазонов максимальных ускорений на поверхности с целочисленными баллами)?

6. Требования к обеспеченности результатов, получаемых от сейсмологов.

7. Требования к информации о композиции волнового поля.

Повторюсь, что это вопросы не столько к сейсмологам, сколько к их заказчикам – проектировщикам. Но без внятных ответов на эти вопросы невозможно грамотно составить техническое задание для сейсмологов.

### Литература

1. Свод правил СП 14.13330.2018. «Строительство в сейсмических районах» СНИП II-7-81\*. Издание официальное. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. 2018.
2. Айзенберг Я.М., Назаров Ю.П., Ойзерман В.И. Строительство в сейсмических районах. СНИП. Проект. М.: НИЦ «Строительство». 2007.
3. Тяпин А.Г. Современные нормативные подходы к расчету ответственных сооружений на сейсмические воздействия.

Научное издание. М.: Издательство АСВ, 2018. 518 с.

4. Павленко О.В. Практические оценки локальных эффектов землетрясений для сейсмостойкого строительства (к обсуждению СП 14.13330.2014 актуализированного СНИП II-7-81\* «Строительство в сейсмических районах») // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 1. С.15-28.
5. Тяпин А.Г. Линейно-спектральный расчет высотного здания на сейсмическое воздействие // Сейсмостойкое строитель-

ство. Безопасность сооружений. 2019. №1. С.20-27.

6. Тяпин А.Г. «Опасные направления сейсмического воздействия» в линейно-спектральных расчетах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 3. С.18-25.
7. Тяпин А.Г. «Опасные направления сейсмического воздействия» и суммирование реакций по близким формам в линейно-спектральных расчетах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 4. С. 54-59.

### References

1. Svod pravil SP 14.13330.2018 «Stroitel'stvo v seismicheskikh raionakh» SNIIP II-7-81\*. Izdanie ofitsial'noe. M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishhno-kommunal'nogo khozyaistva. 2018. [In Russian]
2. Eizenberg J.M., Nazarov Yu.P., Ojzerman V.I. Stroitel'stvo v seismicheskikh raionakh. SNIIP. Proekt. M.: NITS «Stroitel'stvo». 2007. [In Russian]
3. Tyapin A.G. Sovremennye normativnye podkhody k raschetu otvetstvennykh sooruzhenii na seismicheskie vozdeistviia. Nauchnoe izdanie. M.: Izdatel'stvo ASV, 2018. 518 s. [In Russian]

4. Pavlenko O.V. Prakticheskie otsenki lokal'nykh ehffektov zemletryaseni dlia seismostoikogo stroitel'stva (k obsuzhdeniiu SP 14.13330.2014 aktualizirovannogo SNIIP II-7-81\* «Stroitel'stvo v seismicheskikh raionakh»). Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety], 2016, no. 1, pp. 15-28. [In Russian]
5. Tyapin A.G. Lineino-spektral'nyi raschet vysotnogo zdaniia na seismicheskoe vozdeistvie. Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety], 2019, no. 1, pp. 20-27. [In Russian]

6. Tyapin A.G. «Opasnye napravleniia seismicheskogo vozdeistviia» v lineino-spektral'nykh raschetakh. Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety], 2019, no. 3, pp. 18-25. [In Russian]
7. Tyapin A.G. «Opasnye napravleniia seismicheskogo vozdeistviia» i summirovanie reaktzii po blizkim formam v lineino-spektral'nykh raschetakh. Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety], 2019, no. 4, pp. 54-59. [In Russian]



Anti-Seismic Systems International Society

<http://assisisociety.com/>

Rome, October 22nd, 2019

Dear ASSISI Members,

I'm glad to communicate you the members of the new Executive Committee and the new Territorial Coordinators.

The new Executive Committee is composed as follows:

Clemente Paolo, *Italy President*  
Benzoni Gianmario, *USA Past President and appointed Treasurer*  
Bubis Alexander, *Russia, 16WCSI organizer*  
Aiken Ian, *USA elected*  
Whittaker David, *New Zealand elected*  
Takayama Mineo, *Japan elected*  
Ponzo Felice Carlo, *Italy elected*  
Sadan Bahadir, *Turkey elected*  
Taiki Saito, *Japan Vice President*  
Zhou Ying, *China Vice President*  
Cimellaro Gian Paolo, *Italy Appointed General Secretary*

The new Territorial Coordinators are:

Tan Ping, *China, Asia*  
Black Cameron, *USA, USA and Canada*  
Boroshek Ruben, *Chile, Central and South America*  
Whittaker David, *New Zealand, Oceania*  
Bubis Alexander, *Russia, Eastern Europe Countries (not EU)*  
Dall'Asta Andrea, *Italy, EU and other Western Europe Countries*

Yours sincerely Paolo Clemente



Тяпин А.Г.

доктор технических наук, АО «Атомэнергопроект», Москва, Российская Федерация

## Некоторые соображения о нормах нового поколения. Часть II: определение сейсмических усилий в линейно-спектральном методе

**Аннотация:** Автор излагает свои предложения по поводу начавшегося процесса пересмотра российских норм сейсмостойкого строительства. Даются рекомендации по изменению описания линейно-спектрального расчета. Основной текст сопровождается постатейными комментариями. Автор предлагает следующие новшества. Вводятся матричные соотношения, соответствующие современному уровню расчетов. Матрица масс записывается в общем виде, а не в диагональном, как это было в прошлой редакции норм. Вводится концепция остаточной формы как альтернатива набору 95% полной массы с помощью модальных масс. Воздействие задается как трехкомпонентное без использования нефизичной концепции «опасного направления

сейсмического воздействия». В явном виде поясняется смысл используемых коэффициентов: нормированного спектра, измененного демпфирования и ответственности. Коэффициент нелинейной работы задается не для всего сооружения, а для отдельных конструкций. При суммировании реакций по отдельным формам учтена коррелированность низкочастотных реакций. При выполнении предложенных условий линейно-спектральный расчет должен давать результаты, схожие с результатами расчета на трехкомпонентную акселерограмму (при условии, если спектры ответа компонент заданы в линейно-спектральном расчете в качестве воздействия). В то же время соблюдается определенная преемственность по сравнению с прежней редакцией норм.

**Ключевые слова:** сейсмическое воздействие, линейно-спектральный расчет, нормы проектирования.

Туарин А.Г.

Doctor of Technical Science, JSC "Atomenergoprojekt", Moscow, Russian Federation

## Some Comments on the New Generation of Standards in Earthquake Engineering. Part II: Seismic Forces in Linear-spectral Method

**Abstract:** The author gives his comments on the already started process of the revision of Russian Standards in earthquake engineering. He submits certain recommendations on the description of the linear-spectral analysis. Principal text is accompanied by the Comments. The author suggests the following changes. Matrix equations are introduced, as matrix calculations correspond to the current level of analysis. Mass matrix is populated (and not diagonal, as previously used). Residual mode is introduced as an alternative to the achievement of 95% total mass by the accumulation of modal masses. Seismic excitation is three-component without non-physical

"dangerous directions" concept. Normalized spectra, responsibility coefficient, modified damping coefficient are explained explicitly. Coefficient of non-linear response is applied to certain parts, and not to the whole structure. In the combination of modal responses the inter-correlation of the low-frequency modal responses is explicitly accounted for. If the suggested terms are fulfilled, the linear-spectral analysis should give the results like the time-domain analysis (provided response spectra are calculated from the actual components used in the time domain analysis). At the same time there is a certain smooth transition from the previous codes.

**Keywords:** seismic input, linear spectral method, standards in earthquake engineering.

Автор хотел бы продолжить обсуждение возможных изменений в нормах нового поколения. В первой части статьи обсуждался вопрос о задании сейсмических воздействий. В части второй хотелось бы затронуть вопросы расчетов на сейсмические воздействия. Предлагается изложить пункт о расчете сейсмических усилий следующим образом (нумерация разделов и формул соответствует отдельно взятой данной публикации).

Сейсмические усилия в линейно-спектральном расчете определяются в следующем порядке.

1. Проводится модальный анализ модели сооружения на защемленном фундаменте без демпфирования. По результатам этого анализа определяются круговые собственные частоты  $\Omega_j$ , соответствующие им периоды собственных колебаний  $T_j=2\pi/\Omega_j$  и формы  $\psi_j$  ( $j$  – номер формы). Перемещения в форме  $j$  в различных узлах и по различным степеням свободы записываются в один столбец  $\psi_j$  в соответствии с глобальной нумерацией степеней свободы системы. При модальном расчете удерживаются все формы, собственные частоты

которых меньше пороговой частоты  $\Omega_{пор}$ . Эта частота определяется одним из двух способов. Первый подход заключается в том, что пороговая частота определяется по накопленной в удерживаемых формах модальной массе по трем поступательным направлениям (см. п.3 ниже). Второй подход (с применением т.н. «остаточной формы») заключается в том, что пороговая частота определяется как максимальная частота, на которой спектральное ускорение воздействия с демпфированием в осцилляторах 5% превышает максимальное ускорение воздействия на 5%. Если спектры воздействия по разным направлениям разные, из трех пороговых частот выбирается наибольшая.

2. Полученные формы нормируются по массе. Для этого для каждой формы  $j$  сначала вычисляется коэффициент

$$p_j = \psi_j^T M \psi_j \quad (1)$$

Здесь  $M$  – матрица инерции системы,  $T$  – знак транспонирования матрицы. Затем вычисляется форма, нормированная по массе:

$$\varphi_j = \psi_j / p_j^{0.5} \quad (2)$$

В формуле (2)  $\varphi_j$  и  $\psi_j$  – столбцы,  $p_j$  – число, определенное по формуле (1).

3. Определяются коэффициенты участия каждой формы  $j$  по трем поступательным направлениям  $k$ :

$$q_{jk} = \varphi_j^T M r_k \quad (3)$$

Здесь  $r_k$  – столбец жестких квазистатических перемещений системы при единичном квазистатическом поступательном смещении фундамента по степени свободы номер  $k$ . Вычисляется квадрат коэффициента участия формы  $j$  по направлению  $k$ ; он называется модальной массой  $m_{jk}$  формы  $j$  по направлению  $k$ :

$$m_{jk} = q_{jk}^2 \quad (4)$$

Отношение суммы модальных масс по удерживаемым собственным формам в направлении  $k$  к полной массе системы за вычетом массы, жестко связанной с неподвижным фундаментом, может использоваться для определения пороговой частоты  $\Omega_{пор}$  (см. п.1). Для этого такие отношения по всем трем поступательным направлениям ( $k=1,2,3$ ) должны быть не менее 0,95.

В качестве альтернативы, если пороговая частота определяется по спектрам ответа воздействия, набор собственных форм должен быть дополнен по каждому направлению  $k$  одной т.н. «остаточной» формой, перемещения в которой определяются по формуле

$$\Phi_k = r_k - \sum_{j=1}^n q_{jk} \varphi_j \quad (5)$$

Здесь  $n$  – количество форм с собственными частотами, меньшими  $\Omega_{пор}$ . Этой «остаточной» форме условно ставится в соответствие «собственная» частота  $\Omega_{пор}$  и коэффициент участия, равный единице.

4. Определяется максимальное модальное ускорение для каждой формы  $j$  по формуле

$$\ddot{Y}_{jk} = S_{ak}(T_j) |q_{jk}| \quad (6)$$

Здесь  $S_{ak}(T_j)$  – спектральное ускорение, соответствующее периоду  $T_j$  и демпфированию в осцилляторах, равному композитному демпфированию по форме  $j$ , для компоненты воздействия  $k$  ( $k=1,2,3$ ).

Значение композитного демпфирования для формы  $j$  определяется усреднением демпфирования в элементах с весами, равными потенциальной энергии упругой деформации элементов в данной форме:

$$\lambda_j = \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi_{ji}^T K_i \varphi_{ji} \right) / \left( \sum_{i=1}^n \varphi_{ji}^T K_i \varphi_{ji} \right) \quad (7)$$

Здесь  $i$  – номер элемента конструкции из однородного материала,  $n$  – общее число таких элементов в системе,  $\lambda_i$  – коэффициент демпфирования для элемента  $i$ , зависящий от его материала и интенсивности воздействия;  $\varphi_{ji}$  – столбец узловых перемещений элемента  $i$  в форме  $j$ ,  $K_i$  – матрица жесткости элемента  $i$ .

При отсутствии данных допускается задавать спектральные ускорения по формулам ( $k=1,2$  – горизонтальные оси;  $k=3$  – вертикальная ось)

$$S_{a1}(T) = S_{a2}(T) = S_a(T); S_{a3}(T) = \frac{2}{3} S_a(T); S_a(T) = A_{max} \beta(T) K_\psi \quad (8)$$

Здесь  $A_{max}$  – максимальное по модулю ускорение горизонтальной компоненты воздействия на поверхности выбранной площадки, определяемое в зависимости от баллов интенсивности;  $\beta(T)$  – нормированный к единичному максимальному ускорению безразмерный спектр ответа горизонтальной компоненты воздействия, соответствующий грунтовым условиям площадки и демпфированию в осцилляторах 5%;  $K_\psi$  – коэффициент пересчета спектра ответа от демпфирования в осцилляторах 5% к композитному демпфированию, соответствующему форме  $j$ . Функция  $\beta(T)$  определяется согласно требованиям п.9 ниже, коэффициент  $K_\psi$  – согласно требованиям п.10 ниже.

5. Определяются инерционные узловые нагрузки, соответствующие форме номер  $j$  и направлению воздействия  $k$ :

$$Q_{jk} = K_0 M \varphi_j \ddot{Y}_{jk} \quad (9)$$

Здесь  $M$  – матрица масс,  $\varphi_j$  – столбец перемещений в нормированной по массе форме или «остаточной» форме, максимальное модальное ускорение определяется по формуле (6),  $K_0$  – коэффициент ответственности сооружения, определяемый согласно требованиям п.11 ниже.

6. Проводится статический расчет системы на нагрузки, определяемые формулой (9). В результате определяются максимальные по модулю модальные усилия  $N_{jk}$  по форме  $j$  в элементах конструкции при воздействии в направлении  $k$ .

7. Результирующее усилие  $N_k$  в выбранном элементе конструкции при воздействии в направлении  $k$  определяется суммированием модальных усилий  $N_{jk}$  по правилу полной квадратичной формы:

$$N_k = K_1 \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} N_{ik} N_{jk} \right]^{0,5} \quad (10)$$

Здесь  $K_1$  – коэффициент нелинейной работы данного элемента конструкции, определяемый согласно требованиям п.11 ниже;  $\varepsilon_{ij}$  – коэффициент корреляции между реакциями по формам  $i$  и  $j$ . Он равен единице при  $i=j$ , а также если разница между частотами  $i$  и  $j$  не превышает 10% от меньшей частоты или если хотя бы одна из двух частот меньше 0,3 Гц. В остальных случаях этот коэффициент допускается принимать равным нулю. В формуле (10) при использовании остаточной формы суммирование следует проводить не до  $n$ , а до  $(n+1)$ . 8. Результирующее усилие  $N$  при трехкомпонентном воздействии определяется по результирующим усилиям  $N_k$  в отдельных направлениях по правилу ККСК (корень квадратный из суммы квадратов):

$$N = \left[ \sum_{k=1}^3 N_k^2 \right]^{0,5} \quad (11)$$

9. Коэффициент  $\beta(T)$  определяется (Можно в первом приближении оставить, как есть, кроме урезания снизу при малых частотах)

10. Коэффициент  $K_\psi$  определяется \_\_\_\_\_. (Можно в первом приближении оставить, как есть)

11. Коэффициент  $K_0$  определяется \_\_\_\_\_. (Можно в первом приближении оставить, как есть)

12. Коэффициент  $K_1$  определяется \_\_\_\_\_. (Можно в первом приближении оставить, как есть)

В комментариях к этим пунктам предлагается написать следующее.

C1. Модальный анализ системы на защемленном фундаменте выполняется для ограниченного количества собственных частот и форм. Применение традиционного модального подхода подразумевает отбрасывание остальных форм. Отметим, что частотный состав воздействия на пороговую частоту в этом случае не влияет. Применение модального подхода с остаточной формой часто позволяет существенно снизить пороговую частоту и тем самым сократить число рассматриваемых форм для сравнительно низкочастотного воздействия. В этом случае остальные формы не отбрасываются полностью, а как бы суммируются вместе со своими коэффициентами участия в общую «остаточную» форму. Реакция по этой форме «квазистатическая», т.е. соответствующее модальное ускорение практически равно ускорению воздействия с небольшим повышающим коэффициентом.

C2. В результате такой нормировки по массе для нормированных форм  $\varphi_j$  выполняется соотношение

$$\varphi_j^T M \varphi_k = \delta_{jk} \quad (C1)$$

Здесь  $\delta_{jk}$  – т.н. символ Кронекера, равный 1 при  $j=k$  и равный 0 в остальных случаях. Кроме того, для нормированных по массе форм выполняется соотношение

$$\varphi_j^T K \varphi_k = \delta_{jk} \Omega_j^2 \quad (C2)$$

Здесь  $K$  – матрица жесткости системы. В большинстве

программ нормировку форм по массе можно заказать при входе в модальный анализ.

C3. В большинстве программ вычисление коэффициентов участия и модальных масс с накоплением можно заказать при входе в модальный анализ. Остаточная форма, определяемая формулой (5), различается для разных направлений воздействия. Поэтому для вычисления реакции по разным направлениям набор из  $n$  собственных форм, одинаковых для трех направлений воздействия, дополняется остаточной формой, различающейся для трех направлений воздействия.

C4. Значение композитного демпфирования для однородных по материалу конструкций (например, стальных или железобетонных) равно значению демпфирования для соответствующего материала и соответствующей интенсивности воздействия. Для не однородных по материалу сооружений значение композитного демпфирования во многих программах вычисляется по формуле (7) автоматически и выдается вместе с собственными частотами по результатам модального анализа.

Если данных о воздействии на поверхности выбранной площадки не хватает для определения спектральных ускорений, допускается использование формулы (8). Коэффициент 2/3 при спектрах вертикальных ускорений относится к площадкам, удаленным от очагов. В эпицентральных зонах (ближе 15 км от очага) следует принимать этот коэффициент равным единице, но предпочтительнее использовать спектры, специально рассчитанные для данной площадки (такие спектры обычно имеют другую форму, чем спектры горизонтальных ускорений). При использовании формулы (8) максимальное ускорение  $A_{max}$  следует принимать по действующей шкале интенсивности. Коэффициент пересчета от демпфирования 5% к другому демпфированию в осцилляторах  $K_\psi$ , вообще говоря, зависит от частоты (при больших частотах он стремится к единице). Однако допускается принимать его приближенно в зависимости только от материала в соответствии с п.10.

C5. Смысл коэффициента  $K_0$  состоит в повышенных требованиях к обеспеченности (вероятности не превышения) принимаемого уровня ускорений воздействия для сооружений повышенной ответственности при сохранении среднего периода повторяемости этих воздействий.

C6. Усилия  $N_{jk}$  имеют для всех форм  $j$  и направлений воздействия  $k$  одинаковый физический смысл (например, это продольные усилия в колонне). При наличии нескольких разных по физическому смыслу усилий в одной конструкции (например, продольной силы и изгибающих моментов) в качестве  $N_{jk}$  может выступать комбинация этих усилий (например, напряжение в углу сечения, определяемое продольной силой и двумя изгибающими моментами).

C7. Смысл коэффициента  $K_1$  состоит в приближенном учете нелинейной работы рассматриваемой конструкции. Смысл коэффициентов  $\varepsilon_{jk}$  в формуле (10) заключается в учете разновременности достижения максимумов усилий в реакции по разным формам. Отсутствие корреляции характеризуется нулевым значением этого коэффициента; в этом случае суммирование (10) превращается в суммирование по правилу ККСК (корня ква-

дратного из суммы квадратов). Полная корреляция характеризуется единичным значением коэффициента; в этом случае суммирование (10) превращается в прямое суммирование модулей. Отметим, что учет корреляции повышает значения результирующих усилий по сравнению с суммированием по правилу ККСК. Допускается использовать для определения коэффициентов  $\epsilon_{jk}$  более сложные зависимости (например, правило Гупты).

С8. Суммирование максимальных реакций на воздействия по трем направлениям проводится по правилу ККСК, т.к. принимается, что эти реакции статистически независимы.

С9. Выражение для нормированного к единичному ускорению спектра оставлено, как было в предыдущих редакциях норм, для сохранения преемственности, за исключением урезания снизу при малых частотах – этот фактор учтен иным образом при суммировании реакций (см. п.7).

С10. Выражение для коэффициента оставлено, как было в предыдущих редакциях норм, для сохранения преемственности.

С11. Выражение для коэффициента оставлено, как было в предыдущих редакциях норм, для сохранения преемственности.

С12. Выражение для коэффициента оставлено, как было в предыдущих редакциях норм, для сохранения преемственности.

Несложно показать [1], что в случае диагональной матрицы масс и использования формулы (8) с единичным коэффициентом при спектре вертикальных ускорений

полученный результат для отдельно взятой формы будет в точности соответствовать результату использования прежней редакции норм [2] (после выбора «опасного направления сейсмического воздействия»).

Как проверить состоятельность предложенных положений? Автор предлагает сделать это на примере модального расчета сооружения с однородным демпфированием на трехкомпонентную акселерограмму. Максимальные усилия будут, с одной стороны, вычислены во времени, а с другой стороны – вычислены линейно-спектральным методом согласно изложенным выше требованиям пп.1–12. Формулу (6) будем использовать без формулы (8): непосредственно вычислим спектры по компонентам акселерограммы. Значение коэффициента  $K_{\psi}$  нам не нужно, поскольку формула (6) не используется (зададим демпфирование в сооружении и спектры ответа вычислим для того же значения демпфирования); значения коэффициентов  $K_0, K_1$  примем равными единице. Тогда модальные усилия  $N_{jk}$  будут вычислены в линейно-спектральном методе точно (т.е. они будут соответствовать максимальным модальным усилиям при расчете во времени). Единственным источником различий между расчетом во времени и линейно-спектральным расчетом останется статистическая погрешность при использовании формул (10,11) для суммирования реакций по отдельным формам.

Разумеется, расчет с использованием формулы (8) вместо точных спектров приведет к дополнительным различиям именно в силу разницы в спектрах.

Автор рассматривает предложенный текст как первое приближение, которое, однако, может служить основой для дальнейшего обсуждения.

### Литература

1. Тяпин А.Г. «Опасные направления сейсмического воздействия» в линейно-спектральных расчетах // Сейсмостойкое строи-

тельство. Безопасность сооружений. 2019. № 3. С.18-25.

2. Свод правил СП 14.13330.2018. «Строительство в сейсмических районах» СНиП

II-7-81\*. Издание официальное. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства. 2018.

### References

1. Tyapin A.G. «Opasnye napravleniia seismicheskogo vozdeistviya» v lineino-spektral'nykh raschetakh. Seismostoikoe

stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety], 2019, no. 3, pp.18-25. [In Russian]

2. Svod pravil SP 14.13330.2018. «Stroitel'stvo

v seismicheskikh raionakh» SNiP II-7-81\*. Izdanie ofitsial'noe. M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishhno-kommunal'nogo khozyaistva. 2018.

**Для цитирования:** Тяпин А.Г. Некоторые соображения о нормах нового поколения. Часть I: общие положения и задание сейсмического воздействия. Часть II: определение сейсмических усилий в линейно-спектральном методе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 5. С. 7-18.

**For citation:** Tyapin A.G. Some Comments on the New Generation of Standards in Earthquake Engineering. Part I: General Requirements and Seismic Input. Part II: Seismic Forces in Linear-spectral Method. Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii [Earthquake engineering. Constructions safety], 2019, no. 5, pp. 7-18. (In Russian).