

**А. Г. ТЯПИН**

доктор технических наук

**А. С. ТОПОРКОВ**

ведущий инженер

АО «Атомэнергoproject», г. Москва

УДК 624.042.7

## МАКСИМАЛЬНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УСИЛИЯ ПОД ПОДОШВОЙ: РАЗНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ НА СДВИГ И ПОТЕНЦИАЛА ОТРЫВА ПО ПОДОШВЕ ФУНДАМЕНТА

В статье обсуждаются вопросы проверки устойчивости фундаментов ответственных сооружений на сдвиг по подошве при сейсмических воздействиях и оценки потенциала отрыва от грунта при качании. Результаты вычислений с использованием шестикомпонентных реализаций интегральных сил под подошвой во времени сравниваются с приближенными подходами, в которых используются только максимальные модули этих сил за время реакции. Проверяется правомерность применения обобщенного правила Ньюмарка (иногда его называют правилом 100-40-40), согласно которому в тот момент, когда одна компонента силы достигает своего максимального модуля, остальные компоненты (статистически не зависящие от первой) достигают примерно 40% своих максимальных модулей. Вторая неявная часть этого же правила состоит в допущении, что путем перебора сочетаний максимумов каждой по очереди компоненты силы и 40% максимумов остальных компонент можно оценить максимальные значения целевой функции. В статье рассмотрено 12 расчетных случаев: четыре варианта воздействий по три грунтовых профиля для каждого. Оказывается, что для сдвига по подошве и целевой функции в виде максимального по времени отношения модуля вектора сдвигающей силы к прижимающей силе приближенный подход с использованием обобщенного правила Ньюмарка дает неплохие результаты. Однако для качания и целевой функции в виде максимальной по времени доли площади подошвы, по которой при полном контакте вертикальные напряжения

оказались растягивающими, ситуация не такая: результаты приближенного подхода оказываются неконсервативными. Из двух допущений, как оказалось, не выполняется второе: максимум целевой функции достигается в момент, не совпадающий с моментами достижения максимумов отдельных компонент сил, и максимальное по времени значение целевой функции заметно больше всех значений в моменты достижения максимумов отдельных компонент. Для восстановления консерватизма приближенного подхода предлагается применять правило Ньюмарка только к качательным моментам, а максимум вертикальной силы при этом учитывать полностью.

**Ключевые слова:** сейсмическая реакция, взаимодействие сооружений с основанием, сдвиг по подошве, потенциал отрыва при качании, обобщенное правило Ньюмарка.

Одним из этапов расчетов ответственных сооружений на сейсмические воздействия является оценка устойчивости фундамента на сдвиг на грунтовом основании. Для этой оценки необходимо знать сдвигающие усилия, а также вертикальное сейсмическое усилие, способное ослабить прижимающую сооружению к основанию вертикальную силу, возникающую от веса сооружения. Максимальные сдвигающие усилия работают в векторном формате, т.е. важно не направление сдвига в

плане, а модуль вектора интегральной сдвигающей силы. Ключевым параметром является отношение модуля сдвигающей силы к прижимающей вертикальной силе.

Второй проводимой проверкой является оценка потенциала отрыва подошвы фундамента от грунта. Полный отрыв практически никогда не встречается при рассматриваемых интенсивностях сейсмического воздействия, зато часто встречается частичный отрыв, порождаемый качанием, а также тем фактом, что грунт практически не работает на растяжение.

Применяемый для расчета комбинированный асимптотический метод (КАМ) [1] позволяет получить реализации во времени всех шести компонент интегральных сил под жесткой фундаментной плитой сооружения. Однако на практике для расчетов традиционно используются только максимальные модули этих сил, вычисляемые вдоль главных осей сооружения. В настоящей статье проверяется точность используемых приближенных подходов, основанных на максимальных по модулю значениях сил, путем сравнения с «эталонными» результатами, основанными на реализациях во времени.

Начнем с проверки на сдвиг по подошве. В качестве подхода номер 1 будем использовать расчет модуля сдвигающей силы, выполненный во времени. Это означает, что по КАМ рассчитаны шестикомпонентные реализации интегральных сил под подошвой сооружения, и по двум горизонтальным компонентам в каждый момент времени вычисляется модуль вектора сдвигающей силы. Затем выбирается максимальный по времени модуль сдвигающей силы. Кроме модуля сдвигающей силы, в каждый момент времени опре-

деляется вертикальная прижимающая сила – она получается вычитанием из веса сооружения (взятого с консервативным коэффициентом 0,9) сейсмической вертикальной силы. Далее в каждый момент времени определяется отношение сдвигающей силы к вертикальной силе. В заключение выбирается максимальное по времени такое отношение. Отметим, что момент наступления максимального отношения сдвиговой силы к прижимающей силе не обязательно совпадает с моментом реализации максимальной сдвиговой силы, поскольку вертикальная сейсмическая сила тоже меняется во времени.

В качестве подхода номер 2 будем использовать подход, также основанный на реализациях во времени. От подхода номер 1 он отличается тем, что в качестве вертикальной прижимающей силы рассматривается разность силы, вызванной весом, и 40% максимальной вертикальной сейсмической силы. Здесь используется имеющее статистический смысл допущение Ньюмарка о том, что в момент, когда одна компонента достигает своего максимального по модулю значения, другая компонента, статистически независимая от первой, достигает примерно 40% своего максимального значения. Таким образом, из реализаций во времени берется только максимальный модуль сдвигающей силы – он не обязательно достигается в тот же момент, когда достигаются максимумы отдельных компонент сдвигающей силы вдоль осей координат. Для вертикальной сейсмической силы используется только максимальный модуль.

В качестве подхода номер 3 рассматривается модификация подхода номер 2, в которой максимальная сдвигающая сила приближенно вычисляется не из реализации во

**Таблица 1** — Максимальное отношение сдвигающей силы к прижимающей силе

	Подход 1	Подход 2	Подход 3а	Подход 3б
1m	0,39068	0,40585	0,34134	<b>0,39725</b>
1s	0,38216	0,38824	0,33065	<b>0,38257</b>
1r	0,38305	0,39801	0,36051	<b>0,39422</b>
2m	0,33633	0,35655	0,31343	<b>0,35674</b>
2s	0,33747	0,35586	0,29173	<b>0,35341</b>
2r	0,33137	0,35179	0,31553	<b>0,35262</b>
3m	0,37258	0,39067	0,32136	<b>0,38476</b>
3s	0,36089	0,37110	0,30778	<b>0,36772</b>
3r	0,36554	0,38505	0,34380	<b>0,38402</b>
4m	0,40339	0,39649	0,39331	<b>0,39582</b>
4s	0,33809	0,34703	0,35450	<b>0,36214</b>
4r	0,46007	0,47031	0,42244	<b>0,45366</b>

## ДОЛЯ РАСТЯНУТОЙ ПЛОЩАДИ

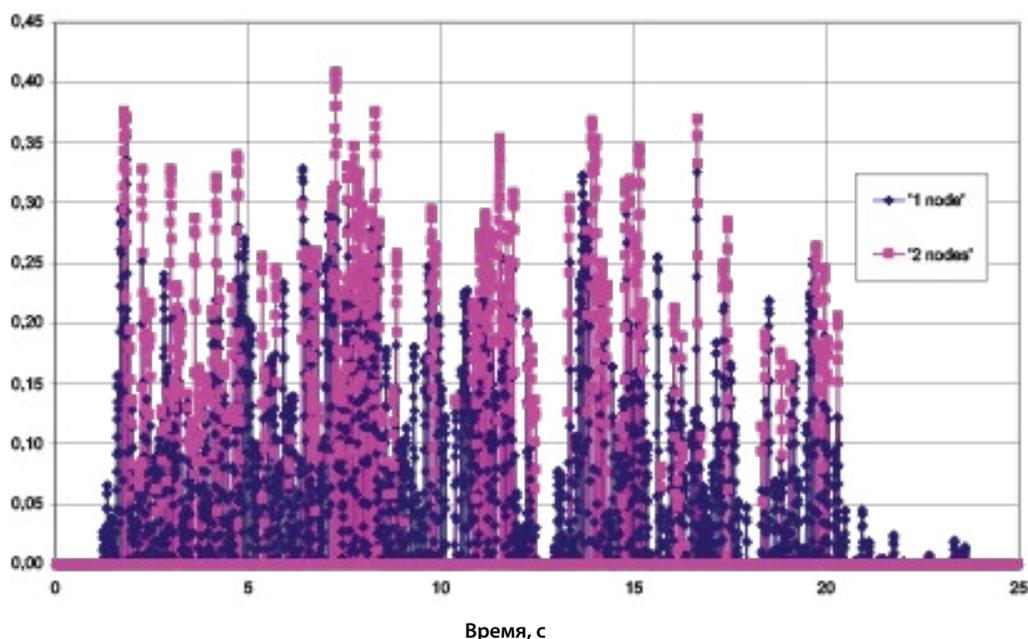


Рисунок 1 — Отношение растянутой площади к общей площади для расчета 1s

времени, а как квадратный корень из суммы квадратов наибольшей (в терминах максимального по времени модуля) из двух горизонтальных компонент силы и 40% второй горизонтальной составляющей. В основе этого подхода снова лежит допущение о том, что в тот момент, когда одна горизонтальная компонента достигает своего максимума, вторая горизонтальная компонента достигает 40% такого максимума. Естественным образом подход 3 можно реализовать как определение двух разных результатов в зависимости от того, к какой из горизонтальных компонент применен коэффициент 1,0. Обозначим через 3а результат, полученный с применением коэффициента 1,0 к компоненте по оси Ох (соответственно к компоненте по оси Оу применен коэффициент 0,4). Альтернативный вариант, когда коэффициент 1,0 применен к компоненте горизонтальной силы вдоль оси Оу, а к компоненте вдоль оси Ох применен коэффициент 0,4, обозначим через 3б. Общий результат подхода 3 определяется выбором наибольшего значения из 3а и 3б.

Принципиальное отличие подхода 3 от подходов 1 и 2 заключается в том, что в подходе 3 используются только максимальные по модулю значения сейсмических интегральных сил под подошвой. С другой стороны, по отношению к «эталонному» подходу 1 подход 3 является приближенным.

Оценим погрешность подходов 2 и 3 по отношению к подходу 1 на примере расчета ответственного сооружения на 12 разных вариантах грунтового основания. Эти 12 вариантов получились варьированием в обе стороны жесткостей четырех основных грунтовых профилей. Соответственно обозначения вариантов включают в себя номера основных профилей (от 1 до 4) и буквенные обозначения их вариаций (m – базовый профиль; s – мягкий профиль, полученный уменьшением всех модулей в полтора раза по сравнению с базовым профилем; r – жесткий профиль, полученный увеличением всех модулей в полтора раза по сравнению с базовым профилем).

Что касается физических характеристик, то четыре базовых профиля различны между собой и охватывают достаточно широкий диапазон свойств реальных оснований. Профиль 2 скальный – жесткий и почти однородный по глубине. Профиль 4 – слоистый с мягкими грунтами в верхней части. Профили 1 и 3 тоже слоистые, но грунты в верхней части не такие мягкие.

Фундаментная плита рассматриваемого сооружения является прямоугольной в плане.

Сейсмические воздействия различаются для четырех основных профилей, но остаются общими для трех вариаций каждого базового профиля. Максимальное горизонтальное ускорение на свободной поверхности грунтового основания составляет порядка 0,2 g. Продолжительность воздействия и реакции составила примерно 32,8 с.

В таблице 1 приведем значения максимального отношения сдвигающей силы к прижимающей силе для указанных двенадцати расчетов. Из двух результатов подхода 3 выделим максимальное значение жирным шрифтом.

Сравнение подхода 2 с подходом 1 показывает, что подход 2 практически всегда консервативен (с весьма небольшим запасом, вполне пригодным для инженерных расчетов). Единственное исключение – вариант основания 4m, но и там неконсерватизм оказывается в пределах 2%. Но подход 2, к сожалению, не избавляет от необходимости анализа всей реализации усилий по времени.

Сравнение выделенных результатов подхода 3 (с выделением максимумов из последних двух столбцов 3а и 3б) с подходом 1 показывает, что в целом подход 3 тоже консервативен по отношению к подходу 1, но степень консерватизма несколько меньше, чем в подходе 2. Двумя неконсервативными исключениями являются по-прежнему вариант основания 4m, а также вариант 4r, однако неконсерватизм все еще остается в пределах 2%. Еще в трех вариантах осно-

вания (2m, 2r и 4s) подход 3 оказался несколько консервативнее подхода 2. В нашем случае из двух столбцов в подходе 3 вариант 3б всюду дал бОльшие значения, чем вариант 3а. Это вызвано особенностями верхнего строения.

В целом, по мнению авторов, проведенный анализ подтверждает (не доказывает, а именно подтверждает, т.к. используются допущения, имеющие статистическое обоснование) применимость инженерного подхода 3 к оценке максимального соотношения сдвигающей силы по подошве к прижимающей силе.

Теперь обратимся к исследованию потенциала отрыва подошвы от грунта при качании. Расчет по КАМ, напомним, проводился в предположении о полном контакте подошвы фундамента с грунтом. Первое приближение состоит в том, чтобы на основе полученных результатов рассчитать, какая часть площади подошвы при этом полном контакте окажется под действием растягивающих напряжений со стороны грунта. Простейшей гипотезой при таком расчете является равномерное распределение по площади напряжений от вертикальной интегральной силы (состоящей из веса с коэффициентом 0,9 и сейсмической вертикальной силы) и линейное по координатам распределение вертикальных напряжений от качающих моментов в главных вертикальных плоскостях. Общее распределение вертикальных напряжений по подошве оказывается линейным по координатам, т.е. граница растянутой зоны является прямой линией.

По аналогии с предыдущим случаем подходом 1 будем называть «эталонное» рассмотрение реализаций по времени и сил, и моментов. Авторы написали простую программу, которая в каждый момент времени по весу, вертикальной сейс-

мической силе и двум качательным моментам определяет «растянутую» площадь в отношении к общей площади подошвы. При этом пришлось различить случаи, когда а) растянутая площадь представляет собой треугольник; б) растянутая площадь представляет собой трапецию; в) сжатая площадь представляет собой треугольник, а растянутая – пятиугольник; г) вся подошва оказывается «растянутой площадью». В варианте а) в зону растяжения попадает один угол плиты, в варианте б) – два угла, в варианте в) – три угла, а в варианте г) все четыре угла оказываются в зоне растяжения.

При исходном воздействии оказалось, что реализуется только вариант а) (результаты будут приведены ниже). Растянутая площадь остается в пределах 7% от общей площади, что намного меньше представляющего практический интерес порога в 30%. Поэтому для целей исследования было решено увеличить в каждый момент времени все сейсмические силы и моменты под подошвой в четыре раза по сравнению с исходными силами. При этом, как показали расчеты, помимо варианта а) в какие-то отрезки времени реализуется и вариант б).

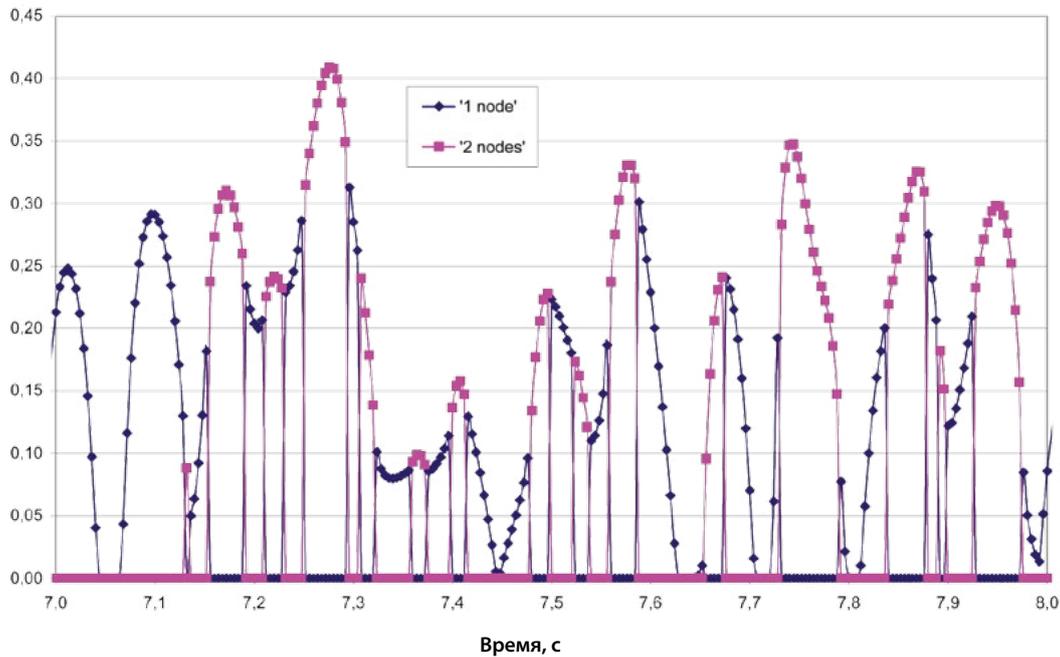
На рис.1 показано отношение растянутой площади к общей площади для расчета на грунтовом профиле 1s. После 25 секунд растянутая зона больше на подошве не появляется. Вариант а) обозначен '1 node'; вариант б) обозначен '2 nodes'.

Рисунок 2 – тот же рисунок 1, на котором выделена одна секунда реализации таким образом, чтобы масштаб по времени (шаг 0,004 с) позволил рассмотреть переход варианта а) в вариант б) и обратно. Как видим, в рассматриваемом случае максимальное отношение растянутой площади к общей площади подошвы составило примерно 0,41 и реали-

**Таблица 2** — Максимальное отношение площади с растягивающими напряжениями к общей площади подошвы фундамента при учетверенном воздействии

Основание	Подход 1	Подход 2	Подход 3а	Подход 3б
1m	0,41006	0,38569	<b>0,38569</b>	0,36139
1s	0,40409	0,37682	<b>0,37682</b>	0,34288
1r	0,42242	0,39283	<b>0,39283</b>	0,37018
2m	0,39846	0,37100	<b>0,37100</b>	0,34004
2s	0,37662	0,36112	<b>0,36112</b>	0,32879
2r	0,40173	0,37391	<b>0,37391</b>	0,34252
3m	0,40171	0,37814	<b>0,37814</b>	0,35149
3s	0,39395	0,36842	<b>0,36842</b>	0,33185
3r	0,41696	0,38779	<b>0,38779</b>	0,36249
4m	0,41770	0,38635	0,37990	<b>0,38635</b>
4s	0,38158	0,38504	<b>0,38504</b>	0,36582
4r	0,43629	0,40256	<b>0,40256</b>	0,38756

## ДОЛЯ РАСТЯНУТОЙ ПЛОЩАДИ



**Рисунок 2** — Отношение растянутой площади к общей площади для расчета 1s в выделенный отрезок времени

зовалось в варианте б). Варианты в) и г) в рассматриваемом случае не реализуются. Отметим, что для реализации варианта в) отношение растянутой площади к общей площади по геометрическим соображениям должно быть больше 0,5. Для варианта г) это отношение равно единице.

Будем следовать той же логике, что и в случае со сдвигом по подошве. Подходом 2 назовем модификацию подхода 1 с заменой меняющейся по времени вертикальной сейсмической силы на постоянную растягивающую силу, равную 40% от максимальной растягивающей силы. Качательные сейсмические моменты пока будем брать из реализации по времени.

Подходом 3 назовем модификацию подхода 2, в которой качательные моменты, как и вертикальная сила, представлены только своими максимальными модулями. Снова будем использовать допущение Ньюмарка о 40% и рассматривать два результата. Первый результат получим при максимальном качательном моменте относительно оси Ох, принимаемом с коэффициентом 1,0, а также при максимальном качательном моменте относительно оси Оу, принимаемом с коэффициентом 0,4 (назовем этот подход подходом 3а). Второй результат получим при максимальном качательном моменте относительно оси Оу, принимаемом с коэффициентом 1,0, а также при максимальном качательном моменте относительно оси Ох, принимаемом с коэффициентом 0,4 (назовем этот подход подходом 3б).

В Таблицу 2 сведем результаты всех подходов.

Прежде всего, прокомментируем совпадение результатов подхода 2 и одного из столбцов подхода 3 (почти всюду — 3а, но в одном варианте 4т — 3б). Это совпадение заставило авторов глубже разобраться в происходящем. Для начала отметим, что в подходах 2 и 3 полностью совпадают вертикальные силы — в обоих случаях используется вес (с коэффициентом 0,9) и максимальная по модулю вертикальная сейсмическая сила (с коэффициентом 0,4). Что касается

качательных моментов, то они в подходах 2 и 3 разные. Оказалось, что в подходе 2 максимальное отношение площадей достигается в момент достижения максимума одного из качательных моментов. Таким образом, разница состоит только во втором (как бы «побочном») качательном моменте, который в подходе 3 используется как максимальное значение с коэффициентом 0,4, а в подходе 2 берется из реализации во времени. С точки зрения геометрии, максимум отношения площадей в описанных случаях всегда реализуется по варианту б), т.е. два угла платформы оказываются в растянутой зоне, а другие два — в сжатой. Растянутая зона представляет собой трапецию. Площадь этой трапеции определяется длиной ребра, целиком оказавшегося в растянутой зоне, а также высотой трапеции, определяемой по средней линии. Но при этом оказывается, что при данной высоте площадь трапеции не зависит от угла наклона «косой» границы (пока трапеция остается трапецией, а не переходит в треугольник). И вот тут выясняется, что «побочный» качательный момент вообще не влияет на высоту трапеции — он влияет как раз только на наклон «косой» границы. Таким образом, разница в «побочном» качательном моменте не влияет на площадь растянутой зоны — в этом и состоит причина совпадения результата подхода 2 с одним из вариантов подхода 3 (т.е. результаты расчета растянутой площади совпадают при несовпадении «побочных» качательных моментов). Следствием этого совпадения является одинаковый консерватизм или неконсерватизм подхода 2 и подхода 3 (после выбора максимума из результатов 3а и 3б). Напомним, что этот эффект проявляется, когда растянутая зона представляет собой трапецию, а не треугольник, т.е. для этого необходима определенная интенсивность воздействия.

Как видно из таблицы, подходы 2 и 3 оказались неконсервативными при оценке максимального отношения площадей растянутой зоны. Неконсерватизм носит системати-

**Таблица 3** — Моменты времени и значения максимальных по модулю сил под подошвой в варианте основания 4r при учетверенном воздействии

	Точка по времени	Модуль Fz	Точка по времени	Модуль Mxx	Точка по времени	Модуль Muu
Раздельные максимумы сил	1144	0,67854E6	1985	0,33506E8	1796	0,31855E8
Момент максимума растянутой площади в подходе 2	1985	0,36101E6	1985	0,33506E8	1985	0,15715E8
Проценты максимума модулей сил в подходе 2		53,204%		100%		49,333%
Момент максимума растянутой площади в подходе 1	1821	0,60090E6	1821	0,36005E7	1821	0,26718E8
Проценты максимума модулей сил в подходе 1		88,558%		10,746%		83,874%

**Таблица 4** — Максимальное отношение площади с растягивающими напряжениями к общей площади подошвы фундамента при учетверенном воздействии

Основание	Подход 1	Подход 4	Подход 5a	Подход 5b
1m	0,41006	0,44977	<b>0,44977</b>	0,43908
1s	0,40409	0,44248	<b>0,44248</b>	0,42664
1r	0,42242	0,45243	<b>0,45243</b>	0,44238
2m	0,39846	0,43285	<b>0,43285</b>	0,41674
2s	0,37662	0,42693	<b>0,42693</b>	0,40992
2r	0,40173	0,43626	<b>0,43626</b>	0,42040
3m	0,40171	0,44297	<b>0,44297</b>	0,43049
3s	0,39395	0,43555	<b>0,43555</b>	0,41763
3r	0,41696	0,44900	<b>0,44900</b>	0,43750
4m	0,41770	0,45691	0,45446	<b>0,45691</b>
4s	0,38158	0,45073	<b>0,45073</b>	0,44250
4r	0,43629	0,46514	<b>0,46514</b>	0,45977

**Таблица 5** — Максимальное отношение площади с растягивающими напряжениями к общей площади подошвы фундамента при исходном воздействии

Основание	Подход 1	Подход 4	Подход 5а	Подход 5б
1m	0,13057E-1	0,47489E-1	<b>0,31268E-1</b>	0,12558E-1
1s	0,56852E-2	0,30357E-1	<b>0,15449E-1</b>	0,18029E-2
1r	0,18062E-1	0,62348E-1	<b>0,47348E-1</b>	0,23464E-1
2m	0,17601E-2	0,25900E-1	<b>0,10790E-1</b>	0,99814E-3
2s	0,0	0,11270E-1	<b>0,25779E-2</b>	0,0
2r	0,30870E-2	0,35784E-1	<b>0,13621E-1</b>	0,17648E-2
3m	0,47881E-2	0,33121E-1	<b>0,19056E-1</b>	0,51254E-2
3s	0,43154E-3	0,19730E-1	<b>0,63548E-2</b>	0,0
3r	0,12803E-1	0,51544E-1	<b>0,35929E-1</b>	0,14696E-1
4m	0,10177E-1	0,41454E-1	0,28929E-1	<b>0,35576E-1</b>
4s	0,11946E-2	0,19868E-1	<b>0,31014E-1</b>	0,15428E-1
4r	0,35110E-1	0,82053E-1	<b>0,70447E-1</b>	0,47241E-1

ческий характер. Дополнительное исследование показало природу этого неконсерватизма. Допущение Ньюмарка про 40% в целом не сильно нарушается в том смысле, что в момент достижения одним из качательных моментов своего максимума другой качательный момент, а также вертикальная сейсмическая сила достигают примерно 40% своих максимумов. Кроме того, как мы видели, «побочный» качательный момент даже при отклонении от 40% максимума не влияет на растянутую площадь. Однако проблема в том, что «истинная» максимальная растянутая площадь (в подходе 1) реализуется совсем в другой момент времени, когда соотношение сил другое. Иллюстрация приведена ниже в Таблице 3 на примере варианта основания 4r.

Как видим в Таблице 3, в подходе 1 максимальная растянутая площадь реализовалась в момент времени, когда и растягивающая сейсмическая сила и один из качательных моментов одновременно превышали 80% своих максимумов. Второй качательный момент в это время был небольшим, но, как указывалось выше, в варианте с трапециевидальной растянутой площадью он вообще роли не играет.

Таким образом, подход с применением обобщенного правила Ньюмарка в данном случае не дал удовлетворительных результатов. И дело не в том, что Ньюмарк ошибался в предложенном им правиле 100-40-40. Проблема в самом виде целевой функции, которую мы вычисляем по статистически независимым слагаемым. Если эта функция достаточно гладкая (как, например, в случае применения правила ККСК или при простом суммировании), «истинный» ее максимум не слишком отличается от значений функции в те моменты, когда своих максимумов достигают отдельные

компоненты (а остальные компоненты при этом достигают примерно 40% своих максимумов). По крайней мере, среди различных сочетаний максимальное значение будет достаточно близко к истинному максимуму. Исторически правило Ньюмарка вообще применялось к вычислению максимума модуля только линейной комбинации статистически независимых параметров. Рассмотренный пример показывает, что с обобщением этого правила на другие случаи надо быть очень осторожным. Если вместо линейной комбинации или корня квадратного из суммы квадратов в качестве целевой функции выступает более сложная функция (как это произошло в нашем случае), перебор точек с максимумами отдельных компонент может не дать хорошей оценки максимума этой функции.

Есть ли возможность все-таки получить консервативные оценки растянутой площади с использованием максимальных усилий под подошвой? Попробуем модифицировать подходы 2 и 3, используя в качестве вертикальной сейсмической силы не 40% максимума, как раньше, а все 100%. Такую модификацию подхода 2 будем называть подходом 4, а модификацию подхода 3 – подходом 5. Результаты сведем в таблицу 4. Первый столбец в ней такой же, как в таблице 2, – это «эталонное» решение, полученное в подходе 1.

Как видим, результаты подходов 4 и 5 по отношению к результатам подхода 1 теперь всюду консервативны. Уровень консерватизма не превышает примерно 15%.

Для проверки проведем еще одну серию расчетов при исходном сейсмическом воздействии, отказавшись от его учетверения. В этом случае, как отмечалось выше, растянутая площадь значительно сокращается и всегда остается

треугольной (по геометрическому варианту а). Результаты сведем в таблицу 5, аналогичную по формату таблице 4.

Прежде всего, отметим, что при смене формы растянутой площади с трапеции на треугольник равенство результатов в подходах 4 и 5 пропало. Причины пояснены выше – они чисто геометрические. Отметим также, что подход 5 (как и подход 4) оценивает результаты с большим консерватизмом (по сравнению с эталонным подходом 1). С инженерной точки зрения, такой консерватизм представляется в данном случае допустимым – речь идет об очень маленьких «растянутых» площадях (в пределах 7% общей площади при консервативной оценке 5а; в реальности в пределах 4% в подходе 1), что не должно практически влиять на расчеты конструкций.

В заключение сделаем общее замечание об отрыве подошвы от основания. Отождествлять рассмотренную выше «растянутую» площадь (т.е. часть площади подошвы с растягивающими вертикальными напряжениями, вычисленными в предположении о полном контакте) с площадью отрыва в общем случае нельзя – это лишь грубая оценка площади отрыва в первом приближении. Дело в том, что при реальном отрыве растягивающих напряжений на «растянутой площади» не будет – вместо них будут нулевые вертикальные напряжения. Но это приведет к тому, что равнодействующие сжимающих напряжений, вычисленные отдельно только по «сжатой» площади, больше не будут равны тем интегральным усилиям (вертикальной силе и двум качательным моментам), которые закладывались в расчет. Поэтому при заданных интегральных силах под подошвой напряжения перераспределятся по сравнению с результатами проведенных выше расчетов. Судя по всему, при этом «сжатая» площадь несколько увеличится, так что те оценки «растянутой» площади, которые получены выше, окажутся несколько завышенными. Изменения коснутся и сдвигающих напряжений – ведь при отрыве соответствующая часть площади перестанет работать и на сдвиг.

С ростом интенсивности воздействия отрыв начнет оказывать обратное влияние на колебания верхнего строения,

т.е. и сами интегральные силы под подошвой, которые воспринимались выше как заданные во времени и неизменные, станут другими. Именно поэтому нормы обычно устанавливают предел интенсивности воздействия (оцениваемый по «растянутой» площади), до которого можно использовать допущение о полном контакте при расчете реакции верхнего строения. Обычно этот предел составляет 25-30%.

Другой вариант технического решения – добиваться сохранения подобия полного контакта фундамента с основанием при качании путем, например, анкеровки краевых областей фундаментной плиты в подстилающей скале. Тогда в растянутой области на растяжение будут работать анкера, а в сжатой области – грунт. При этом сами области мало изменятся по сравнению со случаем полного контакта, рассмотренным в проведенных выше расчетах.

Перейдем к выводам. Сравнение инженерных методик, использующих максимальные значения сил под подошвой, с более продвинутыми расчетами, использующими реализации этих сил во времени, показало следующие результаты.

1. При оценке максимального отношения модуля сдвигающей силы к модулю прижимающей силы допустимо использовать инженерную методику с максимальными силами, в которой и вертикальная сила, и «побочная» горизонтальная сила принимаются с коэффициентами 0,4, а «основная» горизонтальная сила принимается с коэффициентом 1,0. При этом перебором вариантов определяется максимальное из двух значений.
2. При оценке максимальной площади, по которой при полном контакте подошвы с грунтом действуют растягивающие напряжения, допустимо применять инженерную методику с максимальными качательными моментами и максимальной вертикальной силой, в которой «побочный» качательный момент принимается с коэффициентом 0,4, а «основной» момент принимается с коэффициентом 1,0. Однако вертикальную силу нельзя принимать с коэффициентом 0,4 – рекомендуется значение 1,0. Снова потребуется выбор максимального из двух результатов.

### Литература

1. Тяпин А.Г. Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на

сейсмические воздействия. Руководство по расчетам. М.: Издательство АСВ. 2014. 136 с.

Материалы хранятся по адресу:  
105005, г. Москва, Бакунинская ул., 7, стр.  
(АО «Атомэнергопроект»)  
тел.: (499)267-35-03, e-mail: atyapin@bvsr

TYAPIN A., D. Sc., JSC "Atomenergoproject", Moscow

TOPORKOV A., lead engineer JSC "Atomenergoproject", Moscow

## MAXIMAL INTEGRAL FORCES UNDER THE BASE: DIFFERENT ESTIMATES OF SHEAR STABILITY AND POTENTIAL UPLIFT

### Abstract

The authors discuss different estimates of shear stability and potential uplift during seismic events. They compare the results obtained with 6D time-histories of integral seismic forces under the base to the approximate estimates obtained with maximal

integral forces only. The goal is to estimate the applicability of extended Newmark rule (sometimes called 100-40-40 rule). In fact, this rule is based on two assumptions. First, when each of several statistically independent components reaches its' maximal absolute value, the other components reach about 40% of their maximal absolute values. Second, absolute maximum

of the target function of these components may be estimated after comparing target functions in specific time points mentioned above, when one component reaches its maximum, and all other components reach 40% of their maximums. In the paper twelve cases were studied (four different seismic excitations and three soil profiles for each of them). For base shear the target function is ratio of the absolute value of the shear force vector to the compression force consisting of dead weight and vertical seismic force. It turned out that the approximate approach described above gave good results for this target function. For the potential uplift estimates the target function is an area where vertical stresses due to the seismic base rocking turned to be tensile. Here the same 100-40-40 approach

gave non-conservative results. It turned out, that the first assumption mentioned above was more or less applicable, but the second assumption was not valid. Maximal target function was actually reached in the time point different from each of the time points with single maximal components, and maximal target function was considerably greater than each of the target functions in these specific "partial" time points. To restore the conservatism of the approximate estimate one has to apply Newmark rule only to the rocking moments, and seismic vertical force has to be considered in full.

**Keywords:** seismic response, soil-structure interaction, base shear, potential uplift, extended Newmark rule.

## References

1. Tyapin A.G. Uchet vzaimodeistviia sooruzhenii s osnovaniem pri raschetah na seismicheskie vozdeistviia. Rukovodstvo po raschetam [Seismic analysis of structures considering soil-structure interaction. Manual for analysis]. M.: Izdatelstvo ASV. 2014. 136 p. (In Russian)

**Для цитирования:** Тяпин А. Г. Топорков А. С. Максимальные интегральные усилия под подошвой: разные методы оценки устойчивости на сдвиг и потенциала отрыва по подошве фундамента//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 3. С. 15-23.

**For citation:** Tyapin A. G., Toporkov A. S. Maximal integral forces under the base: different estimates of shear stability and potential uplift // *Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2018, no. 3, pp. 15-23. (In Russian).

## КНИЖНЫЕ НОВИНКИ

**Тяпин А. Г.**  
**СОВРЕМЕННЫЕ НОРМАТИВНЫЕ**  
**ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ОТВЕТСТВЕННЫХ**  
**СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**  
**М.: Издательство АСВ, 2018. 518 с.**



В издательстве АСВ вышла в свет четвертая монография д. т. н. А.Г. Тяпина, на этот раз посвященная новым тенденциям в американских нормах расчета сооружений ядерных объектов на сейсмические воздействия. В 2017 году опубликована новая редакция стандарта ASCE4-16. Зная ту огромную роль, которую сыграла предыдущая редакция этого стандарта (ASCE4-98), автор полагает, что в ближайшие годы новая редакция также станет индустриальным стандартом по всему миру. С учетом большого количества зарубежных проектов Росатома, отечественным специалистам важно знать, какие новшества появились в новой редакции, чтобы работать с зарубежными заказчиками. Кроме того, ряд уникальных гражданских сооружений уже сопоставим с сооружениями ядерных объектов по своим размерам, жесткостям и массам, поэтому нормы атомной отрасли в части сейсмических расчетов могут, по мнению автора, использоваться и для подобных гражданских объектов.

Сравнительный анализ новых нормативных документов и документов прежнего поколения, проводимый автором в данной монографии, представляет интерес для студентов и аспирантов, готовящихся к работе в этой отрасли, а также для преподавателей строительных ВУЗов. По вопросам заказа монографии можно обращаться в издательство АСВ E-mail: [iasv@iasv.ru](mailto:iasv@iasv.ru), тел. 8(925)084-74-24.