Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2026, Том 18, № 5 / 2026, Vol. 18, Iss. 5 https://esj.today/issue-5-2026.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/14SAVN526.pdf

DOI: 10.15862/14SAVN526 (https://doi.org/10.15862/14SAVN526)

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Кириллов, А. М. Сейсмика высотных зданий с бассейнами в верхней части / А. М. Кириллов // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 5. — URL: https://esj.today/PDF/14SAVN526.pdf. DOI: 10.15862/14SAVN526.

For citation:
Kirillov A.M. Seismic response of high-rise buildings with rooftop swimming pools. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(5): 14SAVN526. Available at: https://esj.today/PDF/14SAVN526.pdf. DOI: 10.15862/14SAVN526. (In Russ., abstract in Eng.).

Выражаю благодарность кандидату технических наук, доценту каф. строительства и сервиса Сочинского государственного университета, Иваненко Николаю Алексеевичу, за общую постановку задачи и помощь с литературными источниками

УДК 699.841

Кириллов Андрей Михайлович
ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, Россия
Доцент
Кандидат физико-математических наук
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7651-1534
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=38847
WoS: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/D-1235-2016
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102546144
Google Академия: https://scholar.google.ru/citations?user=qM3HDIUAAAAJ

Сейсмика высотных зданий с бассейнами в верхней части

Аннотация. Исследуется проблема сейсмостойкости высотных зданий, оборудованных бассейнами на верхних этажах. Подвижная масса воды при сейсмическом воздействии приводит к возникновению сложных динамических нагрузок, изменению положения центра тяжести системы «здание-вода» и требует особого учёта при расчётах на прочность, жёсткость и устойчивость конструкций. Приведены аналитические зависимости для определения собственной частоты плескания жидкости в резервуарах различной формы и показана их согласованность с экспериментальными данными. Выполнены количественные оценки гидростатических и гидродинамических нагрузок, а также кинетической энергии колебаний воды для типового бассейна — установлено, что динамические нагрузки могут существенно превышать статические (в рассмотренном примере в 2–3 раза). Рассмотрены два принципиально разных случая: здания без сейсмоизоляции, где колебания воды могут играть демпфирующую роль, и здания с кинематической сейсмоизоляцией, в которых характер взаимодействия жидкости и конструкции существенно меняется. Обоснована применимость существующих методик гидродинамического расчёта (включая СТО-СА-03.003-2009 и разделение нагрузки на импульсивную и конвективную составляющие) для адаптации к расчёту бассейнов в зданиях. Предложены два направления экспериментальных исследований на базе лаборатории сейсмостойкого строительства и морской гидротехники Сочинского государственного университета: проверка гипотезы о максимальном демпфировании при совпадении собственных частот колебаний суперструктуры и плескания воды, а также верификация предположения об отсутствии плескания в сейсмоизолированной системе при совпадении частот. Результаты работы имеют практическую

значимость для проектирования высотных зданий в сейсмически активных регионах и указывают на необходимость комплексного учёта динамического воздействия жидкости в бассейнах — в том числе при выборе расположения бассейна и при разработке расчётных моделей с учётом специфики сейсмоизоляции.

Ключевые слова: сейсмостойкость; бассейн; землетрясение; гидродинамическая нагрузка; уравнение Навье-Стокса; демпфирование колебаний; кинематическая сейсмоизоляция

Введение

В последние годы строится много многоэтажных зданий (жилых домов, гостиниц, отелей, центров) с бассейнами на крышах или верхних этажах. Очевидно, что их наличие не может не сказываться на нагрузках на конструкции здания (как статические, так и динамические: ветровые, сейсмические). Поэтому расчет конструкций на сейсмостойкость является весьма актуальным в силу того, что вода в бассейне представляет собой не жестко закрепленную массу, а массу обладающую подвижностью (текучестью). При сейсмическом воздействии, эта водная масса приходит в колебательное волнообразное движение, что, конечно же, сказывается вызывает динамические изменения нагрузки на различные элементы конструкции здания. Происходит, например, изменение положения центра тяжести всей механической системы (здание-вода). Таким образом, в рамках сейсмостойкого строительства возникают стандартные задачи: расчеты на прочность, жесткость и устойчивость.

Похожего рода задачи возникали ранее темы бассейнов в высотных зданиях. Это, например, расчеты на прочность, жесткость и устчойчивость резервуаров с жидкостями (нефтеналивных и др.) [1–5]. И такие задачи успешно решаются. Математическим инструментом для их решения является уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Аналитическое решение уравнения Навье-Стокса в общем виде является одной из «задач тысячелетия». До сих пор тчного аналитического решения не существует, что связано, в первую очередь, сильной нелинейностью уравнения, а также другими факторами, например: сложностью моделирования турубулентности (хаотичное, вихревое движение жидкости очень сложно описать аналитически), математической непредсказуемостью («взрыв» решения: образование сингулярностей и/или бесконечных скоростей), нелокальностью.

Тем не менее, применение различных частных приближений для конкретных задач и/или численных методов (метод конечных разностей и др.) позволяет получать частные решения и выполнять компьютерное моделирование конкретных задач.

Постановка задачи

Известны исследования, касающие демпфирующей роли воды, находящейся в бассейне при сейсмических явлениях [6–8].

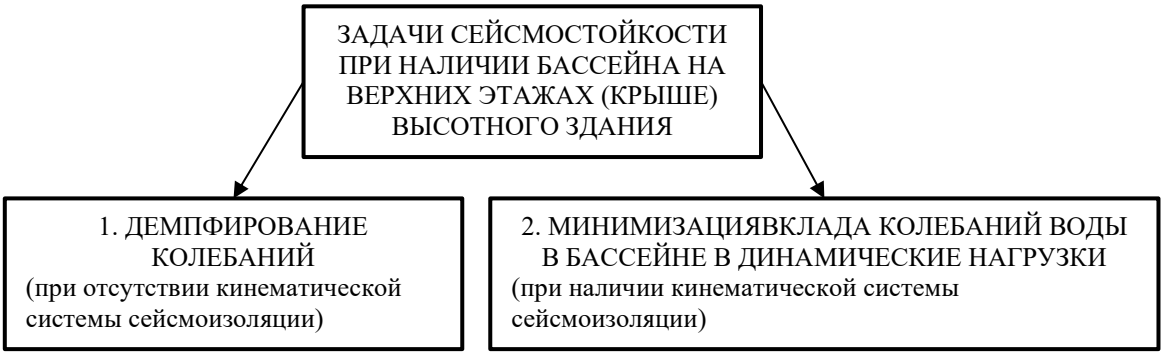


Рисунок 1. *Задачи сейсмостойкости здания при наличии бассейна (выполнен автором)*

Поэтому углубление и расширение исследований в этом направлении является *первой* задачей (рис. 1). Однако, надо понимать, что характер всех механических процессов в системе (здание-вода) при сейсмическом воздействии на нее будет коренным образом отличаться при наличии кинематической сейсмоизоляции [9; 10] и при остутствии таковой. В последнем случае речи о демпфировании уже не идет: здесь необходимо решать вопросы минимизации негативного вклада колебаний воды в бассейне в динамические нагрузки на элементы конструкции при землетрясении. Это — *вторая* задача (рис. 1).

Собственная частота плескания воды в бассейне

Первым шагом в исследованиях необходимо определиться с собственной частотой плескания воды в резервуаре (бассейне), которая, очевидно, зависит от его геометрии (формы) и размеров. В работе [5] приведено уравнение, полученное из двумерного уравнения Навье-Стокса. Данное уравнение, дополненное уравнением непрерывности (по сути — закон сохранения массы), позволилило получить выражение для частоты колебаний в бассейне глубиной h и шириной $L = 2a$ (рис. 2) в виде:

$$f = \frac{\sqrt{\frac{\pi g}{L} \cdot \mathrm{th}\left(\frac{\pi h}{L}\right)}}{2\pi}, \quad (1)$$

где:

$g = 9{,}81$ м/с^2 — ускорение свободного падения;

функция th — гиперболический тангенс.

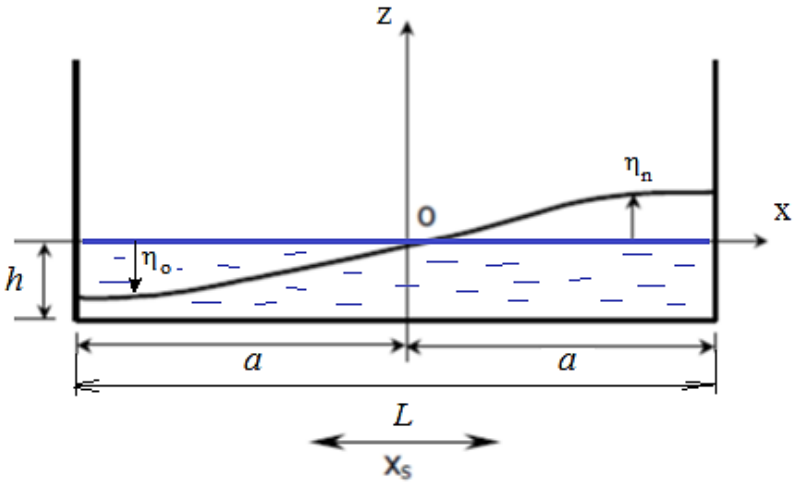


Рисунок 2. *Схема колебаний воды в бассейне (выполнен в [6] и модифицирован автором)*

Для примера на рисунке 3 представлена зависимость частоты плескания воды f от глубины бассейна (уровня волы в бассейне) h (при $L = 3$ м).

Справедливость формулы (1) можно подтвердить следующим образом. В работе [2] приведена формула, подобная (1):

$$f_n = \frac{\sqrt{\frac{k_n g}{R} \cdot \mathrm{th}\left(\frac{k_n h}{R}\right)}}{2\pi}, \quad (2)$$

где:

k_n — коэффициенты, равные: $k_1 = 1{,}84$; $k_2 = 5{,}33$; $k_3 = 8{,}53$.

14SAVN526
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

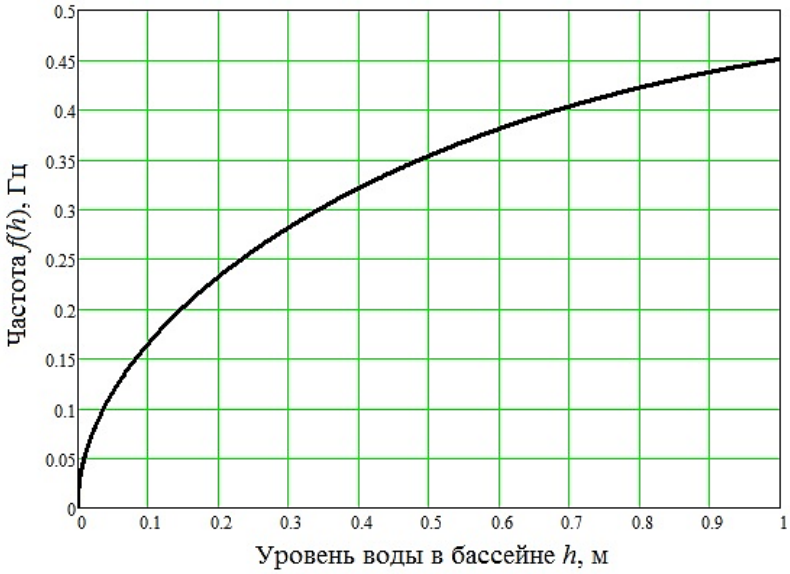


Рисунок 3. *Зависимость собственной частоты плескания воды в бассейне от уровня воды в бассейне (выполнено автором)*

По этой формуле можно рассчитать собственные частоты свободных колебаний жидкости в цилиндрической емкости. Отметим, что автор [2], приводя данную формулу ссылается на работу Тарасенко А. А., в которой указанной формулы нет; более ранним ее источником является работа [11].

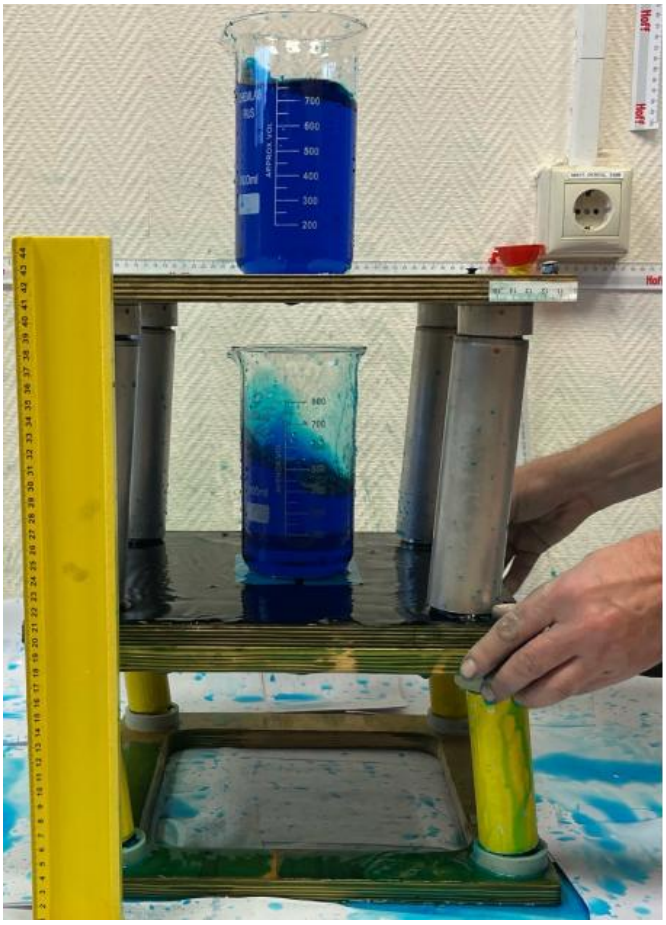


Рисунок 4. *Имитация сейсмического воздействия на модель кинематической сейсмоизолирующей системы (выполнено автором)*

14SAVN526
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Опыты по моделированию сейсмических колебаний, проведенные в [12] показали, что больше всего воды выплескивалось из цилиндрического мерного стакана, закрепленного на части конструкции (имитирующей фундамент здания, нижний стакан на рисунке 4), при частоте равной приблизительно 3 Гц. При начальном уровне воды в стакане $h = 13{,}5$ см и его радиусе $R = 4$ см частота, рассчитанная по формуле (2), $f_1 = 3{,}4$ Гц. Кроме того, при расплескивании воды и уменьшении h, частота f_1 уменьшалась, еще более приближаясь к частоте вынужденных колебаний 3 Гц, обеспечиваемой в опыте [12].

В [6] приведено выражение для горизонтальной силы давления на стенку бассейна параллельной фронту волны, возникшей в бассейне при сейсмическом колебании:

$$F_{cm} = \frac{\rho g b}{2}[(\eta_n + h)^2 - (\eta_0 + h)^2], \quad (3)$$

где:

$\rho = 1000$ кг/м^3 — плотность воды;

b — длина бассейна;

η_n и η_0 — высота подъема (опускания) свободной поверхности воды около передней и задней стенок бассейна, соответственно;

h — уровень воды в бассейне в невозмущенном состоянии.

Можно видеть, что выражение (3) содержит в себе только геометрические параметры, в том числе высоту столба жидкости, от которого зависит гидростатическое давление. Поэтому соотношение (3) позволяет определить силу только гидростатического давление на стенку бассейна в зависимости от уровня подъема (опускания) уровня свободной поверхности η, получаемого путем решения уравнения Навье-Стокса, дополненного уравнением непрерывности. Действительно в этом выражении нет массы воды, поэтому оценить силу инерции движущейся воды (силу динамического давления) оно не позволяет.

Произведем оценку максимальной силы гидростатического давления, оказываемого на стенку бассейна, при колебаниях воды в нем при сейсмическом воздействии. Возможно два варианта: с выплескиванием воды из бассейна за пределы здания (незакрытый бассейн на крыше) (1) и без выплескивания (крытый бассейн) (2).

В первом варианте примем: $\eta_n = 0$, $\eta_0 = -h$. Тогда (3) примет вид:

$$F_{cm} = \frac{\rho g b}{2} h^2. \quad (3.1)$$

Во втором варианте примем: $\eta_n = h$, $\eta_0 = -h$. Тогда (3) примет вид:

$$F_{cm} = 4\rho g b h^2. \quad (3.2)$$

При длине b бассейна, например, в 30 м и средней высоте уровня воды h в бассейнах — 1,4 м, получаем для первого и второго случая, соответственно, значения силы 300 кН (массовый эквивалент — 30 т) и 1200 кН (эквивалент — 120 т). Отметим, что при ширине бассейна в $L = 3$ м масса воды в бассейне будет оставлять 120 т, а соответствующая сила тяжести воды будет равна 1200 кН.

Оценим силу динамического давления. При заданных выше размерах бассейна частота плескания воды, рассчитанная по формуле (1), будет равна 0,48 Гц. Если принять амплитуду горизонтальных колебаний равной ширине бассейна L, то сила динамического давления может быть определена:

$$F_д = 4\pi^2 f^2 L m. \quad (4)$$

14SAVN526
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Произведем расчет для заданных параметров:

$$F_д = 4\pi^2 \cdot 0{,}48^2 \cdot 3 \cdot 1000 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 1{,}4 \approx 3400\ кН$$ (эквивалент — 340 т).

Это для случая, когда вода из помещения бассейна не выплескивается. В случае выплескивания будет $F_д \approx 1700\ кН$ (*эквивалент 170 т*). Массовый эквивалент силы позволяет сравнить статические и динамические нагрузки: 120 т и 340 т (при заданных выше параметрах бассейна), соответственно, в случае «невыплескивания» воды из бассейна.

Таким образом, при сейсмособытии появление этих сил и их переменный характер приводят к необходимости принимать во внимание:

1. Конструкции бассейна и здания в целом должны выдерживать эти силы, обеспечивая соответствующую прочность и жесткость.
2. Учет этих сил при расчетах сооружения на устойчивость.

Во втором случае надо понимать, что возникающий «опрокидывающий» (или, наоборот, демпфирующий) момент силы, связанный с колебаниями воды в бассейне, будет зависеть также от высоты, на котором находится бассейн.

Оценить уровень кинетической энергии колебаний воды в бассейне можно согласно соотношению:

$$E_к = \frac{m(2\pi f L)^2}{2}. \quad (5)$$

Для заданных выше условий:

$$E_к = \frac{1000 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 1{,}4 \cdot (2\pi \cdot 0{,}48 \cdot 3)^2}{2} \approx 5150\ кДж.$$

Такую потенциальную энергию имеет, например, масса в 10,5 тонн, находящаяся на высоте 50 м. Ответ на вопрос насколько велика такая энергия зависит от условий (она может оказаться и относительно небольшой, а может и, наоборот, быть существенной). Кроме того, важно «направление» этой энергии в момент сейсмических колебаний: на «раскачивание» колебаний или же на их демпфирование.

Отметим, что все проведенные числовые оценки касались колебаний воды в бассейне на собственной частоте (собственной частоте плескания).

Бассейны в зданиях с кинематической системой сейсмоизоляции

Согласно, например, работам [6–8] колебания воды в бассейнах, расположенных в зданиях без кинематических систем сейсмоизоляции, при землетрясениях будут играть демпфирующую роль. Такую ситуацию в данной работе рассматривать не будем.

Кинематические системы сейсмоизоляции, к которым относится, например, система Курзанова-Семенова, не только интенсивно исследуются в настоящее время [9; 10; 12; 13], но и все шире применяются в практике сейсмостойкого строительства [14; 15]. Поэтому вопросы, связанные с влиянием бассейнов в зданиях на их сейсмостойкость, имеют высокую актуальность.

Самый простой случай, если при сейсмических колебаниях, вода в бассейне не будет плескаться относительно него. То есть в этом случае поверхность воды будет оставаться горизонтальной и вся ее масса в бассейне может быть представлена как твердое тело, колеблющееся, соответственно, синхронно с окружающими ее строительными конструкциями. В этом случае математическая модель не будет усложнена наличием в ней уравнения Навье-Стокса. Грубое предположение, что колебания несейсмоизолированной части здания (основания здания) должно происходить на частоте плескания воды в бассейне, требует, конечно, экспериментальной проверки.

14SAVN526
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Реальные колебания при сейсмособытиях могут происходить на частотах совсем несовпадающих с собственной частотой колебаний воды в бассейне. Тем более, что сейсмоколебания, кроме того, имеют не моногармонический характер, а представляют из себя совокупность сложного спектрального состава. Поэтому в общем случае в расчетах на сейсмостойкость задний с кинематическими опорами должен учитываться негативный вклад колебаний воды в бассейне в происходящие при сейсмособытии процессы.

Методики расчетов резервуаров с жидкостями

В настоящее время существуют упрощённые методики гидродинамических расчётов, определяющих несущую способность резервуаров, используемых, например, в нефтегазовой отрасли. Согласно данным методикам полная нагрузка от жидкости на стенки и днище резервуара разделяется на гидростатическую и гидродинамическую нагрузки. Гидродинамическая нагрузка, в свою очередь, разделяется на две составляющие (без учета гидродинамического давления от вертикального сейсмического воздействия): импульсивную (инерционную) (рис. 5 а) и конвективную (кинематическую) (рис. 5 б). Эти составляющие определяют горизонтальные возмущения, поэтому несут бóльшую ответственность за устойчивость сооружения.

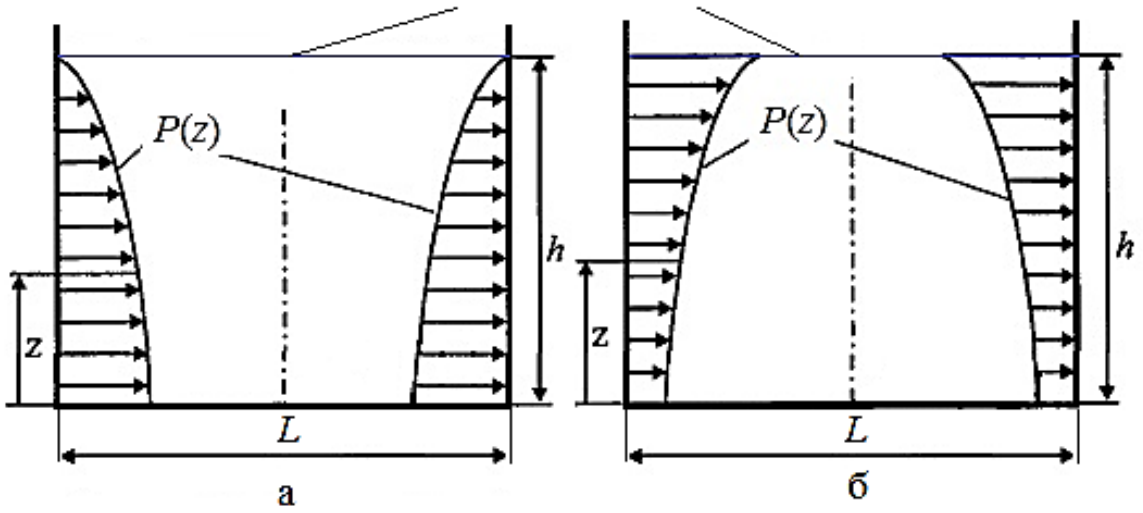


Рисунок 5. *Эпюры горизонтальных давлений жидкости на стенки резервуара при сейсмическом воздействии: а — импульсивная составляющая; б — конвективная составляющая (выполнено в СТО-СА-03.003-2009 и модифицирован автором)*

Импульсивное давление (рис. 5 а) от жидкости возникает в резервуаре от движения жидкости совместно с его стенками во время землетрясения. Колебания жидкости, образующие волны на её поверхности в резервуаре, вызывают конвективное давление (рис. 5 б). С линейно-спектральной методикой расчета резервуаров для нефтегазовой промышленности на сейсмоустойчивость можно ознакомиться, например, СТО-СА-03.003-2009.

В работе [16] согласно упомянутой методике в программном комплексе «ЛИРА-САПР» разработана расчётная модель бассейна. Сделано предположение, что наиболее неблагоприятным с точки зрения сейсмоустойчивости будет угловое расположение бассейна, т. к. в этом случае допускается возникновение следующих неблагоприятных факторов: двухосный крутящий момент; максимальная нагрузка на угловую колонну; работа плиты на двухосный изгиб с кручением. Результатами экспериментальных исследований авторы [16] предполагают подтвердить предпочтительность центрального размещения бассейна.

Планирование экспериментов

Группе исследователей под руководством Семенова Станислава Юрьевича и Иваненко Николая Алексеевича (лаборатория сейсмостойкого строительства и морской гидротехники Сочинского государственного университета — ЛССМГТ) для подтверждения утверждений и гипотез, можно предложить два направления экспериментальных исследований.

1. Демпфирование колебаний суперструктуры водой в бассейне.

В этом случае предлагается провести опыты с отпусканием отклоненной от равновесного состояния модели суперструктуры (имеется в наличии на полигоне ЛССМГТ). Таким образом будут моделироваться сейсмовоздействие на несейсмоизолированное здание с бассейном.

Система (суперструктура) будет колебаться на собственной частоте. Изменяя собственную частоту плескания воды в бассейне (1) путем изменения уровня воды h, проверяем тезис, что демпфирование наиболее эффективно при совпадении частот колебаний суперструктуры и плескания.

2. Опыты с вынужденными колебаниями (бассейн на кинематической сейсмоизоляции).

С помощью имеющегося в ЛССМГТ оборудования имитируется сейсмовоздействие на кинематически сейсмоизолированную суперструктуру с бассейном.

Исследуются разного рода частотные зависимости. В результате можно верифицировать и фальсифицировать гипотезу о том, что при совпадении собственных частот плескания и колебаний суперструктуры вода в бассейне плескаться не будет (отсутствие дополнительных динамических нагрузок).

Заключение

На основании проведённого анализа поставленной задачи о сейсмостойкости высотных зданий с бассейнами в верхней части можно сформулировать следующие выводы.

1. Обоснована актуальность задачи. Наличие бассейна на верхних этажах здания при сейсмическом воздействии приведет воду в нем в колебательное (волнообразное) движение. Как следствие необходим учет изменения положения центра тяжести системы «здание–вода», возникновения переменных гидростатических и гидродинамических нагрузок при расчётах на прочность, жёсткость и устойчивость конструкций.

2. Приведены выражения для собственной частота плескания воды, полученные ранее на основе уравнения Навье-Стокса с уравнением непрерывности, в прямоугольном бассейне (1) и цилиндрическом резервуаре (2). Формула (2) подтверждена экспериментальными данными, полученными ранее [12] автором статьи. Показано, что частота плескания зависит от геометрии бассейна и уровня воды: при уменьшении уровня воды частота снижается, что может приводить к приближению собственной частоты жидкости к частоте вынужденных сейсмических колебаний и, либо резонансному усилению амплитуды колебаний, либо к их демпфированию.

3. Выполнены количественные оценки нагрузок статических и динамических нагрузок для бассейна с заданными параметрами. Показано, что динамическая нагрузка может существенно превышать статическую, что приводит к необходимости учёта динамической составляющей при проектировании. Кинетическая энергия колебаний воды имеет относительно немалую величину и может быть направлена как на «раскачивание», так и на демпфирование колебаний здания в зависимости от соотношения частот.

14SAVN526
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

4. Сформулированы две ключевые задачи (в зависимости от наличия или отсутствия кинематической сейсмоизоляции):

- без сейсмоизоляции — вода в бассейне может играть демпфирующую роль и задача сводится к подбору параметров бассейна для максимального гашения колебаний суперструктуры;
- с сейсмоизоляцией — характер механических процессов принципиально меняется: при совпадении собственных частот плескания и колебаний сейсмоизолированной суперструктуры предполагается отсутствие плескания воды (ведёт себя как твёрдое тело), однако при несовпадении частот и сложном спектральном составе реального сейсмического воздействия негативный вклад колебаний воды должен учитываться в расчётах.

5. Применимость существующих методик гидродинамического расчёта. Показано, что методики, разработанные для резервуаров нефтегазовой отрасли (СТО-СА-03.003-2009), основанные на разделении нагрузки на импульсивную (инерционную) и конвективную (кинематическую) составляющие, могут быть адаптированы для расчёта бассейнов в зданиях.

6. Предложены два направления экспериментальных исследований:

- опыты с отпусканием отклонённой суперструктуры — для проверки гипотезы о максимальном демпфировании при совпадении собственных частот колебаний суперструктуры и плескания воды (путём варьирования уровня воды в бассейне);
- опыты с вынужденными колебаниями сейсмоизолированной модели — для верификации (или фальсификации) гипотезы об отсутствии плескания воды при совпадении собственных частот плескания и колебаний суперструктуры.

7. Практическая значимость и перспективность исследований. Результаты работы указывают на необходимость учёта динамического воздействия жидкости в бассейнах при сейсмическом расчёте высотных зданий, причём как в случае наличия, так и отсутствия кинематической сейсмоизоляции. Таким образом, поставленная задача является многоаспектной и требует дальнейшего развития как в теоретическом (уточнение математических моделей, численное моделирование), так и в экспериментальном направлении (натурные и лабораторные испытания) для верификации сформулированных гипотез.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дымов Е. А., Белаш Т. А. Влияние давления жидкости на сейсмостойкость резервуаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2026. — № 1. — С. 110–127. — DOI: 10.37153/2618-9283-2026-1-110-127.
2. Михалев А. В. Конечно-элементное моделирование сейсмического воздействия на оболочковые конструкции с применением программного комплекса ANSYS // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 08–10 октября 2020 года. — Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2020. — С. 56–63. — EDN QBJGGX.
3. Шигапов Р. Р., Ковальчук О. А. Обзор упрощенных методик расчета резервуаров на сейсмические воздействия // Вестник МГСУ. — 2017. — Т. 12, № 1(100). — С. 53–62. — DOI 10.22227/1997-0935.2017.1.53-62. — EDN XRJBVD.

4. Васильев Г. Г., Тарасенко А. А., Чепур П. В., Гуань Ю. Анализ сейсмостойкости вертикального стального резервуара РВСПК-50000 с использованием линейно-спектрального метода // Нефтяное хозяйство. — 2015. — № 10. — С. 120–123. — EDN UXQXPR.
5. Тарасенко А. А., Тюрин Д. В. Моделирование нефтяных стальных вертикальных цилиндрических резервуаров // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2001. — № 4(28). — С. 65–69. — EDN SJHUOV.
6. Pradipta Banerji. Tuned liquid dampers for control of earthquake response // 13th World Conference on Earthquake Engineering (Vancouver, B.C., Canada. August 1–6, 2004, Paper No. 1666). — URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1666.pdf.
7. Novo T., Varum H., Teixeira-Dias F., Rodrigues H., Falcao Silva M., Campos Costa A., Guerreiro L. Tuned liquid dampers simulation for earthquake response control of buildings // Bull. Earthquake Eng. — 2013. — DOI 10.1007/s10518-013-9528-2.
8. Aakash Bikram Rana, Shubhesh Bista, Prashant Sunagar. Analysis of Tuned Liquid Damper (TLD) in Controlling Earthquake Response of a Building using SAP2000 // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). — 2018. Vol. 05, Issue 10. P. 79–96. — URL: https://www.irjet.net/archives/V5/i10/IRJET-V5I1017.pdf.
9. Кириллов А. М., Сухарев Ф. И., Иваненко Н. А., Семенов С. Ю. Сейсмоизолирующие опоры Курзанова-Семенова: теория и эксперимент // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16, № 4. — EDN IOHUNT.
10. Кириллов А. М., Сухарев Ф. И., Семенов С. Ю., Иваненко Н. А. Исследование движения суперструктуры при сейсмическом воздействии // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17, № 1. — EDN NUEZVT.
11. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. — СПб.: Наука,1998 — 228 с. — URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01000597610.
12. Горб П. Д., Кириллов А. М. Имитация сейсмического воздействия на сейсмоизолирующую систему Курзанова — Семенова // Юный ученый. — 2025. — № 4(89). — С. 71–76. — EDN WDPEPO.
13. Бурцева О. А., Чипко С. А. Исследование сейсмоопоры кинематического типа // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2026. — № 3. — С. 64–79. — DOI 10.37153/2618-9283-2026-3-64-79. — EDN AAZGRU.
14. Курзанов А. М. Шабалин Г. А., Семенов С. Ю. О сейсмоизоляции "Гостинично-туристического комплекса "Sea Plaza" в г. Сочи // Промышленное и гражданское строительство. — 2010. — № 5. — С. 55–57. — EDN MCIQTH.
15. Семенов С. Ю., Иваненко Н. А., Колесников А. В. Опыт применения кинематических систем сейсмоизоляции на территории большого Сочи при проектировании и строительстве зданий и сооружений // XIII Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию: сборник материалов конференции (с международным участием), Санкт-Петербург, 01–06 июля 2019 года. — Москва: Российская Ассоциация по сейсмостойкому строительству и защите от природных и техногенных воздействий, 2019. — С. 47–48. — DOI 10.37153/2686-0045-2019-13-47-48. — EDN AMHKMN.
16. Сергованцев Н. Д., Иваненко Н. А. Влияние жидкостей (наличие бассейна на кровле) на конструкции здания // Строительство в прибрежных курортных регионах: Материалы Международной научно-практической конференции, Сочи, 07–08 мая 2026 года. — Сочи: Сочинский государственный университет, 2026. — С. 34–38. — EDN JQMFTG.

Kirillov Andrey Mihailovich
Sochi State University, Sochi, Russia
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7651-1534
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=38847
WoS: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/D-1235-2016
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102546144
Google Scholar: https://scholar.google.ru/citations?user=qM3HDIUAAAAJ

Seismic response of high-rise buildings with rooftop swimming pools

Abstract. This study investigates the seismic resilience of high-rise buildings featuring swimming pools on their upper floors. Under seismic excitation, the moving water mass generates complex dynamic loads and shifts the center of gravity of the «building-water» system; these factors require special consideration when calculating structural strength, stiffness, and stability. Analytical formulas for determining the natural sloshing frequency of liquid in reservoirs of various shapes are presented, and their consistency with experimental data is demonstrated. Quantitative assessments of hydrostatic and hydrodynamic loads, as well as the kinetic energy of water oscillations, were performed for a typical pool; the results indicate that dynamic loads can significantly exceed static loads (by a factor of 2–3 in the example analyzed). Two fundamentally different scenarios are examined: buildings without seismic isolation, where water oscillations may act as a damping mechanism, and buildings with kinematic seismic isolation, where the nature of the fluid-structure interaction changes significantly. The study justifies adapting existing hydrodynamic calculation methods — including the STO SA 03.003-2009 standard and the decomposition of loads into impulsive and convective components — for the analysis of pools within buildings. Two avenues for experimental research at the Sochi State University Laboratory of Seismic-Resistant Construction and Marine Hydraulic Engineering are proposed: testing the hypothesis that maximum damping occurs when the natural frequencies of the superstructure and the water sloshing coincide, and verifying the assumption that sloshing is absent in a seismically isolated system when these frequencies match. The findings are of practical importance for the design of high-rise buildings in seismically active regions, highlighting the need to comprehensively account for the dynamic effects of pool water — particularly when determining pool placement and developing structural models that incorporate the specific characteristics of seismic isolation systems.

Keywords: seismic resistance; pool; earthquake; hydrodynamic load; Navier-Stokes equation; vibration damping; kinematic seismic isolation