

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

2018, №3, Том 10 / 2018, No 3, Vol 10 <https://esj.today/issue-3-2018.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/03SAVN318.pdf>

Статья поступила в редакцию 21.04.2018; опубликована 19.06.2018

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Саинов М.П., Шаймярдянов И.Р. Исследование сейсмостойкости грунтовой перемычки с бетонной диафрагмой // Вестник Евразийской науки, 2018 №3, <https://esj.today/PDF/03SAVN318.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Sainov M.P., Shaimiardianov I.R. (2018). Study of seismic stability of rockfill cofferdam with concrete diaphragm. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 3(10). Available at: <https://esj.today/PDF/03SAVN318.pdf> (in Russian)

УДК 627.2

**Саинов Михаил Петрович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
Москва, Россия

Доцент кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства»

Кандидат технических наук

E-mail: [mp\\_sainov@mail.ru](mailto:mp_sainov@mail.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=427608](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=427608)

**Шаймярдянов Илдар Ринатович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
Москва, Россия

Студент

E-mail: [petr.ildar@yandex.ru](mailto:petr.ildar@yandex.ru)

## Исследование сейсмостойкости грунтовой перемычки с бетонной диафрагмой

**Аннотация.** Статья посвящена результатам численных исследований напряжённо-деформированного состояния при сейсмическом воздействии каменно-набросной перемычки высотой 16 м, противофильтрационным элементом которой является бетонная диафрагма из буронабивных свай. Расчёты проводились для сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов. Было выявлено, что наличие в центре плотины жёсткой бетонной диафрагмы ухудшает сейсмостойкость перемычки. При сейсмическом воздействии в направлении в сторону верхнего бьефа можно ожидать разуплотнение контакта диафрагмы с грунтами и нарушение устойчивости верхового откоса перемычки.

Исследование позволило выявить основные особенности напряжённо-деформированного состояния диафрагмы при действии сейсмических сил. Было выявлено, что горизонтальное сейсмическое воздействие вызывает появление в диафрагме вертикальную сжимающую или растягивающую продольную силу. По результатам расчётов сейсмическое воздействие может вызвать срез жёсткой диафрагмы по основанию. Рекомендуется выполнять податливое соединение диафрагмы со скальным основанием в виде глиноцементобетонной плиты. С точки зрения прочности бетонной диафрагмы опасность представляет сейсмическое воздействие, направленное в сторону верхнего бьефа. Оно усиливает деформации изгиба диафрагмы, сформированные статическими нагрузками, и вызывает появление в диафрагме растягивающих напряжений. По результатам расчётов прочность бетона на растяжение может быть нарушена. Рекомендуется выполнять диафрагму из глиноцементобетона.

**Ключевые слова:** сейсмостойкость; грунтовая перемычка; бетонная диафрагма; численное моделирование; глиноцементобетон

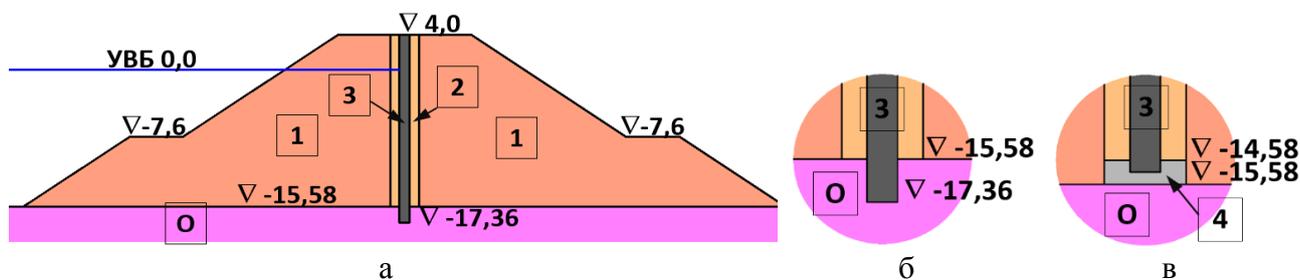
### Введение

Метод буронабивных свай всё чаще применяется для устройства противофильтрационных устройств грунтовых плотин [1-5]. В частности, этот метод был применён для ремонта ядра каменно-земляной плотины Курейской ГЭС [3]. Методом буронабивных свай была устроена противофильтрационная стена в нижней части плотины Гоцатлинской ГЭС [4] и диафрагма грунтовой плотины строящейся Нижне-Бурейской ГЭС [5]. На современном этапе подобный тип грунтовых плотин запланировано активно внедрять в практику гидротехнического строительства [6].

К настоящему времени условия работы диафрагм и стены, устроенных методом буронабивных свай, в теле и основании грунтовых плотин изучены достаточно хорошо, этому вопросу посвящены ряд исследований [7-12]. Показано, что диафрагмы (стены), устроенные из буронабивных свай, могут служить надёжными противофильтрационными элементами. Однако вопрос о сейсмостойкости противофильтрационных стен изучен слабо. Нам удалось найти только одну работу, посвящённую этому вопросу [13]. В ней с помощью численного моделирования была исследована сейсмостойкость глубокой глиноцементобетонной стены в основании сверхвысокой каменно-земляной плотины Кархе [14].

В данной статье мы рассмотрим результаты выполненного нами исследования сейсмостойкости грунтовой перемычки с бетонной диафрагмой, устроенной методом буронабивных свай. Высота перемычки составляет почти 16 м, а высота диафрагмы – почти 16 м (рис. 1а). Толщина диафрагмы принималась равной 1,2 м. Было принято, что диафрагма выполняется из бетона. Физико-механические свойства бетона принимались равными: модуль деформации 29000 МПа, коэффициент Пуассон 0,18, прочность на сжатие 11,5 МПа, прочность на растяжение – 1,4 МПа.

В [12] описаны результаты исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) этой же перемычки при статических нагрузках. Рассматривались 2 варианта сопряжения диафрагмы со скальным основанием. В первом варианте бетонная стена на 1,8 м углубляется в скальное основание (рис. 1б). Во втором варианте сопряжение стены и скального основания осуществляется через глиноцементобетонную плиту, выполняющую роль шарнира (рис. 1в). Эта плита устраивается заранее, ещё до возведения перемычки. Статический модуль деформации глиноцементобетона был принят равным 100 МПа.



1 – упорная призма из каменной наброски, 2 – центральная зона из сортированной каменной наброски, 3 – диафрагма из бетона, 4 – плита из глиноцементобетона

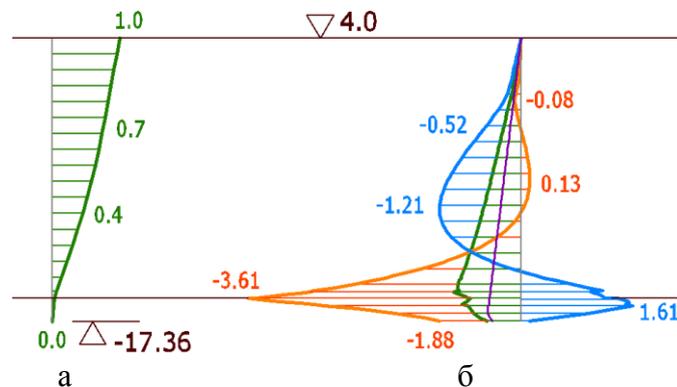
**Рисунок 1.** Конструкция перемычки с диафрагмой из буронабивных свай: а – общая схема, б – вариант 1, в – вариант 2

Для двух вариантов конструкции перемычки были составлены конечно-элементные модели, каждая из которых состояла не менее, чем из 620 конечных элементов. Для того, чтобы

смоделировать возможность проявления нелинейных эффектов (проскальзывание, отрыв) на контакте стены с грунтовым массивом в модель вводились контактные конечные элементы. Все конечные элементы имели кубическую аппроксимацию перемещений внутри элемента для повышения точности расчётов.

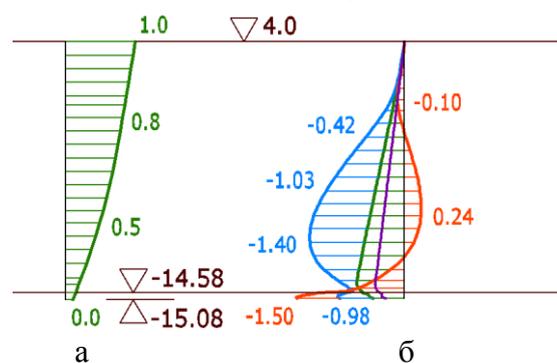
Исследование проводилось с помощью вычислительной программы Nds\_N, составленной к.т.н. Саиновым М.П. [15]. Это позволило учесть нелинейность деформирования каменной наброски. Учитывались 2 основных эффекта проявления нелинейности грунта. Первый заключается в том, что при разгрузке деформируемость грунта ниже, чем при активном нагружении. Принималось, что модуль деформации при разгрузке в 5 раз выше, чем при активном нагружении. Второй эффект заключается в снижении деформируемости при росте бокового обжатия. Показатель степени в степенной зависимости был принят равным 0,65. Коэффициент Пуассона каменной наброски принимался неизменным – 0,25. Принятые характеристики деформируемости каменной наброски примерно соответствуют текущему модулю деформации грунта, составляющему 40 МПа.

По результатам расчётов было получено, что диафрагма, жёстко защемлённая в скальное основание (вариант 1), не может служить надёжным противодиффузионным элементом – возникающие в ней растягивающие напряжения (рис. 2) приведут к образованию трещин. При «шарнирном» соединении диафрагмы со скальным основанием (вариант 2), опасности образования в ней трещин зафиксировано не было (рис. 3). Это позволило утверждать, что диафрагма в теле перемычки может быть устроена из бетона.



Синими линиями показаны напряжения на верхней грани, оранжевыми – на нижней грани, зелёными – по оси диафрагмы. Фиолетовой линией обозначено распределение напряжений от собственного веса материала диафрагмы

**Рисунок 2.** Напряжённно-деформированное состояние диафрагмы при статических нагрузках (вариант 1): а – смещения (см), б – вертикальные напряжения  $\sigma_y$  (МПа) [12]



Обозначения см. на рис. 2

**Рисунок 3.** Напряжённно-деформированное состояние диафрагмы при статических нагрузках (вариант 2): а – смещения (см), б – вертикальные напряжения  $\sigma_y$  (МПа) [12]

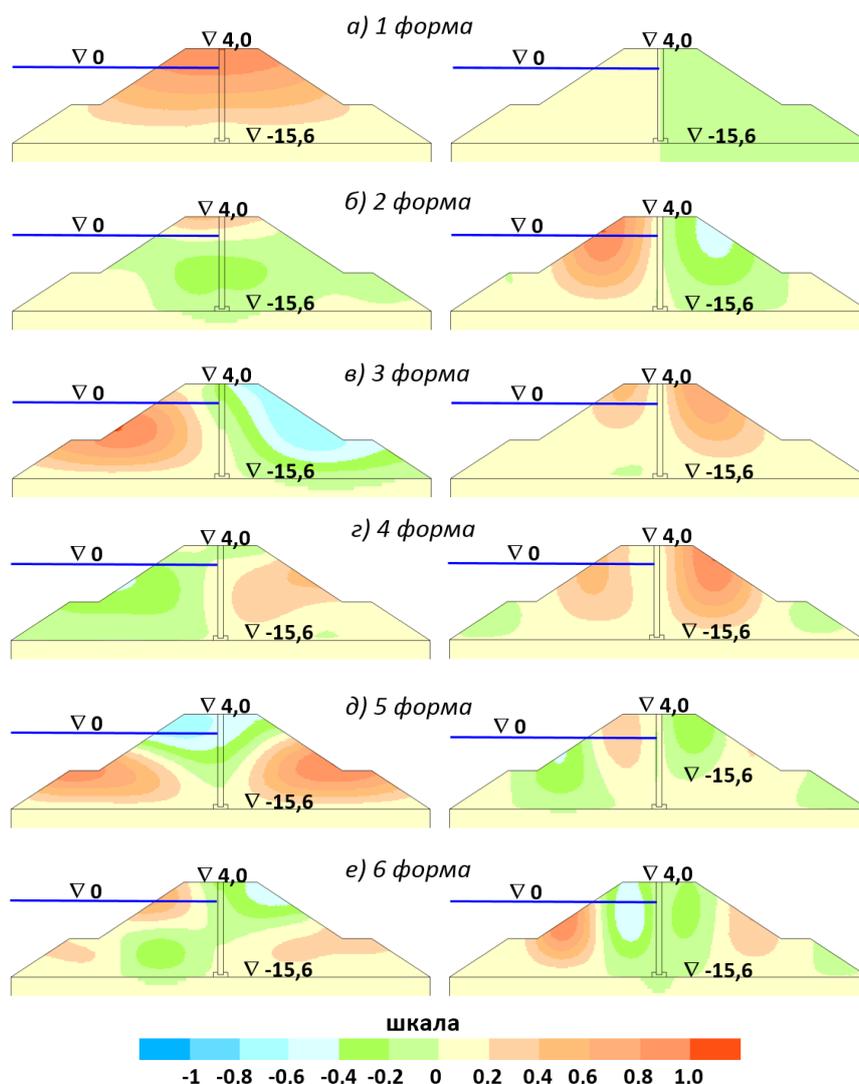
Чтобы исследовать сейсмостойкость перемычки с бетонной противофильтрационной диафрагмой, были проведены расчёты НДС при действии сейсмических сил.

### Метод и методика

Было принято, что сейсмические силы соответствуют землетрясению силой 9 баллов (по шкале MSK-64). Сейсмические силы определялись в соответствии со строительными нормами<sup>1</sup>, по линейно-спектральной методике.

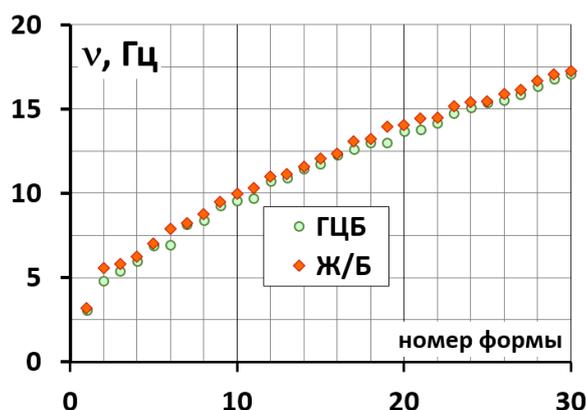
Для этого предварительно путём численного моделирования определялись формы собственных колебаний плотины. При данном расчёте динамический модуль деформации каменной наброски принимался равным 200 МПа.

Были определены 30 низших форм собственных колебаний перемычки (рис. 4). Частота основного тона составила 3,2 Гц, т. е. она близка к резонансной. 6 низших форм собственных колебаний перемычки показаны на рис. 5.



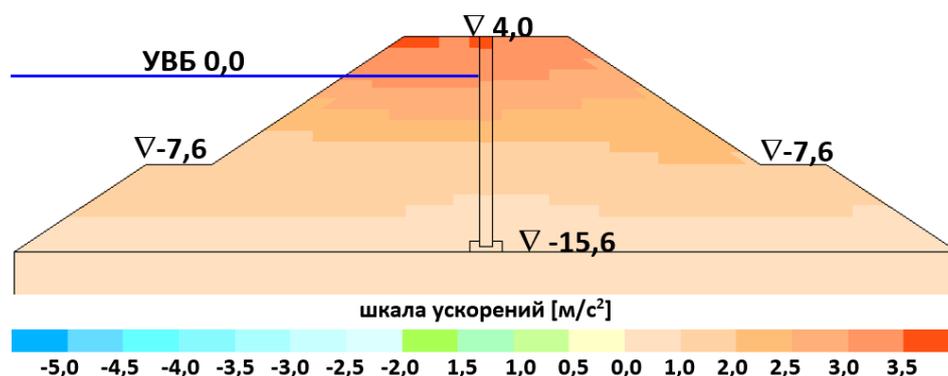
**Рисунок 4.** Формы собственных колебаний перемычки (получены авторами)

<sup>1</sup> СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. – М.: ФАУ «ФЦС», 2014. – 126 с.



**Рисунок 5.** Частоты собственных колебаний перемычки (получены авторами)

При расчёте сейсмических сил ускорение основания принималось равным  $0,32g$ , а максимальное сейсмическое ускорение гребня было получено равным  $0,36g$  (рис. 6). По распределению ускорений были вычислены сейсмические силы, действующие на перемычку.



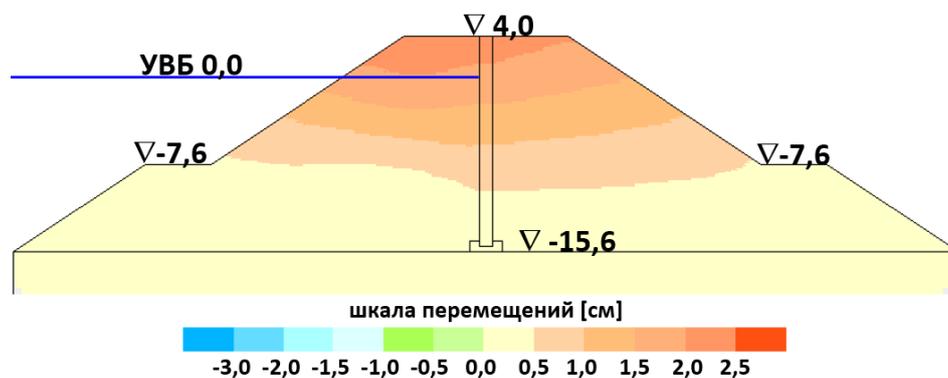
**Рисунок 6.** Горизонтальные ускорения в плотине при 9-балльном землетрясении (с направлением сейсмического воздействия в сторону нижнего бьефа) (получены авторами)

При расчётах сейсмостойкости принималось, что вычисленные сейсмические силы могут вызывать в грунтовой перемычке не только упругие, но и пластические деформации. Было принято, что при восприятии сейсмических нагрузок деформируемость грунта в 2 раза ниже, чем при восприятии статических сил.

Расчёт НДС перемычки при сейсмическом воздействии проводился для двух случаев направления сейсмического воздействия. В первом случае сейсмические силы действуют горизонтально в сторону нижнего бьефа, во втором – в сторону верхнего бьефа.

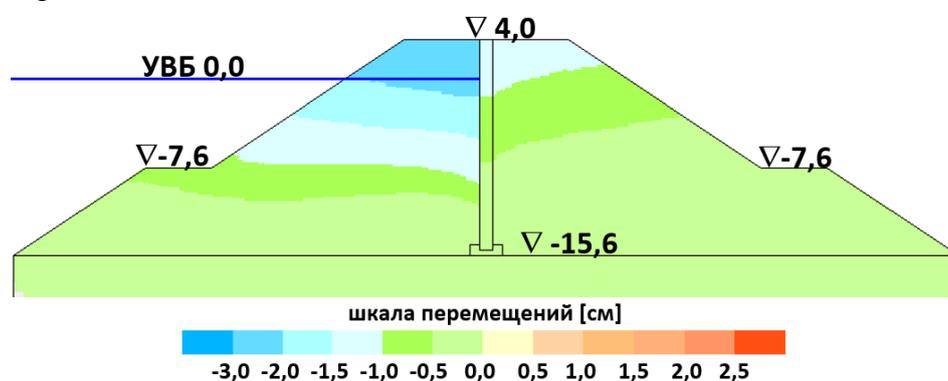
**Результаты** расчёта показаны на рис. 7-12.

Было выявлено, что сейсмическое воздействие одной силы, но противоположного направления, воспринимается перемычкой совершенно по-разному. При направлении сейсмического воздействия в сторону нижнего бьефа большая часть грунта перемычки испытывает активное нагружение. Перемычка смещается в нижний бьеф. В варианте 2 максимальное смещение перемычки достигает  $2,3$  см (рис. 7).



**Рисунок 7.** Горизонтальные смещения перемычки (вариант 2) при землетрясении силой 9 баллов с направлением сейсмического воздействия в сторону нижнего бьефа (получены авторами)

Сейсмические силы с направлением в сторону нижнего бьефа воспринимается грунтами перемычки сложным образом. В низовой призме грунт испытывает разгрузку, а в верховой – активное нагружение. За счёт этого смещения верховой и низовой призм различаются по величине. В варианте 2 в верховой призме максимальные смещения достигают 4,0 см, а в низовой лишь 1,4 см (рис. 8). По верховой грани стены в перемычке возникает глубокая вертикальная трещина.



**Рисунок 8.** Горизонтальные смещения перемычки (вариант 2) при землетрясении силой 9 баллов с направлением сейсмического воздействия в сторону верхнего бьефа (получены авторами)

Таким образом, при направлении сейсмических сил в сторону нижнего бьефа перемычка получает смещения бóльшие по величине, чем при направлении в сторону верхнего бьефа. Однако по максимальным смещениям стены наблюдается обратная картина – смещения стены при направлении сейсмическом воздействии в сторону нижнего бьефа больше, чем при направлении в сторону верхнего бьефа. В варианте 2 максимальное смещение стены в сторону нижнего бьефа составляет 2,3 см (рис. 11), а в сторону верхнего бьефа – 1,4 см (рис. 13).

НДС стены при восприятии сейсмических сил разного направления также очень сильно различается. Оно характеризуется несколькими основными особенностями.

Первая особенность состоит в опасности среза диафрагмы по контакту с основанием.

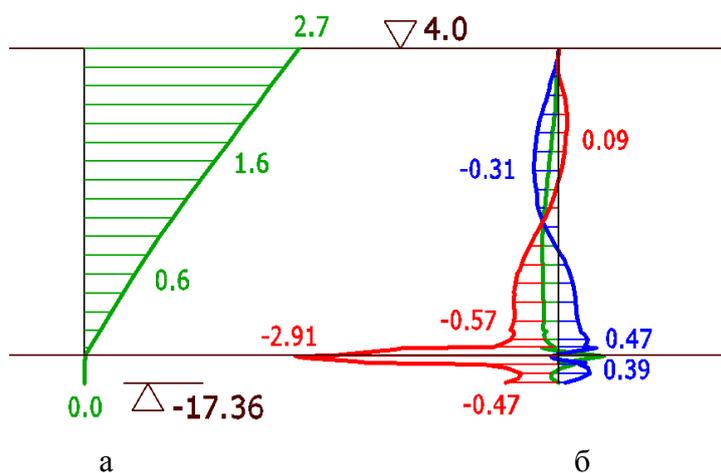
В варианте 1 для НДС диафрагмы характерны сильные изгибные деформации в зоне заделки в скальное основание. Они сопровождаются нарушением прочности бетона на растяжение и образованием в стене трещины. При направлении сейсмического воздействия в сторону нижнего бьефа трещина развивается с верховой стороны, а при обратном направлении – с низовой. Таким образом, при жёсткой заделке в скальное основание (вариант 1) стена не может служить надёжным противодиффузионным элементом.

В варианте 2 глиноцементобетонная «подушка» играет роль шарнира, который позволяет избежать нарушение прочности стены при изгибных деформациях. При направлении сейсмических сил в сторону нижнего бьефа в нижней части стены растягивающих напряжений не возникает (рис. 12б), а при направлении в сторону верхнего бьефа они не превышают 0,8 МПа (рис. 11б).

Второй важной особенностью НДС стены при сейсмическом воздействии является возникновение в ней продольного усилия. При направлении сейсмических сил в нижний бьеф в стене возникает растягивающее продольное усилие – по всей высоте стены происходит уменьшение сжатия по напряжениям  $\sigma_y$  (рис. 9б, 11б). Наоборот, при направлении сейсмических сил в верхний бьеф в нижней части стены сжимающие напряжения  $\sigma_y$  увеличиваются (рис. 10б, 12б).

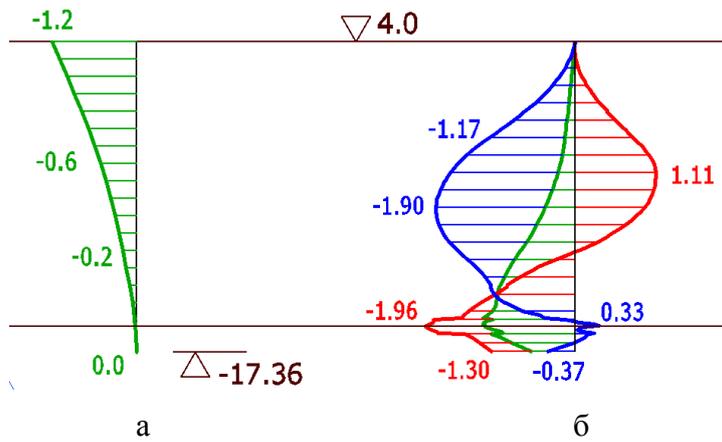
Третьей важной особенностью НДС стены при сейсмическом воздействии являются деформации изгиба. Они носят сложный характер, но в-основном изгиб происходит в сторону, обратную к направлению сейсмического воздействия. Т. к. при статических нагрузках стена испытывала изгиб в сторону нижнего бьефа, поэтому в зависимости от направления сейсмическое воздействие может как усугублять деформации изгиба, так и компенсировать их. При направлении сейсмических сил в нижний бьеф суммарные изгибные деформации стены уменьшаются (рис. 11б), а при направлении в верхний бьеф –увеличиваются (рис. 12б).

По этой причине наиболее неблагоприятным для НДС стены в варианте 2 направлением сейсмических сил является направление в сторону верхнего бьефа. В этом случае верховая грань стены испытывает сжатие, а низовая – растяжение. Сжимающие напряжения опасности не представляют – они много меньше прочности бетона на растяжение, более опасно растяжение на низовой грани стены. В варианте 2 растягивающие напряжения  $\sigma_y$  достигают 1,29 МПа (рис. 12б). Они близки к расчётному сопротивлению бетона на растяжение, но не превышают его. Применяя армирование, можно обеспечить сейсмостойкость бетонной стены перемычки.



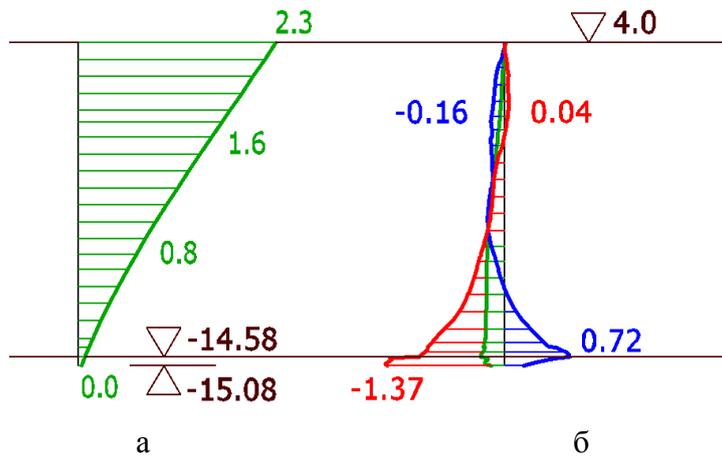
Синими линиями показаны напряжения на верховой грани, красными – на низовой грани, зелёными – по оси диафрагмы

**Рисунок 9.** Напряжённно-деформированное состояние диафрагмы (вариант 1) после землетрясения силой 9 баллов с направлением сейсмического воздействия в сторону нижнего бьефа: а – смещения (см), б – вертикальные напряжения  $\sigma_y$  (МПа) (получены авторами)



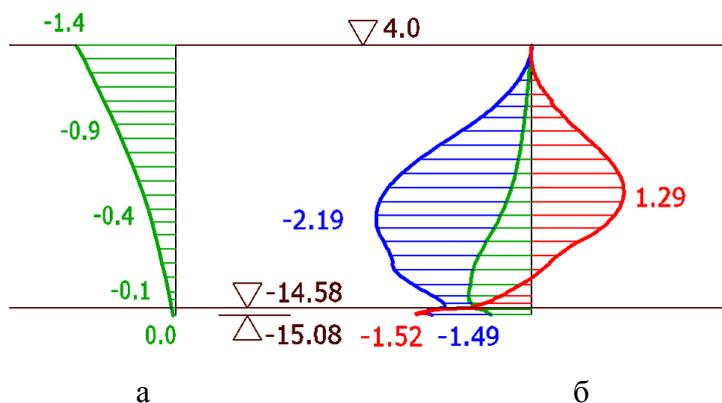
Условные обозначения см. на рис. 9

**Рисунок 10.** Напряжённно-деформированное состояние диафрагмы (вариант 1) после землетрясения силой 9 баллов с направлением сейсмического воздействия в сторону верхнего бьефа (получены авторами)



Условные обозначения см. на рис. 9

**Рисунок 11.** Напряжённно-деформированное состояние диафрагмы (вариант 2) после землетрясения силой 9 баллов с направлением сейсмического воздействия в сторону нижнего бьефа (получены авторами)



Условные обозначения см. на рис. 9

**Рисунок 12.** Напряжённно-деформированное состояние диафрагмы (вариант 2) после землетрясения силой 9 баллов с направлением сейсмического воздействия в сторону верхнего бьефа (получены авторами)

### Выводы

1. Для плотины (или перемычки) с жёстким вертикальным противофильтрационным элементом сейсмические нагрузки представляют серьёзную опасность. При направлении сейсмического воздействия в сторону верхнего бьефа существует опасность разуплотнения по контакту между диафрагмой и верховой призмой, которое может привести к нарушению устойчивости верхового откоса. Рекомендуется выполнять диафрагму из глиноцементобетона, чтобы обеспечить совместную работу диафрагмы и каменной наброски.
2. Наиболее уязвимым сечением диафрагмы является её сопряжение со скальным основанием. Смещения, вызванные сейсмическим воздействием, могут вызвать срез диафрагмы. По этой причине рекомендуется сопрягать диафрагму со скальным основанием посредством глиноцементобетонной «подушки».
3. Одной из особенностей НДС диафрагмы в теле грунтовой перемычки при сейсмическом воздействии является появление в ней продольной силы. В зависимости от направления сейсмического воздействия, продольная сила может быть как сжимающей, так и растягивающей.
4. На сейсмостойкость диафрагмы оказывает её НДС, сформированное статическими нагрузками. Направление сейсмического воздействия в сторону верхнего бьефа усиливает изгибные деформации диафрагмы и может привести к нарушению условия прочности на растяжение. По этой причине рекомендуется применять в качестве материала диафрагмы не бетон, а глиноцементобетон.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ICOLD. Filling materials for watertight cut-off walls. 1985. Bulletin 51.
2. Радченко В.Г., Лопатина М.Г., Николайчук Е.В., Радченко С.В. Опыт возведения противофильтрационных устройств из грунтоцементных смесей. // Гидротехническое строительство. 2012. №12. С. 46-54.
3. Королёв В.М., Смирнов О.Е., Аргал Э.С., Радзинский А.В. Новое в создании противофильтрационного элемента в теле грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. 2013. №8. С. 2-9.
4. Борзунов В.В., Мусаев А.Ш., Кадушкина Е.А. Оптимизация проектных решений и усовершенствования конструкций основных сооружений Нижне-Бурейской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2017. №4. С. 2-15.
5. Малышев Л.И., Шишов И.Н., Кудрин К.П., Бардюгов В.Г. Технические решения и результаты работ по сооружению противофильтрационной стены в грунте в ядре и основании Курейской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2001. №3. С. 31-36.
6. СТП 310.02.НТ-2017. Рекомендации по проектированию, расчётам и возведению противофильтрационного элемента из глиноцементобетонных буросекущихся свай / Под ред. Мильцина В.Л., Орищука Р.Н., Сольского С.В. СПб.: АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», АО «Ленгидропроект». 2017. – 118 с.
7. Прокопович В.С., Величко А.С., Орищук Р.Н. Напряженно-деформированное состояние земляной плотины с глиноцементобетонной диафрагмой (На примере

- земляной плотины Гоцатлинской ГЭС) // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2016. том 282. С. 87-98.
8. Рассказов Л.Н., Радзинский А.В., Саинов М.П. Плотина высотой 100 м с глиноцементобетонной диафрагмой по типу “стена в грунте” // Вестник МГСУ. 2014. №9. с. 106-115.
  9. Саинов М.П. Пространственная работа противофильтрационной стены // Инженерно-строительный журнал. 2015. №5. С. 20-33.
  10. Саинов М.П. Пространственная работа диафрагмы из буронабивных свай в теле каменной плотины // Приволжский научный журнал. 2014. №3. С. 43-47.
  11. Саинов М.П., Лубьянов В.В. Напряжённо-деформированное состояние противофильтрационных стен в основании грунтовых плотин // Инженерно-строительный журнал. 2017. №5(73). С. 96-112.
  12. Саинов М.П., Толстиков В.В., Тарасов А.А. Исследование напряжённо-деформированного состояния бетонной диафрагмы грунтовой перемычки при шарнирном соединении с основанием // Вестник Евразийской науки. 2018. №1. <https://esj.today/PDF/75SAVN118.pdf> (доступ свободный).
  13. Mirghasemi A.A., Pakzad M., Shadravan B. The world’s largest cutoff wall at Karkheh dam // The International Journal on Hydropower & Dams. 2005. Issue 2. pp. 2-6.
  14. Soroush A., Rayati M. Numerical analysis of Karkheh dam, foundation, and its cutoff wall subjected to earthquake loading. 2004. 13th World Conference on Earthquake Engineering. August. Canada Vancouver, B.C.
  15. Саинов М.П. Вычислительная программа по расчету напряжённо-деформированного состояния грунтовых плотин: опыт создания, методики и алгоритмы // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2013. Volume 9. Issue 4. С. 208-225.

**Sainov Mikhail Petrovich**

Moscow state university of civil engineering (national research university), Moscow, Russia  
E-mail: mp\_sainov@mail.ru

**Shaimiardianov Ildar Rinatovich**

Moscow state university of civil engineering (national research university), Moscow, Russia  
E-mail: petr.ildar@yandex.ru

## **Study of seismic stability of rockfill cofferdam with concrete diaphragm**

**Abstract.** The article deals with the results of numerical studies of stress-strain state at seismic loading of 16 m high rockfill cofferdam, whose seepage-control element is presented by a concrete diaphragm made of secant piles. The analyses were conducted for seismic impact with 9 points intensity. It was revealed that the rigid concrete diaphragm in the center of the dam worsens the cofferdam seismic stability. At seismic load in the upstream direction we may expect decompaction of the contact between the diaphragm and the soils and loss of the cofferdam upstream slope stability.

The study permitted revealing the main features of the diaphragm stress-strain state under action of seismic forces. It was revealed that the horizontal seismic load causes appearance of vertical compressive or tensile longitudinal force in the diaphragm. By the results of analyses the seismic load may cause shearing of the rigid diaphragm against the foundation. It is recommended to provide flexible connection of the diaphragm with the rock foundation in the form of a clay-cement concrete slab. From the point of view of the concrete diaphragm strength that seismic load is dangerous which is directed upstream. It increases the diaphragm bending deformations formed by static loads and causes appearance of tensile stresses in the diaphragm. By the results of analyses the concrete tensile strength may fail. It is recommended to make the diaphragm of clay-cement concrete.

**Keywords:** seismic stability; rockfill cofferdam; concrete diaphragm; numerical modeling; clay-cement