



УДК 556 УДК 626, 627, 699.842

**НОВЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
РАБОТАЮЩИХ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ НА ОКРУЖАЮЩИЕ ТЕРРИТОРИИ:  
ВЛИЯНИЕ ВЗАИМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЗДАНИЙ И ПЛОТИНЫ**

**Шумакова Елена Михайловна**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории охраны вод Института водных проблем РАН  
119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3

**Митина Наталья Николаевна**, д.г.н., профессор кафедры теории и методологии государственного и муниципального управления факультета государственного управления Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. 119991, Москва, Ломоносовский проспект, д. 27, корпус 4; по совместительству ведущий научный сотрудник лаборатории охраны вод Института водных проблем РАН. 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3.

---

*Работа выполнена в рамках темы ИВП РАН №FMWZ- 2022-0002 № государственной регистрации: 122041100236- 4, № 0147-2019-0004, № государственной регистрации: АААА-А19-119040990079-3*

---

*Аннотация.* Данный материал является результатом изучения и оценки на основе экспериментального материала возможности и последствий влияния работы водосливной плотины Жигулевской ГЭС на вибрации зданий в зависимости от их ориентации относительно плотины; показано наличие новой закономерности, требующего учета в регламентах застройки приплотинных территорий.

*Ключевые слова:* крупные гидротехнические сооружения, вибрации грунтов, вибрации жилых зданий, разрушение зданий под действием вибрации, виброзащита, регламенты застройки.

Безопасности территорий вблизи крупных плотин традиционно уделяется много меньше внимания, чем безопасности самих гидротехнических сооружений (ГТС). Точкой соприкосновения долгое время служило лишь моделирование зоны затопления в случае аварий на ГТС. Такие глобальные и мощные факторы риска, как природная геодинамика, наведенная сейсмичность и вибрации работающих гидросооружений, совершенно различным образом рассматривается с точки зрения обеспечения безопасности гидротехнического сооружения и с точки зрения обеспечения безопасности прилегающих освоенных территорий. Существующие регламенты гражданского строительства явно недостаточны в случае приплотинных территорий, так как не учитывают ряд малоизученных проявившихся относительно недавно факторов воздействия, так и

нелинейный результат их взаимодействия. В данной статье в основном рассматривается вибрационное воздействие работающей водосливной плотины одной из крупных Волжских ГЭС, которое одновременно может служить и индикатором состояния среды и ее устойчивости. В некоторых случаях вибрации приводят к разрушению строительных конструкций зданий – фундаментов, несущих и ограждающих конструкций. В отдельное рассмотрение вынесен вопрос о превышении санитарных норм воздействия вибраций в жилых зданиях, о воздействии вибрации на население, проживающее вблизи ГЭС. Список плотин, вблизи которых вибрационное воздействие ГЭС на существующие здания проявляется ощутимым образом, постоянно увеличивается. В настоящее время это Загорская ГАЭС, Жигулевская ГЭС, ряд крупных ГЭС Китая [1, с. 49-55], стали хотя бы частично доступны сведения о вибрации плотины Нурекской ГЭС и жилых зданий расположенного ниже населенного пункта. По экспертным оценкам, проявились интенсивные вибрации плотины, грунтов в районе отдельных ГЭС США. Попытки разработать и реализовать защитные мероприятия в связи с вибрационным воздействием ГЭС без комплексного понимания характера воздействия малоэффективны и дорогостоящи [2, с. 34–36]. Так, в районе Жигулевской ГЭС по неустановленной причине (не представляется возможным даже определить природный или техногенный ее характер) произошло скачкообразное увеличение интенсивности вибраций грунтов на территории в радиусе 5–6 км от центра плотины, при этом иные характеристики остались неизменными – холостые расходы воды, интенсивность вибраций самой водосливной плотины в период пропуска половодья – основного источника интенсивных вибрации для окружающей территории, а также интенсивность вибраций – собственных резонансных колебаний зданий (последнее можно объяснить общей жесткостью сооружения – здания).

В целом в результате мониторинга вблизи Загорской ГЭС и Жигулевской ГЭС и крупных ГЭС КНР с начала XXI в. выявлены следующие природные и техногенные факторы, теоретически могущие усиливать интенсивность вибрационного воздействия работающей плотины, такие как:

инженерно-геологические условия – уровень грунтовых вод, наличие гравитационных процессов, грунтовые условия;

тектоническое строение местности и наличие тектонических разрывных нарушений;

конструктивные особенности зданий, по-разному реагирующих на вибрации в зависимости от горизонтальных и вертикальных размеров, материала фундаментов и стен и т.п.

При изучении возможности дифференциации вклада отдельных составляющих в процесс вибрации зданий (резонансных колебаний на собственных частотах) большое влияние было уделено изучению и выделению влияния гравитационных процессов. Во-первых, ориентация зданий относительно уклонов местности - фактор, который обозначен и учитывается в строительстве. В районе Жигулевской ГЭС вне период пропуска половодья и интенсивных вибраций грунтов значение уклонов не требуют их учета при строительстве, однако если рассматривать интенсивное вибрационное воздействие как дестабилизирующий фактор среды сродни сейсмической нагрузке, то значения уклонов становятся пограничными, а на небольшой части прибрежного склона уже требуют учета при строительстве. Характер различных разрушений отдельных строительных конструкций и фрагментов зданий косвенно подтверждает эту закономерность. В то же время наличие/отсутствие уклонов местности не всегда позволяет однозначно спрогнозировать реакцию зданий и интенсивность возникающих колебаний.

В итоге была выдвинута гипотеза о наличии нового ранее не учитываемого фактора. Предположительно роль может играть взаимная ориентации зданий и плотины, когда совпадение ориентации длинных осей, «соосность», может приводит к усилению резонансных явлений в зданиях [3, с. 28-34].

Оценке данной гипотезы на основе имеющегося экспериментального материала посвящена данная работа.

На приплотинной территории Жигулевской ГЭС в радиусе 5-6 км вверх и вниз по течению от плотины расположено более 300 жилых зданий. Основу застройки составляют здания типовых строительных серий: приблизительно квадратные в плане здания башенного типа высотой 14-16 этажей, длинномерные здания высотой 4-5 этажей (60-х годов) и 9-этажные крупнопанельные здания 80-х годов постройки, которых большинство. Практически все здания ориентированы в силу особенностей застройки строго определенным образом на местности, и следовательно, относительно плотины, в то время как уклоны распределены неравномерно

Всего измерениями интенсивности возникающих в период пропуска половодья через плотину ГЭС было охвачено приблизительно 120 зданий различного типа. Приблизительно половина зданий расположена в верхнем бьефе. Из нескольких десятков 9-этажных зданий, расположенных в верхнем бьефе, сложную конфигурацию имеют 12-13 зданий (с учетом некоторых разновидностей плановой привязки).

Статистический анализ данных мониторинга показывал, что практически все жилые здания выше плотины, имеющие существенные разрушения ограждающих строительных конструкций и значительную динамику этих разрушений, ориентированы одинаково, близко к направлению север-юг. Это направление соответствует перпендикулярному к урезу воды направлению, что не является действующим фактором ни теоретически, ни практически, а также направлению перпендикулярно береговому склону на наиболее крутых его участках. Причем, наиболее подверженные колебаниям объекты, имеющие максимальную динамику разрушений (адреса ул. К..., д.18, ул. А. М..., д.30) ориентированы практически перпендикулярно береговому склону. Отсюда было предположено и на основании геологических материалов и заключений подтверждено возможное влияние гравитационных процессов на интенсивность резонансных колебаний зданий. Гравитационные склоновые процессы на склонах высоких пойменных террас верхнего бьефа в условия лессовидных супесей и суглинков, наличия линз воды на локальных водоупорах происходят по типу оплыва, одновременно имеет место незавершенное за более чем полвека переформирование берегов, которое не позволяет склонам стабилизироваться. То есть, речь идет о природном (уклон) факторе, действие которого обостряется в результате техногенного вибрационного воздействия; имеет место недоучет инженерно-геологических условий при строительстве. Однако желательным было дифференцировать вклад именно уклонов на развитие резонансных колебаний зданий. Для этого была изучена интенсивность колебаний наиболее распространенных в застройке 9-этажных крупнопанельных зданий с различным сочетанием ориентации относительно плотины и относительно уклонов местности. Для сопоставления выбраны расположенные рядом здание прямоугольной формы, ориентированное перпендикулярно к урезу воды, к береговому склону здание прямоугольной формы №1 (адрес ул. К..., д.18) и здание №2 (адреса ул. К..., д.45), имеющее в плане сложную трапециевидную конфигурацию, когда крайние секции взаимно перпендикулярны друг другу, а средняя направлена к крайним под углом 135° (адрес ул. Коммунистическая, д. 45). Пространственная конфигурация здания № 2 позволяет с наиболее доступной в рамках имеющегося экспериментального материала точностью оценить влияние на различные его фрагменты только их ориентации на местности, предположительно относительно склона. Действующие строительные нормы, как уже говорилось ранее, требуют ориентации длинной оси зданий вдоль склона с определенной величины уклона местности. Уклоны территории верхнего бьефа Жигулевской ГЭС имеют пограничное значение даже с учетом усиления склоновых процессов под влиянием вибрации. Поэтому в ходе исследования ставилась и решалась следующая задача – *подтвердить влияние на интенсивность вибраций наличием и направленности уклонов, показав, что в зданиях (фрагментах зданий), ориентированных перпендикулярно склону (параллельно вектору максимального уклона), возникают даже при незначительных, пограничных величинах уклонов более интенсивные резонансные колебания; следует рекомендовать уклонов в зоне вибрационного воздействия*

*работающих ГТС учитывать при строительстве и эксплуатации наличие даже незначительные и пограничные значения уклонов местности.*

Однако в ходе выполнения работ **выявлена неоднозначность зависимости их интенсивности от ориентации относительно господствующего уклона местности.** Установлено, что различно ориентированные фрагменты здания № 2 имеют разницу в интенсивности вибраций на уровне верхнего этажа приблизительно в три раза (при этом остальные условия принимались равными); более сильные вибрации зафиксированы во фрагменте здания №2, ориентированном не параллельно, а перпендикулярно господствующему уклону местности, но параллельно проблемному зданию №1. В то же время интенсивность колебаний на уровне верхнего этажа во фрагментах здания, ориентированных перпендикулярно и под углом 45° к господствующему уклону приблизительно равна и ниже в три раза. При этом совпадает общая ориентация на местности проблемного, обладающего остро резонансными свойствами, здания №1 и проблемной, обладающего остро резонансными свойствами, секции здания №2. Ориентация длинных осей указанных строительных объектов и фрагментов соответствует ориентации длинной оси плотины – они параллельны, «соосны». Более не удалось на данном участке местности даже предположить фактор, перекрывающий влияние гравитационных процессов.

В то же время, абсолютная интенсивность колебаний обладающих остро резонансными свойствами здания №1 и фрагмента здания №2, соосных друг другу и плотине, также отличается, в здании №1 она выше приблизительно в 1,5 раза, и эту разницу можно предположительно связать именно с ориентацией здания №1 в более опасном направлении перпендикулярно склону, то есть дифференцировано качественно и количественно влияние именно гравитационных процессов, ориентации здания относительно господствующих уклонов. Однако количественная оценка здесь не очень точная, так как в крайних подъездах 4-х подъездного здания № 1 интенсивность колебаний немного отличается, приблизительно на 7-10%, не ясно, какие величины следует сравнивать.

Подводя итоги, можно сказать, что влияние незначительных согласно действующим СНиП уклонов местности в условиях динамических (в данном случае, вибрационных) воздействий удалось показать и дифференцировать, то есть первоначально поставленная задача выполнена. Но «попутно» показано, что существует иной существенный фактор развития резонансных явлений, предположительно, ориентация зданий относительно плотины, «соосность».

Возможно ли более корректно опровергнуть или подтвердить гипотезу о влиянии ориентации зданий относительно плотины на основе имеющегося экспериментального материала?

На примере единого объекта, подобного объекту №2 – нет. Из имеющихся 12-13 зданий сложной конфигурации, имеющих три разно ориентированные секции, одно из зданий имеет крайние секции различной длины, два имеют иную ориентацию средней секции (основания трапеции), одно здание имеет форму зигзага. Инструментальными наблюдениями за интенсивностью вибраций охвачены еще два здания, но измерения выполнены в одной секции. Измерения интенсивности вибраций во всех трех разнонаправленных фрагментах зданий более нигде не были выполнены.

Существуют данные измерения интенсивности колебаний ряд близкорасположенных зданий, ориентированных взаимно перпендикулярно. Расстояние между ними местами не превышает 20-50 м. В первом приближении для оценки влияния ориентации здания относительно плотины можно использовать подобные данные. Это достаточно корректно в связи с тем, что длинномерные крупнопанельные здания имеют ленточные фундаменты, в большинстве своем разбитые на секции. Также, во многом из-за сложного рельефа местности, большинство зданий верхнего бьефа разбито на отдельные секции по вертикали и местами в плане. Эти секции допустимо рассматривать как

соприкасающиеся отдельные объекты, хотя конечно здесь будет иметь место большая синхронизация колебаний.

Влияние ориентации длинной оси здания на интенсивность собственных колебаний, возникающих в результате вибрации плотины и грунтов, показано на примере длинномерных зданий определенного типа, влияние, возможно, менее существенное, может быть обнаружено и на объектах иной конструкции.

Оценка возможности теоретического обоснования возможности влияния взаимной ориентации зданий и плотины на развитие резонансных колебаний зданий показала следующее. Влияние взаимной ориентации объектов при развитии резонансных явлений известно в физике твердого тела, в технических науках как «соосность». К большемерным строительным объектам, каковым являются жилые здания, сведений о применении понятия «соосности» в справочных, научных, нормативных материалах автору найти не удалось. Развитие резонансных явлений в сложных телах также хорошо известно, например, как одна из основных причин разрушения зданий при землетрясениях, однако сведения о влиянии ориентации относительно сейсмических воздействий (кроме вертикальных воздействий) автором не найдено. Следует отметить, что в работах НИС «Гидропроект» от 1979 г. предлагался следующий механизм возникновения экстремально сильной вибрации водосливной бетонной плотины Жигулевской ГЭС при пропуске экстремального половодья: происходит самосинхронизация колебаний отдельных секций плотины, и вся водосливная плотина начинает работать как единый жесткий штамп. Но речь шла только о плотине. В их же рекомендациях от 1979-1980 гг. затрагивался вопрос о возможном влиянии ориентации зданий относительно плотины, предлагалось ограничительные расстояния для строительства жилых зданий вблизи плотины в зависимости от этажности и ориентации, но более опасным для строительства обозначено направление зданий перпендикулярно телу плотины, а не параллельно, как показано по результатам данного исследования. Не представляется возможным установить, на основании каких данных выданы эти рекомендации.

Автором по результатам амплитудно-частотного анализа вибраций грунтов в период пропуска половодья показано, что область наиболее интенсивного динамического воздействия имеет рупорообразную форму, которая может возникать в случае, когда плотина работает как единый жесткий штамп и излучает энергию направленно по типу антенны. Однако речь шла об очень устойчивой конструкции – бетонной водосливной плотине, а не о типовых панельных зданиях.

Однако все вместе данные факты подтверждают возможную верность гипотезы о влиянии «соосности».

Допустимо предположить, и даже с большой степенью вероятности считать доказанным, что при определенном масштабе объектов и процессов, например, в случае вибрационного воздействия работающего ГТС на здания, возможно рассматривать плотину и жилые здания как единые твердые тела, вступающие в резонанс, интенсивность которого увеличивается в случае соосности объектов.

*В случае верности предположения имеет место новая научно-практическая задача.*

Также констатация новой закономерности – *усиление резонансных колебаний (вибраций) в зданиях, соосных плотине* - задает новые ориентиры при застройке и эксплуатации приплотинных территорий.

## Выводы

1. Постоянно выявляются новые закономерности вибрационного воздействия ГТС, часто не имеющие теоретического обоснования.
2. Влияние ориентации зданий относительно плотины задает новые ориентиры в планировке приплотинных территорий в первую очередь в РФ, КНР, где вибрации зданий проявились наиболее значимо.

3. Целесообразно одновременно с продолжением научных исследований внедрять учет уже выявленных и природных, и техногенных факторов, воздействие которых достаточно показано. В этом плане особое значение имеет распространение опыта работ в районе Жигулевской ГЭС – объекта с наиболее длительным мониторингом - на другие гидроузлы.

4. Неучет выявленных факторов ведет к нерациональному использованию средств при новом строительстве и эксплуатации уже имеющихся объектов.

#### **Список литературы:**

1. Шумакова Е. М. Вибрации зданий вблизи крупных гидроузлов Китайской Народной Республики и Российской Федерации — общие закономерности и региональные особенности// Экология урбанизированных территорий. – 2023. – №. 3. – С. 49-55.

2. Митина Н.Н., Шумакова Е.М., Ващенко М.О. Приплотинные территории крупных гидротехнических сооружений как объект государственного управления// Бизнес. Образование. Право. – 2021. – №. 4 (57). – С. 30-39.

3. Шумакова Е.М. Дифференциация вклада природных и техногенных факторов в усиление вибрационного воздействия работающего гидротехнического сооружения на грунты и строительные сооружения приплотинных территорий// Безопасность жизнедеятельности. – 2022. – №. 12. – С. 28-34.

### **NEW PATTERNS OF VIBRATION IMPACT OF OPERATING HYDRAULIC STRUCTURES ON SURROUNDING TERRITORIES - IMPACT OF ORIENTATION OF BUILDINGS AND DAMS**

*Elena M. Schumakova, Natalia N. Mitina*

*Abstract.* The article is the result of studying and assessing on the basis of experimental material the possibility and consequences of the influence of the operation of the spillway dam of the Zhigulevskaya hydroelectric station on the vibrations of buildings depending on their orientation relative to the dam; shows the presence of a new pattern that requires consideration in the regulations for the development of dam areas.

*Keywords:* hydraulic structures, dam, vibrations of soils, vibrations of buildings, destruction of buildings under the influence of vibration, vibration protection, building regulations.