

Статья оригинальная

УДК 502/504: 627.83:626.88

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-75-84

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ПЛОТИНЫ ЧИРКЕЙСКОЙ ГЭС

**БАКШТАНИН АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ** <sup>✉</sup>, канд. техн. наук, доцент,  
заведующий кафедрой  
bakshtanin@mail.ru <sup>✉</sup>

**ШИРЯЕВА МАРГАРИТА АЛЕКСАНДРОВНА**, бакалавр  
margaretshiryeva@gmail.com

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 127434; г. Москва, Прянишникова, 19, корп. 28. Россия

*Представлены результаты расчетов данных динамических испытаний плотины Чиркейской ГЭС с помощью первичной обработки результатов измерения для выявления качества обработки информации существующими методами. В работе приводятся результаты измерений по созданию математической модели плотины Чиркейской ГЭС. Для экспериментального определения частот и форм собственных колебаний гидротехнических сооружений Чиркейской ГЭС использовались методы, основывающиеся на изучении статистических характеристик колебаний, возникающих под влиянием динамических воздействий оборудования и внешней среды. Построены пространственно-частотные диаграммы распределения интенсивности колебаний в радиальном направлении, реализован алгоритм для использования данных по обеим опорным точкам при идентификации собственных частот и форм плотины, построена пространственно-частотная диаграмма распределения, усредненного по двум опорным точкам, сглаженного интерполированного вдоль плотины с равномерным шагом коэффициента преобразования на уровне гребня.*

**Ключевые слова:** моделирование плотины, ГЭС, пространственно-частотные диаграммы, передаточная функция, динамические тестовые испытания

**Формат цитирования:** Бакштанин А.М., Ширяева М.А. Динамические исследования частот и форм колебаний плотины Чиркейской ГЭС // Природообустройство. – 2021. – № 4. – С. 75-84. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-75-84.

© Бакштанин А.М., Ширяева М.А., 2021

Original article

## THE DYNAMIC FREQUENCIES AND SHAPES OF VIBRATIONS RESEARCH OF THE DAM OF THE CHIRKEYSKAYA HPP

**BAKSHANIN ALEXANDER MIKHAILOVICH** <sup>✉</sup>, candidate of technical sciences,  
associate professor, head of the department  
bakshtanin@mail.ru <sup>✉</sup>

**SHIRYAEVA MARGARITA ALEXANDROVNA**, bachelor of the  
margaretshiryeva@gmail.com

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, ul. Pryanishnikova, 19, building 28. Russia

*The purpose of the research is to monitor the amplitude-frequency characteristics on the example of the Chirkeyskaaya HPP dam for further assessment of the state of hydraulic structures and hydroelectric units of the HPP, as well as to develop an automated system for seismometric control of hydraulic structures of the Chirkeyskaaya HPP. The article presents the results of modeling and calculations of dynamic test data of the Chirkeyskaaya HPP dam using*

*the primary processing of measurement results to identify the quality of information processing by existing methods. The paper presents the results of measurements to create a mathematical model of the dam of the Chirkeyskaya HPP. Methods were used based on the study of the statistical characteristics of vibrations arising under the influence of the dynamic effects of equipment and the external environment for the experimental determination of the frequencies and modes of natural vibrations of the hydraulic structures of the Chirkeyskaya HPP. Spatial-frequency diagrams of the vibration intensity distribution in the radial direction were constructed, an algorithm was implemented to use data for both reference points when identifying natural frequencies and dam shapes, a spatial-frequency distribution diagram was constructed, averaged over two reference points, smoothed interpolated along the dam with a uniform step the conversion factor at the ridge level.*

**Keywords:** dam modeling, HPP, spatial frequency diagrams, transmission function, dynamic test research

**Format of citation:** Bakhtanin A.M., Shiryayeva M.A. The dynamic frequencies and shapes of vibrations research of the dam of the Chirkeyskaya HPP // Prirodoobustroystvo. – 2021. – № 4 – S. 75-84. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-75-84.

**Введение.** В последнее десятилетие исследования составление схем и разработки проектов в области изучения гидротехнических сооружений стали крайне актуальными для всей территории РФ [1].

Особый интерес на сегодняшний день вызывают ГТС, расположенные в сейсмоопасных регионах страны, в связи с высоким риском возникновения аварий. Высоконапорные плотины и обширные водохранилища построены в горных, сейсмически активных районах. При сейсмическом воздействии плотина совершает колебательные движения. Частота собственных колебаний системы на определенных участках при определенных условиях может достигать значения, близкого к резонансному [2]. Это может привести к выходу из строя гидротехнического сооружения с негативными последствиями, которые трудно предсказать. Таким образом, мониторинг и динамические испытания плотины, развитие в этом направлении и автоматизация мониторинга представляются актуальными и необходимыми при проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений.

В состав Чиркейского гидроузла входят следующие гидротехнические сооружения:

- глухая арочная бетонная плотина двойкой кривизны высотой 232,5 м, длиной по гребню 338 м включая устой, шириной гребня 6 м, на контакте с пробкой 30 м, высотой арочной части 184,5 м, отметка гребня – 359,5 м;

- здание ГЭС приплотинного типа расположенное у низовой грани пробки плотины. В нем размещены 4 агрегата мощностью 250 МВт каждый, компоновка агрегатов

двухрядная с двухъярусным расположением отсасывающих труб;

- эксплуатационный водосброс туннельного типа, расположенный на левом берегу в 85 м от тела плотины, рассчитанный на пропуск расхода 2400 м<sup>3</sup>/с, состоящий из головного сооружения, туннельного участка длиной 509 м, открытого лотка длиной 145 м и бокового водослива с трамплином длиной по фронту 75 м;

- Тишиклинская дамба, расположенная в 10 км от плотины, длиной по гребню 1300 м, максимальной высотой 12 м, шириной по гребню 5 м, по основанию 68 м. В теле дамбы имеется ирригационный водовыпуск в виде железобетонной трубы сечением 2 × 2 м, оборудованной плоскими затворами на глубине 28 м. Гребень дамбы находится на отметке 359,5 м. Общая длина напорного фронта сооружений составляет 1638 м (1300 м – Тишиклинская дамба, 338 м – плотина с устоем).

На сегодняшний день способ измерения динамических характеристик конструкций ГТС апробирован и может быть автоматизирован для Зейской, Красноярской и Саяно-Шушенской ГЭС [3].

Система сейсмологического мониторинга Чиркейской ГЭС является отечественной разработкой и включает в себя 12 цифровых регистрирующих станций. Однако не проводятся наблюдения на гребне плотины, в галереях и береговых примыканиях на отметках 220, 178, 163 и 131 м. В связи с этим требуются установка дополнительных датчиков и дополнительное проведение исследований для внедрения автоматизированной системы.

**Цель исследований:** проведение мониторинга амплитудно-частотных характеристик на примере плотины Чиркейской ГЭС для дальнейшей оценки состояния гидротехнических сооружений и гидроагрегатов ГЭС, а также для разработки

автоматизированной системы сейсмометрического контроля гидротехнических сооружений Чиркейской ГЭС.

**Материалы и методы.** В качестве исследуемого объекта было выбрано гидротехническое сооружение – Чиркейская ГЭС.



Рис. 1. Панорама Чиркейского ущелья, нижнего бьефа и арочной плотины  
Fig.1. Panorama of the Chirkeysky gorge, downstream and arch dam

Ключевым моментом для мониторинга объекта с использованием контроля собственных частот является наличие адекватной математической модели и методики ее применения, в том числе экспериментальное определение точности измерения диагностируемых параметров.

Естественными этапами создания математической модели являются:

- создание базового математического описания объекта;
- проведение натурных наблюдений;
- верификация математической модели на основании измеренных динамических параметров [4, 5].

Наиболее распространенный способ построения моделей предполагает два основных этапа: построение трехмерной твердотельной модели с использованием систем автоматизированного проектирования и последующее разбиение полученной модели на сетку конечных элементов.

Конечно-элементная модель системы «Плотина-основание» Чиркейской ГЭС разработана с использованием универсальной программной системы конечно-элементного анализа «ANSYS».

Детальное изображение района плотины со стороны нижнего и верхнего бьефа представлено на рисунке 2.

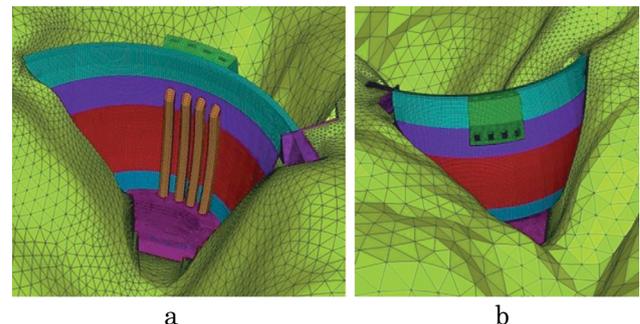


Рис. 2. Конечно-элементная динамическая модель системы «Плотина-основание»:

а – вид со стороны НБ; б – вид со стороны ВБ

Fig. 2. Finite-element dynamic model of the «dam-base» system:

а – view from the side of the downstream, б – view from the side of the upstream

Модель плотины состоит из ряда подбластей, часть которых выделена по принадлежности к конструктивному элементу (телу плотины, пробке, правобережному устью, турбинным водоводам и водоприемнику ГЭС), а другая часть соответствует разделению тела плотины по свойствам бетона. На рисунке 3 показана конечно-элементная динамическая модель плотины Чиркейской ГЭС: вид со стороны нижнего бьефа, сверху и аксонометрическая проекция.

При построении сетки конечных элементов использованы конечные элементы типа SOLID186 следующих конфигураций:

- гексаэдр (всего 101910 элементов, из них в плотине – 93908);
- тетраэдр (всего 987516 элементов, из них в плотине – 21760);
- клин (всего 1563 элемента, из них в плотине – 1491);
- пирамида (в зонах перехода от гексаэдров к тетраэдрам, всего 9973 элемента, из них в плотине – 2124).

Для экспериментального определения частот и форм собственных колебаний гидротехнических сооружений Чиркейской ГЭС использовались методы, основывающиеся на изучении статистических характеристик колебаний, возникающих под влиянием динамических воздействий оборудования и внешней среды (Ambient Vibration Methods, operational modal analysis). Указанные методы обладают преимуществом, заключающимся в том, что их использование не требует применения специальной аппаратуры.

В качестве исходных данных для определения частот и форм собственных колебаний использовались файлы с записями зависимостей от времени скоростей и ускорений для ряда точек наблюдений [6, 7].

Для измерения значений частот собственных колебаний плотины и определения форм колебаний были выполнены исследования по программе динамических тестовых испытаний (ДТИ) плотины Чиркейской ГЭС. ДТИ проводились в период с 25 июля по 9 августа 2019 г. при среднем УВБ 530,8 м. В период проведения динамических исследований попуски не производились.

В галерее на отметке 315 в секциях XVI, X, I, VII, XV расположены пять пунктов наблюдений сейсмологической сети. Размещение установки датчиков и схема проведения измерений представлены на рисунке 4.

Система инженерно-сейсмометрических наблюдений размещается непосредственно на сооружениях ГЭС, в основании и на береговых примыканиях плотины. Датчики инженерно-сейсмометрической сети располагаются таким образом, чтобы регистрировать динамические характеристики в ряде точек сооружений и береговых примыканий во время землетрясений, а также при работе технологического оборудования ГЭС и возможного воздействия других техногенных источников.

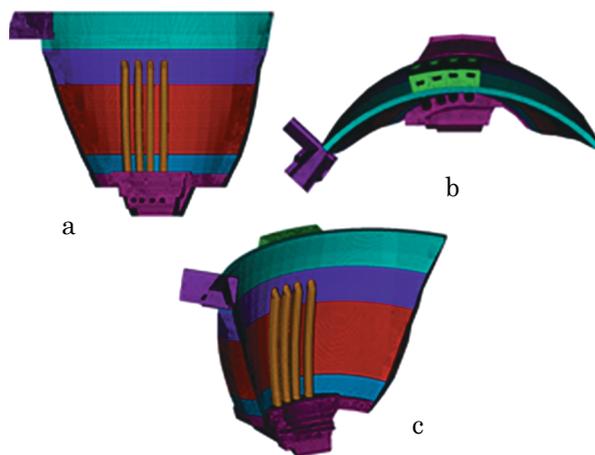


Рис. 3. Конечно-элементная модель плотины:

- a) модель плотины, вид со стороны НБ;
- b) модель плотины, вид сверху;
- c) модель плотины, аксонометрическая проекция

Fig.3. Finite element model of the dam:

- a) model of the dam. View from the downstream side;
- b) model of the dam. Top view;
- c) dam model. Axonometry

Одна из сейсмометрических станций размещается в грунте основания вне зоны непосредственного влияния (пригрузки) плотины, в штольне в береговом примыкании, на удалении в массив более чем на 50 м, на том берегу, где грунты более близки или соответствуют грунтам I категории по сейсмическим свойствам, и уровень техногенных помех ниже. Такая станция служит опорной станцией сейсмометрической системы и используется как эталонная при мониторинге изменений колебательных характеристик плотины, других сооружений гидроузла и грунтового основания. На ней установлен, кроме сейсмометрической, еще и комплект сейсмологической аппаратуры.

Для тестирования работоспособности аппаратуры и при проведении рекогносцировочных тестовых замеров использовался режим телеметрии с выводом измерительной информации на экран ноутбука [8, 9].

Пьезометрические акселерометры А1638 имеют индивидуально откалиброванную чувствительность около  $50 \text{ мВ} \cdot \text{с}^2/\text{м}$ , проводят измерения линейных ускорений до  $5 \text{ м}/\text{с}^2$  в диапазоне рабочих частот 0,1-400 Гц при диапазоне рабочих температур  $\pm 40^\circ\text{C}$  с уровнем интегральных шумов не более  $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}/\text{с}^2$ .

Цифровой регистрирующий вольтметр «Flash Recorder» (далее – регистратор) имеет

8 измерительных каналов, позволяет фиксировать напряжение  $\pm 10\text{В}$ , используя для оцифровки аналогового сигнала АЦП разрядностью 16 бит (13,5 эффективного разряда). Регистратор пригоден для использования

в рабочем диапазоне температур  $+5\dots+55^\circ\text{C}$ . Запись данных ведется на внешнюю CD карту объемом до 16 Гб. При использовании регистраторов на ДТИ плотины Чиркейской ГЭС применялась частота дискретизации 1000 Гц.

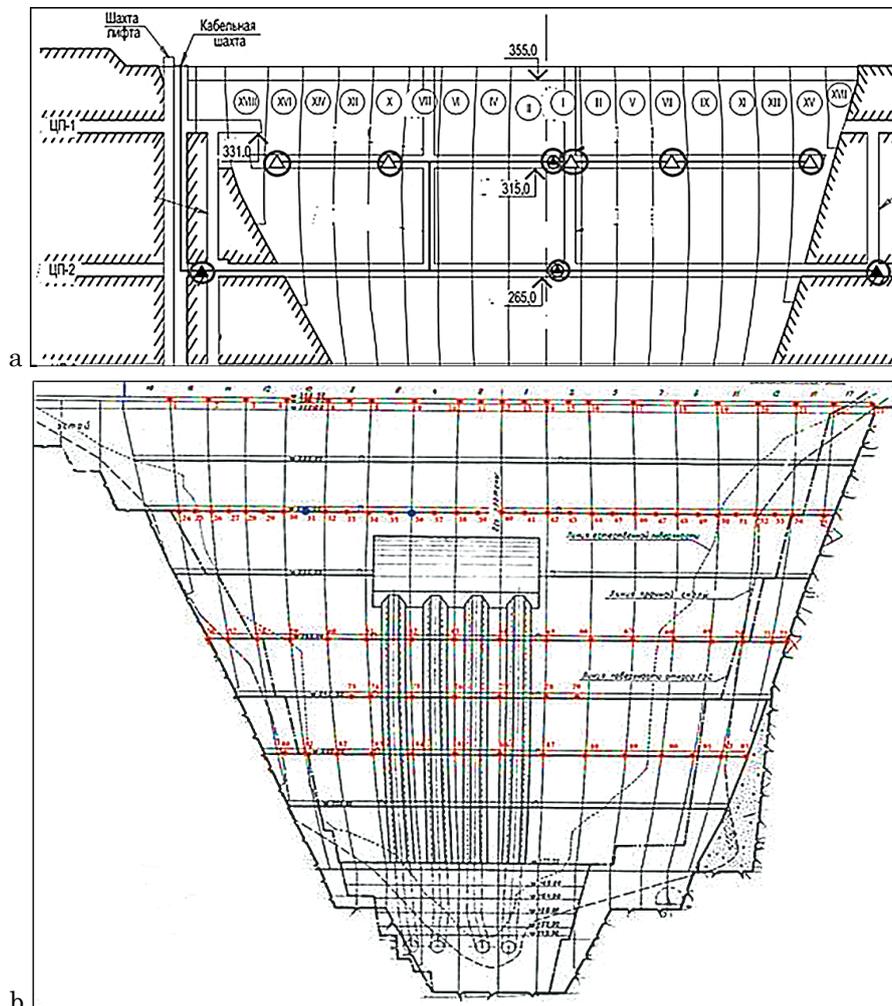


Рис. 4. Схемы:

- а – размещение датчиков на 5-ти пунктах наблюдений сейсмологической сети;  
 б – на 5-ти пунктах проводимых измерений

Fig.4. Schemes:

- a – placement of sensors on 5-ti observation points of seismological network,  
 b – measurements carried out

Условия по температуре, влажности и влагозащите при проведении ДТИ на гребне и в теле плотины соответствовали требованиям к указанной измерительно-регистрирующей аппаратуре.

В суммарных статистических расчетах не использовались измерения собственных частот, каналы которых – надежное определение частоты, т.к. они отключались

Итоговые данные результатов измерений отражены в таблице 1.

По измерительным сигналам компонентов ускорений и соответствующих им синхронизированным

компонентам опорных ускорений вычисляется комплексная передаточная функция (далее – ПФ). ПФ усредняется в скользящих окнах длительностью 32 с, со сдвижкой 8 с [10].

Модуль ПФ как функция частоты представляет собой коэффициент преобразования – безразмерную частотную характеристику, описывающую соотношение интенсивности колебаний в двух точках (измерительной и опорной) вне зависимости от уровня вибраций в момент синхронных измерений. Пример модуля ПФ для одной из измерительных точек приведен на рисунке 5.

## Результирующие показатели измерения частот

## Resulting indicators of frequencies measurements

Начало измерения <i>Beginning of measuring</i>		28.07.2019 10 : 00 : 00			
Общая продолжительность <i>Total duration</i>		86400.00 секунд			
Окончание измерения <i>End of measuring</i>		29.07.2019 10 : 00 : 00			
Номер <i>Number</i>	Диапазон <i>Range</i>	Ширина диапазона поиска, Гц <i>Width of searange Hz</i>	Ширина диапазона измерений, Гц <i>Width of measuring range, Hz</i>	Число заданных каналов <i>Quantity of the given canals</i>	Частота, Гц <i>Frequency, Hz</i>
1	2,1	0,026	0,026	20	2,0932
2	2,27	0,028	0,028	11	2,2632
3	2,78	0,070	0,070	22	2,7731
4	4,8	0,122	0,122	27	4,7981
5	5,94	0,075	0,075	22	5,8883
6	6,0	0,076	0,076	27	6,0147

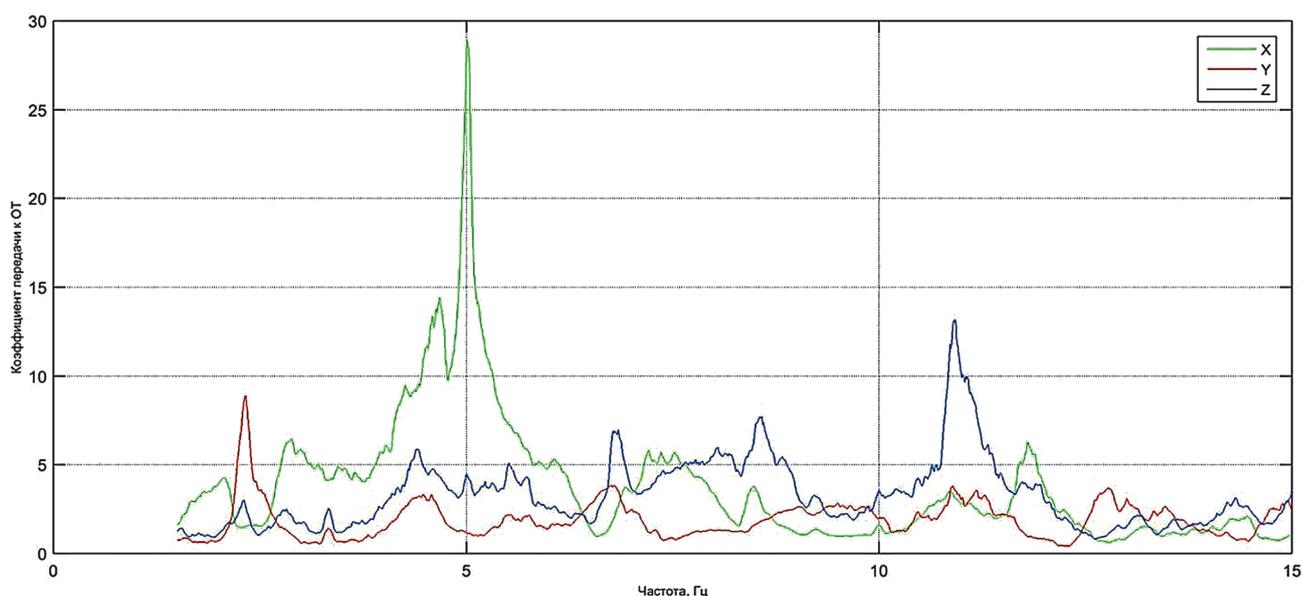


Рис. 5. Модуль ПФ от измерительной к опорной точке по трем компонентам  
Опыт 9, 29.07.2019, гребень, стык секций 2 и 4, точка 10

Fig. 5. PF module from the measuring to the reference point in three components  
Test 9, 29.07.2019, ridge, joint of sections 2 and 4, point 10

**Результаты и обсуждение.** При достаточно стабильной работе гидроагрегата (ГА) в период проведения измерений представление о характере и предположения о причинах пространственно-частотного распределения колебаний плотины можно сделать непосредственно в результате сопоставления амплитудных спектров в точках проведения измерений.

На спектрах, как правило, выделяются узкополосные пики на техногенных частотах (оборотная частота и ее гармоники), а совпадение положения спектральных пиков на различных отметках одной и той же секции может свидетельствовать о возбуждении колебаний на собственных частотах [11]. На рисунке 6 приведены характерные примеры сопоставления

амплитудных спектров ускорений на стыке 2 и 4 секций по трем отметкам плотины.

Были построены пространственно-частотные диаграммы распределения интенсивности колебаний в радиальном направлении (условно – вдоль потока) и в тангенциальном (условно – поперек потока) при измерениях 29 июля 2019 г. в 18 точках на гребне плотины. По оси ординат отложена частота, по оси абсцисс – длина дуги в метрах вдоль гребня плотины от правого берега к левому от стыка берегового примыкания и 18-й секции.

Интенсивностью цвета показан уровень амплитудного спектра ускорений.

Для использования данных по обеим опорным точкам при идентификации собственных частот и форм плотины был реализован следующий алгоритм:

1. Коэффициенты преобразования, полученные по каждой из двух опорных точек, были разделены на евклидову норму под множества значений коэффициентов в измерительных точках гребня. Тем самым значения коэффициентов были приведены к единому масштабу.

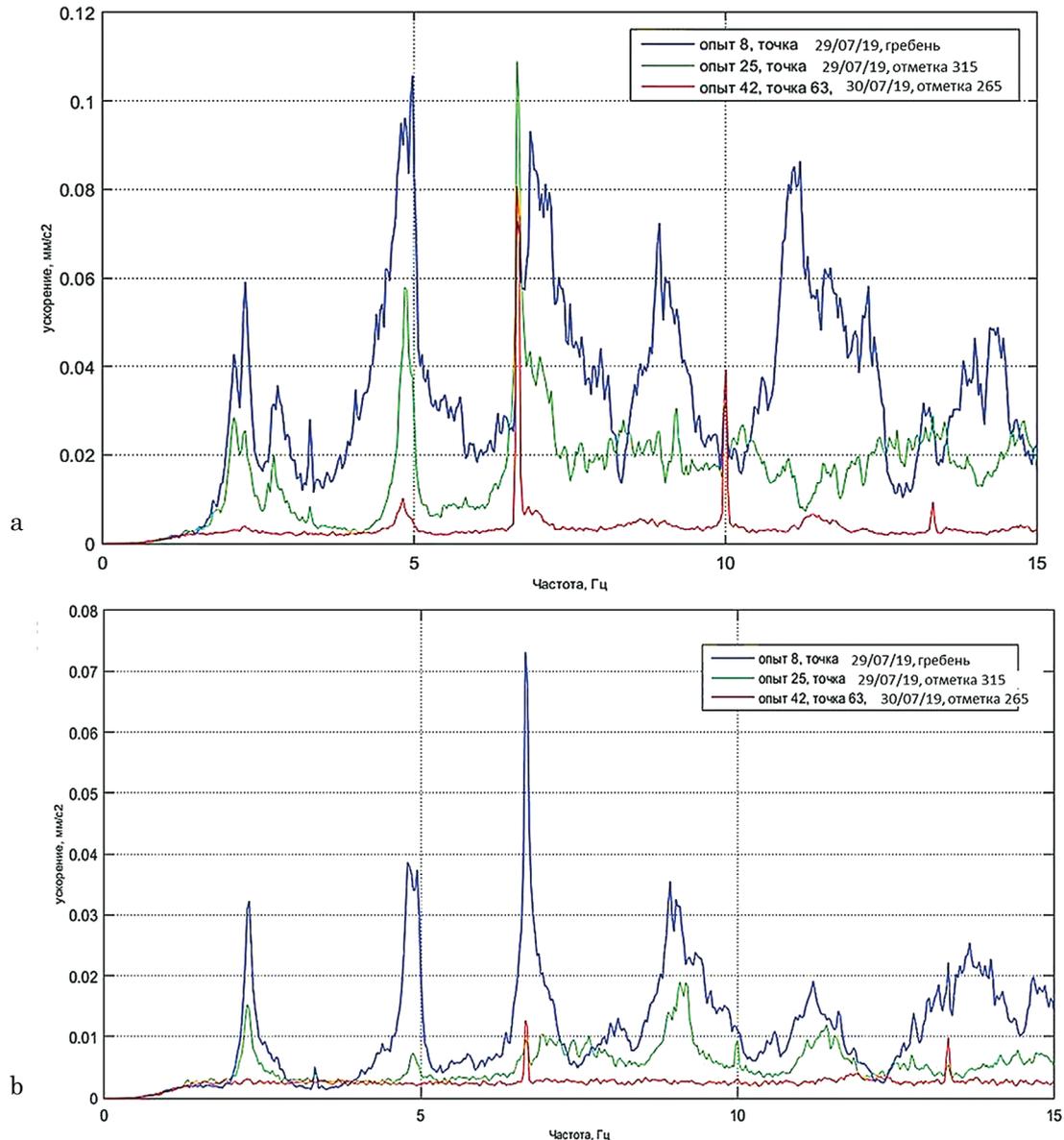


Рис. 6. Спектр ускорений:

a – по оси X вдоль потока; b – по оси Y поперек потока

Fig. 6. Spectrum of accelerations:

a – along the X axis – along the flow; b – along the Y axis – across the flow

2. Множества коэффициентов преобразования в измерительных точках на каждой отметке были объединены и рассмотрены как функция

от длины дуги по гребню плотины. Для каждой такой функции по всей сетке частот было проведено сглаживание, сгенерирована эквидистантная

сетка по координате с шагом в 1 м и проведена линейная интерполяция. Суть предложенного алгоритма проиллюстрирована на рисунке 7.

На рисунке 8 построена пространственно-частотная диаграмма распределения, усредненного по двум опорным точкам, сглаженного и интерполированного вдоль плотины с равномерным шагом коэффициента преобразования на уровне гребня.

3. По полученным данным путем последовательного просмотра конфигурации эюр могут быть идентифицированы низшие собственные частоты плотины и построены модули соответствующих собственных форм, если они носят ожидаемый характер.

На рисунке 9 представлена выделенная подобным образом форма колебаний на первой собственной частоте.

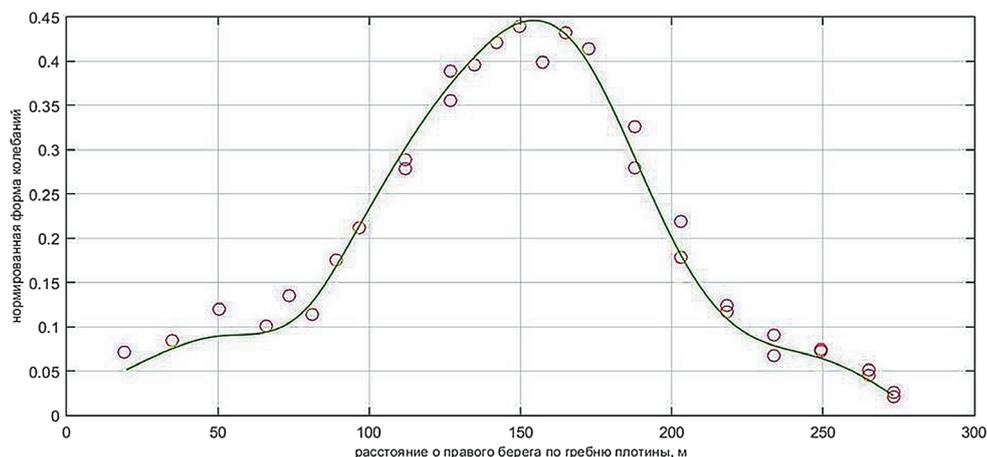


Рис. 7. Сглаживание коэффициента передачи по данным для 2-х опорных точек, гребень, частота 2,09 Гц

Fig. 7. Smoothing of transmission coefficient on the data for 2 reference points, ridge, frequency 2.09Hz

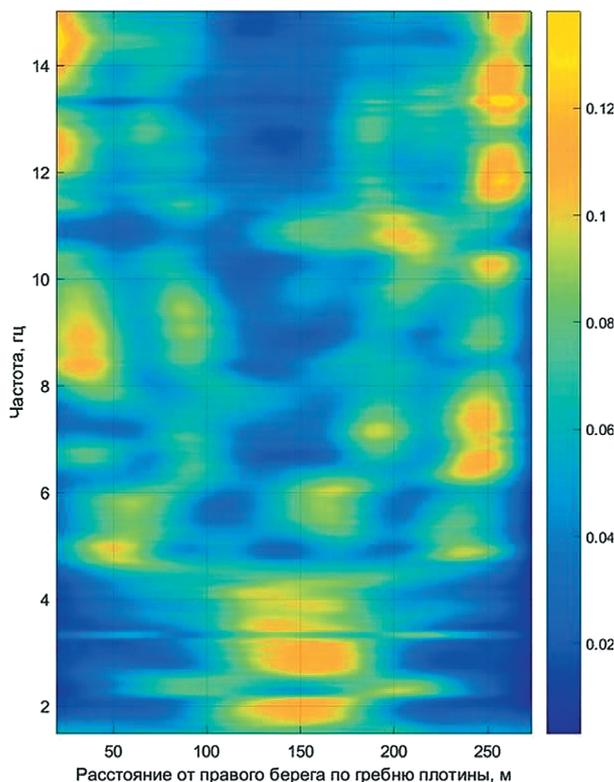


Рис. 8. Усредненный по двум опорным точкам, сглаженный и нормированный коэффициент передачи, гребень, опыты 2-19 и 51-66

Fig. 8. Averaged on two reference points, smoothed and normalized transmission coefficient, ridge, tests 2-19 and 51-66

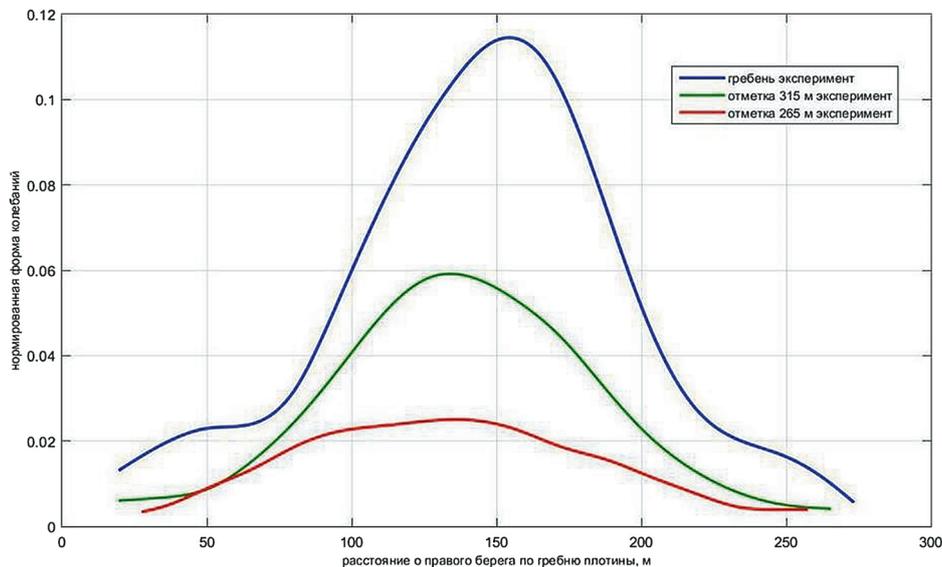


Рис. 9. Сопоставление модулей собственной формы на трех отметках, экспериментальная оценка собственной частоты – 2.09 Гц

Fig. 9. Comparison of modules of the own form at three marks, experimental estimation of the own frequency – 2.09 Hz

### Выводы

Проведение ДТИ занимает важное место для дальнейшего создания современной автоматизированной системы сейсмометрического контроля (АССК) и организации инженерно-сейсмометрических наблюдений за работой сооружений и береговых примыканий (сейсмометрический мониторинг) Чиркейской ГЭС.

В ходе проведения измерений на гребне плотины Чиркейской ГЭС время от времени наблюдалось движение автотранспорта, что создавало локальные источники виброн нагружения и могло вносить погрешность в дальнейшем определении передаточных функций. Соответствующие нестационарным вибрациям временные отрезки синхронно вырезались

из подвижного и опорного сигналов. На нижних отметках в центральной части плотины погрешность определения передаточных функций выше ввиду широкополосного стационарного шума, связанного с пульсациями гидродинамического давления в водоводах.

Были построены пространственно-частотные диаграммы распределения интенсивности колебаний в радиальном и тангенциальном направлениях на гребне плотины.

Построена пространственно-частотная диаграмма распределения, усредненного по двум опорным точкам, сглаженного и интерполированного вдоль плотины с равномерным шагом коэффициента преобразования на уровне гребня.

### Библиографический список

1. Черных О.Н. Оценка условий сопряжения бьефов и мероприятий по обеспечению надежности работы водосбросов высоконапорного гидроузла // Природообустройство. – 2020. – № 2. – С. 56-65.
2. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Гидродинамический расчет амплитудно-частотных характеристик плотины // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2017. – № 70. – С. 78-83.
3. Бакштанин А.М., Крылов А.П., Беглярова Э.С. Инвестиционная привлекательность приливной энергетики и факторы, определяющие ее развитие в мире // Природообустройство. – 2021. – № 2. – С. 50-57. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-50-57.

### References

1. Chernykh O.N. Otsenka uslovij sopryazheniya bjefov i meroproyatij po obespecheniyu nadezhnosti raboty vodosbrosov vysokonapornogo gidrouzla // Prirodoobustrojstvo. – 2020. – № 2. – S. 56-65.
2. Muzaev I.D., Kharebov K.S., Muzaev N.I. Hidrodinamichesky raschet amplitudno-chastotnyh karakterstik plotiny // Trudy instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN. – 2017. – № 70. – S. 78-83.
3. Bakshtanin A.M., Krylov A.P., Beglyarova E.S. Investitsionnaya privlekatelnost prilivnoj energetiki i factory, opredelyayushchie ee razvitie v mire // Prirodoobustrojstvo. – 2021. – No. 2. – S. 50-57. DOI10.26897 / 1997-6011-2021-2-50-57.

4. Кузьменко А.П. Идентификация форм собственных колебаний при сейсмометрическом обследовании и мониторинге плотин ГЭС // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 2. – С. 28-40.

5. Крылов А.П., Бакштанин А.М., Беглярова Э.С. Экспериментальные исследования микро-ГЭС с сифонным водоподводом // Гидротехническое строительство. – 2021. – № 3. – С. 22-26.

6. Короленко Д.Б., Кузьменко А.П., Москвичев В.В., Сабуров В.С. Информационная система сейсмометрического мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений: опыт моделирования, разработки и внедрения // Вычислительные технологии. – 2019. – № 5 (24). – С. 13-37.

7. Кузьменко А.П., Сабуров В.С. Идентификация форм собственных колебаний при сейсмометрическом обследовании и мониторинге плотин ГЭС // Известия ВНИИГ. – 2014. – Т. 274. – С. 22-41.

8. Гаджиев И.Ш., Егоров А.Ю., Никифоров А.А., Скоморовская Е.А. Инженерно-сейсмометрические наблюдения на гидроузлах Республики Дагестан // Известия ВНИИГ. – 2017. – Т. 284. – С. 89-101.

9. Марчук А.Н., Марчук Н.А. Использование сейсмограмм в анализе состояния системы «Плотина-основание» Чиркейской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 10. – С. 23-26.

10. Мардикханов А.Х., Шарифуллин В.Н. Программный комплекс оптимального планирования суточной нагрузки ГЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 5-6. – С. 114-118.

11. Отчет «Динамическое тестирование ГЭС Зейской ГЭС для актуализации динамического паспорта». – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2016.

#### Критерии авторства

Бакштанин А.М., Ширяева М.А. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Бакштанин А.М., Ширяева М.А. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 30.06.2021 г.

Одобрена после рецензирования 15.09.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

4. Kuzmenko A.P. Identificatsiya form sobstvennyh kolebanij pri seismometricheskikh ob sledovaniy i monitoringe plotin GES // Gidroteh nicheskoe stroitelstvo. – 2016. – No. 2. – S. 28-40.

5. Krylov A.P., Bakshtanin A.M., Beglyarova E.S. Experimentalnye issledovaniya micro-GES s siphonnym vodoprovodom // Gidroteh nicheskoe stroitelstvo. – 2021. – No. 3. – S. 22-26.

6. Korolenko D.B., Kuzmenko A.P., Moskvichev V.V., Saburov V.S. Information sistema seismometricheskogo monitoringa technicheskogo sostoyaniya gidrotehnicheskikh sooruzhenij: opyt modelirovaniya, razrabotki i vnedreniya // Vychislitelnye tehnologii. – 2019. – No. 5 (24). – S. 13-37.

7. Kuzmenko A.P., Saburov V.S. Identificatsiya form sobstvennyh kolebanij pri seismometricheskoi ob sledovaniy i monitoring plotin GES // Izvestia VNIIG. – 2014. – T. 274. – S. 22-41.

8. Gadzhiev I.Sh., Egorov A.Yu., Nikiforov A.A., Skomorovskaya E.A. Inzhenerno-seismometricheskie nablyudeniya na gidrouzlah respubliki Dagestan // Izvestia VNIIG. – 2017. – T. 284. – S. 89-101.

9. Marchuk A.N., Marchuk N.A. Ispolzovanie seismogram v analize sostoyaniya sistemy «plotina-osnovanie» Chirkejskoj GES // Gidroteh nicheskoe stroitelstvo. – 2014. – No. 10. – S. 23-26.

10. Mardikhanov A.Kh., Sharifullin V.N. Programmnyj kompleks optimalnogo planirovaiya sutochnoj nagruzki GES // Izvestiya vysshikh uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. – 2012. – No. 5-6. – S. 114-118

11. Otchet «Dinamicheskoe testirovanie GTS Zejskoj GES dlya aktualizatsii dinamicheskogo pasporta». – SPb.: VNIIG im. B.E. Vedeneva, 2016.

#### Criteria of authorship

Bakshtanin A.M. Shiryaeva M.A. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Bakshtanin A.M. Shiryaeva M.A. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 30.06.2021

Approved after reviewing 15.09.2021

Accepted for publication 24.09.2021