

О ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВОДОПРОВОДЯЩИХ ТРАКТАХ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

Павел Владимирович Громыко

Сейсмологический филиал ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (993)022-35-30, e-mail: gromykov@mail.ru

Виктор Сергеевич Селезнев

Сейсмологический филиал ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, директор, тел. (383)333-20-21, e-mail: sel@gs.nsc.ru

Представлены результаты анализа колебаний конструктивных элементов Саяно-Шушенской ГЭС, вызванных влиянием пульсаций давления жидкости в её водопроводящих трактах. Установлена связь между изменениями уровня данных колебаний и режимами работы гидроагрегатов. Показаны нагрузки гидроагрегатов, приводящие к образованию вихревого жгута под рабочим колесом в отсасывающей камере и к резонансным эффектам в теле плотины.

Ключевые слова: Саяно-Шушенская ГЭС, динамические воздействия, пульсации давления жидкости, собственные колебания, плотина, водовод, гидроагрегат.

PULSATION OF THE PRESSURE OF LIQUID IN WATER-CONDUCTING TRACKS OF THE SAYANO-SHUSHENSKAYA HPP

Pavel V. Gromyko

Seismological Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptuyug, Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (993)022-35-30, e-mail: gromykov@mail.ru

Victor S. Seleznev

Seismological Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptuyug, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Director, phone: (383)333-20-21, e-mail: Sel@gs.nsc.ru

The results of the analysis of oscillations of the structural elements of the Sayano-Shushenskaya HPP, caused by the influence of fluid pressure pulsations in water conduits, are presented. The connection between changes in the level of these fluctuations and loads of operation of hydraulic units is set. The load ranges of hydraulic units, leading to the formation of a vortex beam under the impeller of the hydraulic unit in the suction chamber and to resonant effects in the body of the dam are shown.

Key words: Sayano-Shushenskaya HPP, dynamic impact, fluid pressure pulsation, natural oscillations, dam, water conduit, hydraulic unit.

Исследование основано на данных экспериментальных работ, посвященных оценке влияния работы гидроагрегатов на изменение динамических коле-

баний, регистрируемых в различных конструкционных элементах Саяно-Шушенской ГЭС (далее СШ ГЭС), проводимых Сейсмологическим филиалом ФИЦ ЕГС РАН в рамках договоров с ПАО «РусГидро».

В качестве объекта исследования рассматривается влияние пульсаций давления жидкости в водопроводящих трактах на колебания элементов конструкции сооружения и их связь с изменением режимов работы гидроагрегата.

Для анализа использованы результаты сейсмических наблюдений в различных точках плотины и в здании машинного зала (рис. 1). Регистрация сейсмических колебаний в теле плотины СШ ГЭС и конструкциях здания ГЭС проводилась в непрерывном режиме и включала регистрацию колебаний как во время работы исследуемых гидроагрегатов на различных режимах, так и при остановленных гидроагрегатах. Каждый пункт наблюдения устанавливался вдоль оси исследуемого гидроагрегата и состоял из автономного сейсмического регистратора и трехкомпонентных сейсмоприемников, оси которых ориентированы следующим образом: X – по течению реки, Y – поперек, Z – вертикально.

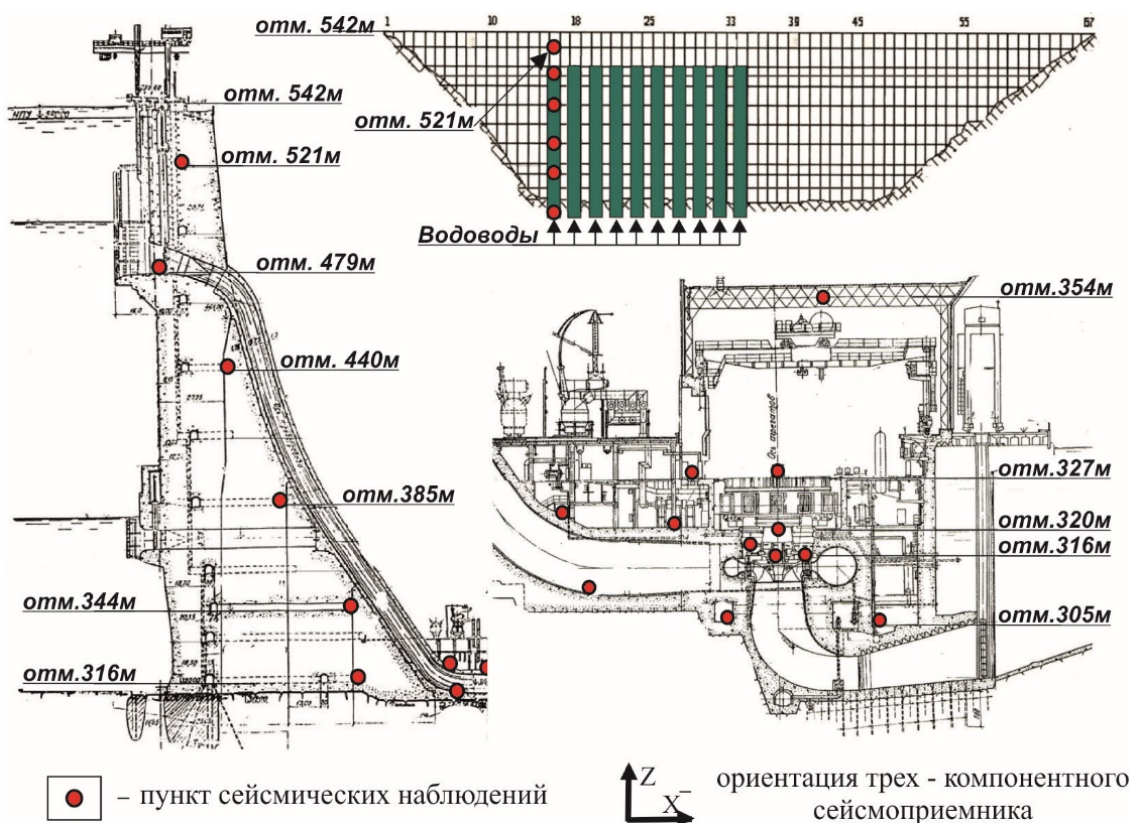


Рис. 1. Схема сейсмических наблюдений в плотине и в здании машинного зала

Обработка зарегистрированных данных производилась с помощью методики, основанной на анализе связей между изменениями во времени спектральных составляющих регистрируемых сигналов в различных точках наблюдений, подобно описанному в [1, 2].

На первоначальном этапе при анализе амплитудно-частотного состава сейсмических записей определялись наборы частот, связанные с пульсациями давления жидкости. В дальнейшем для полученных фиксированных частот строились графики изменения амплитуд колебаний во времени при различных условиях, на основе которых производился сравнительный анализ влияния данных условий на динамический уровень колебаний в различных точках наблюдения.

На рис. 2 показаны примеры спектрограмм и спектров сейсмических записей с различных точек наблюдения, установленных у различных элементов водопроводящего тракта (водовод, спиральная камера, отсасывающая труба), при изменении нагрузки гидроагрегата №8 (далее ГА-8). На рисунке хорошо видно наличие в низкочастотной части спектров набора монокроматических колебаний, причем уровень этих колебаний меняется при изменении режима работы гидроагрегата: при нагрузке 80-260 МВт ярко выражены монокроматические колебания с низкой добротностью на частотах $\sim 3,5$; $5,2$ и 9 Гц; при нагрузке 300-460 МВт на частотах $\sim 1,8$; $4,3$; $6,5$ и $8,8$ Гц.

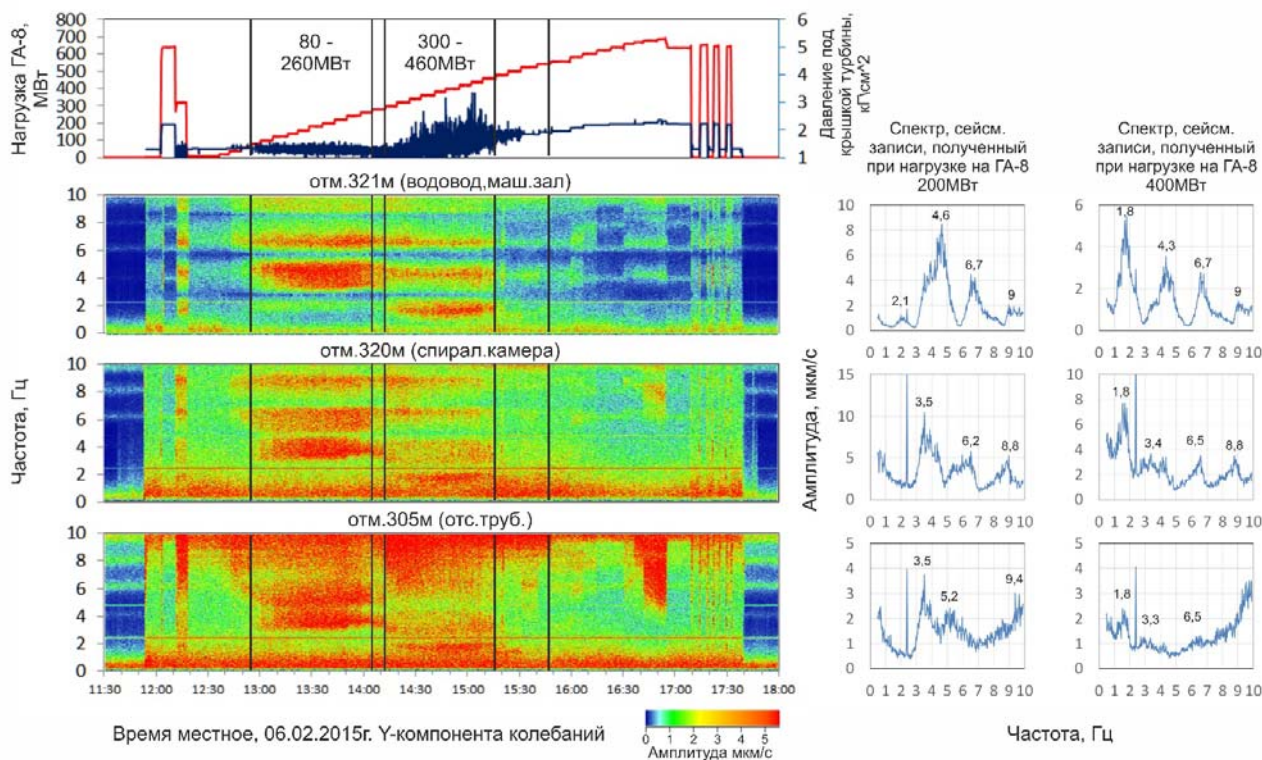


Рис. 2. График изменения нагрузок ГА-8; спектрограммы и соответствующие им спектры сейсмической записей, зарегистрированных в различных точках наблюдения во время нагрузки на ГА-8 200 МВт (слева); ГА-8 400 МВт (справа). Y-компонента

Данные показания были сопоставлены с результатами непосредственного измерения пульсаций давления в спиральной камере. На рис. 3 и 4 показаны

примеры сопоставления спектров колебаний, полученных в результате сейсмического мониторинга ГА-8 над его спиральной камерой, со спектрами натуральных измерений пульсаций давления в спиральной камере, полученных при исследовании работы гидроагрегата ГА-7 в 2012 г. и ГА-3 в 2013 г., соответственно. Как видно из графиков, спектры зарегистрированных пульсаций давления жидкости и колебаний хорошо коррелируют как для конструкций водопроводов, относящихся к различным гидроагрегатам, так и для различных поданных на них нагрузок. В целом, анализ полученных данных позволил выделить колебания, связанные с пульсациями давления в концевом сечении водовода на частотах $\sim 1,8; 3,4; 6,5$ и 9 Гц.

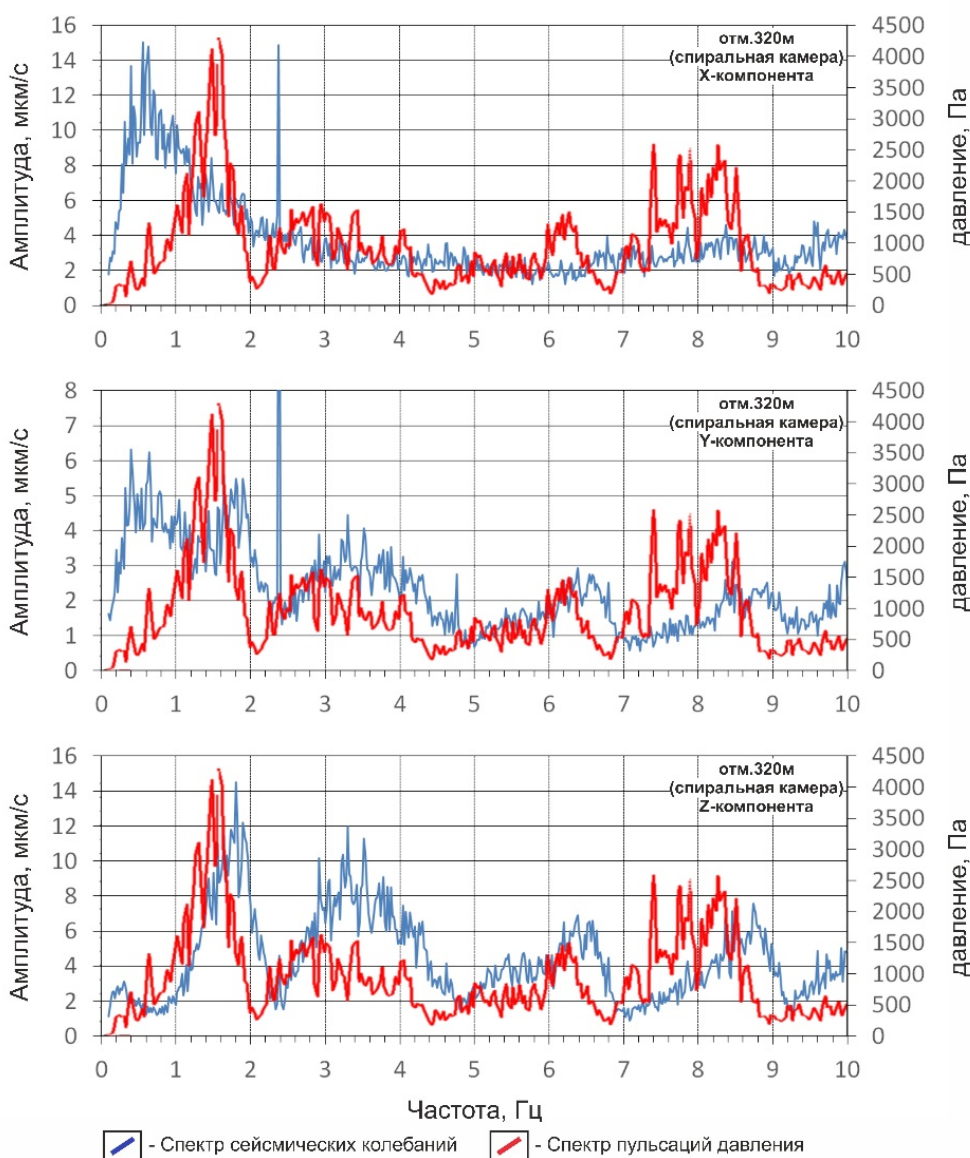


Рис. 3. Графики спектра пульсаций давления в спиральной камере при работе ГА-7(красный) и спектры колебаний, зарегистрированных над спиральной камерой на отм. 320 м при работе ГА-8 (нагрузки на гидроагрегатах 440 МВт)

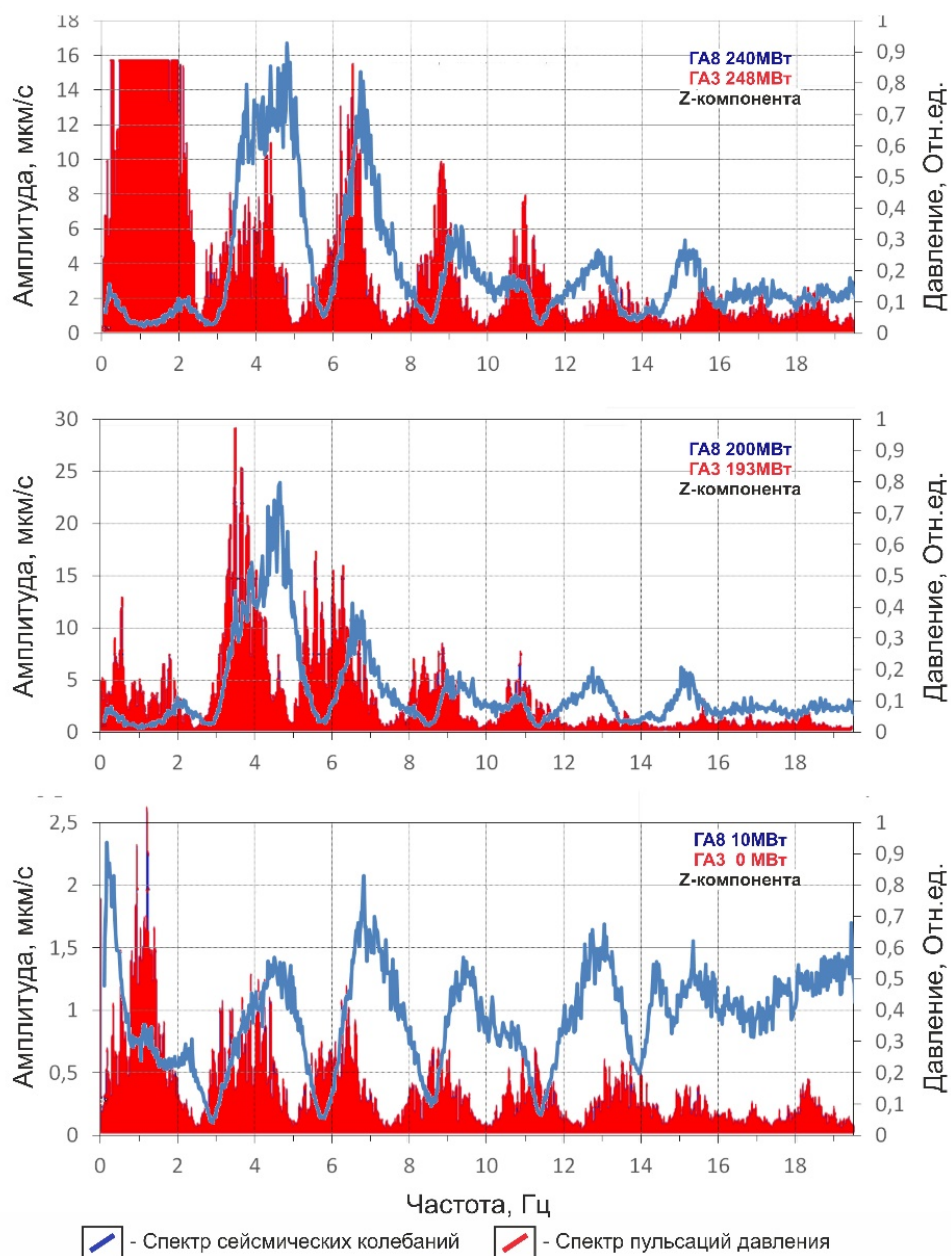


Рис. 4. Графики спектра пульсаций давления в спиральной камере при работе ГА-3(красный) и спектры колебаний, зарегистрированных над спиральной камерой на отм. 320 м при работе ГА-8 (при различных нагрузках на гидроагрегатах); Z-компонента

В работах [3-5] показано, что воздействие полученных гармоник является основным фактором, влияющим на возбуждение собственных колебаний плотины, причем наибольший рост значений амплитуд коррелирует с неблагоприятными режимами нагрузок на гидроагрегате: 1-я гармоника пульсаций давления провоцирует рост первых 5-ти форм собственных колебаний тела плотины СШ ГЭС и принимает максимальные значения при нагрузках на гидроагрегате ~340-500 МВт. Рост 2-й гармоники приводит к увеличению 6-8 форм при нагрузках ~150-320 МВт.

Аналогично вышеописанному были сопоставлены спектры колебаний, зарегистрированные у отсасывающей трубы ГА-8, со спектрами пульсаций давления жидкости, зарегистрированными непосредственно в отсасывающей трубе, полученные при исследовании ГА-7 в 2012 г. при нагрузке на гидроагрегатах 440 МВт (рис. 5).

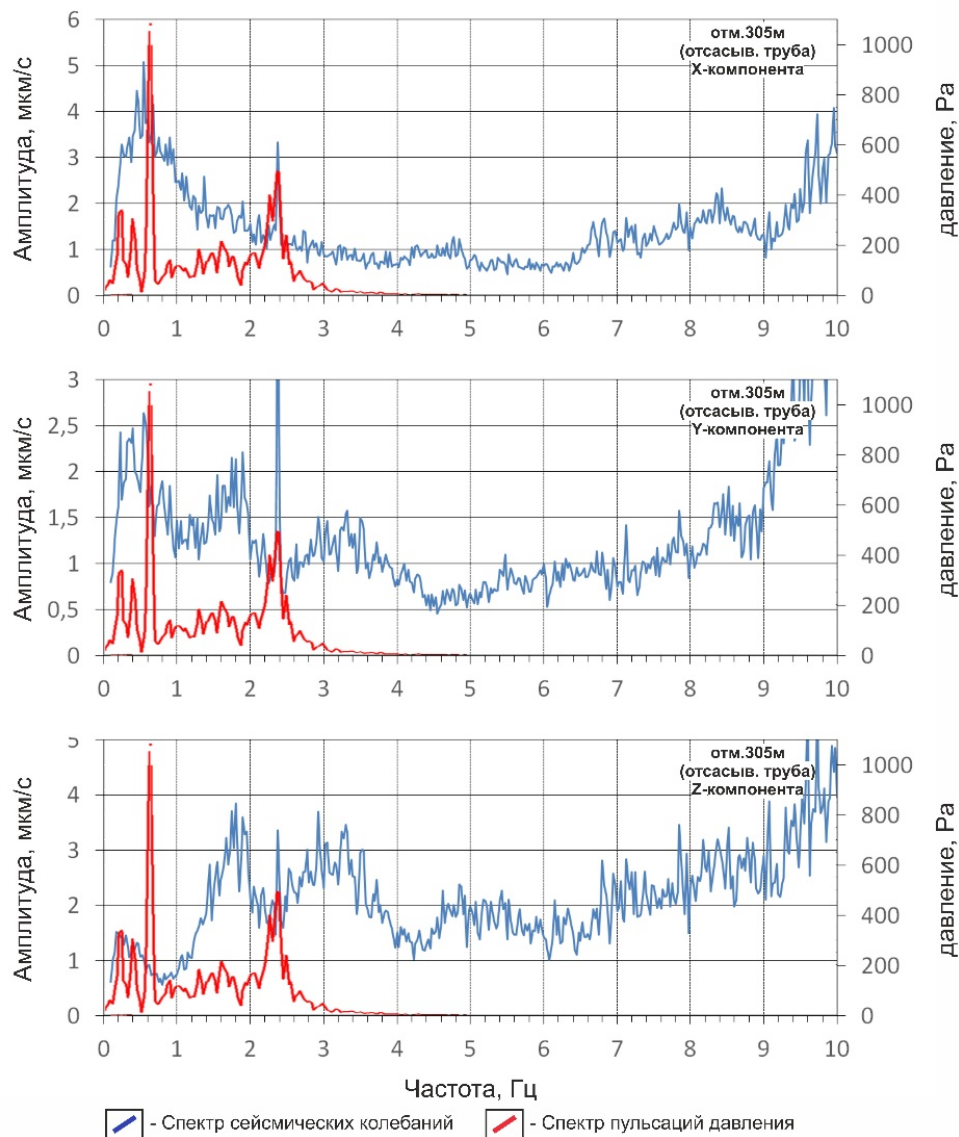


Рис. 5. Графики спектра пульсаций давления в отсасывающей трубе при работе ГА-7 (красный) и спектры колебаний, зарегистрированных над спиральной камерой на отм. 320 м при работе ГА-8 (нагрузки на гидроагрегатах 440 МВт)

На графиках явной корреляции сигналов не наблюдается. Это связано с тем, что точка наблюдения на отметке 305 м недостаточно приближена к отсасывающей трубе и, вероятно, влияние шумов перекрывает полезный сигнал. Наиболее отчетливо прослеживается связь на частоте 0,6 Гц, отвечающей вра-

щению вихревого жгута, и на частоте 2,4 Гц – оборотной частоте гидроагрегата. На рис. 6 представлен пример изменения амплитуд колебаний, вызванных работой ГА-8, в здании машинного зала на отметке 326 м возле статора генератора на частоте 0,65 Гц. Из представленных графиков видно, что значения амплитуд колебаний, в целом повышенные при нагрузках 280-460 МВт, достигают максимальных значений ~ 210 мкм/с² при нагрузке 300 МВт.

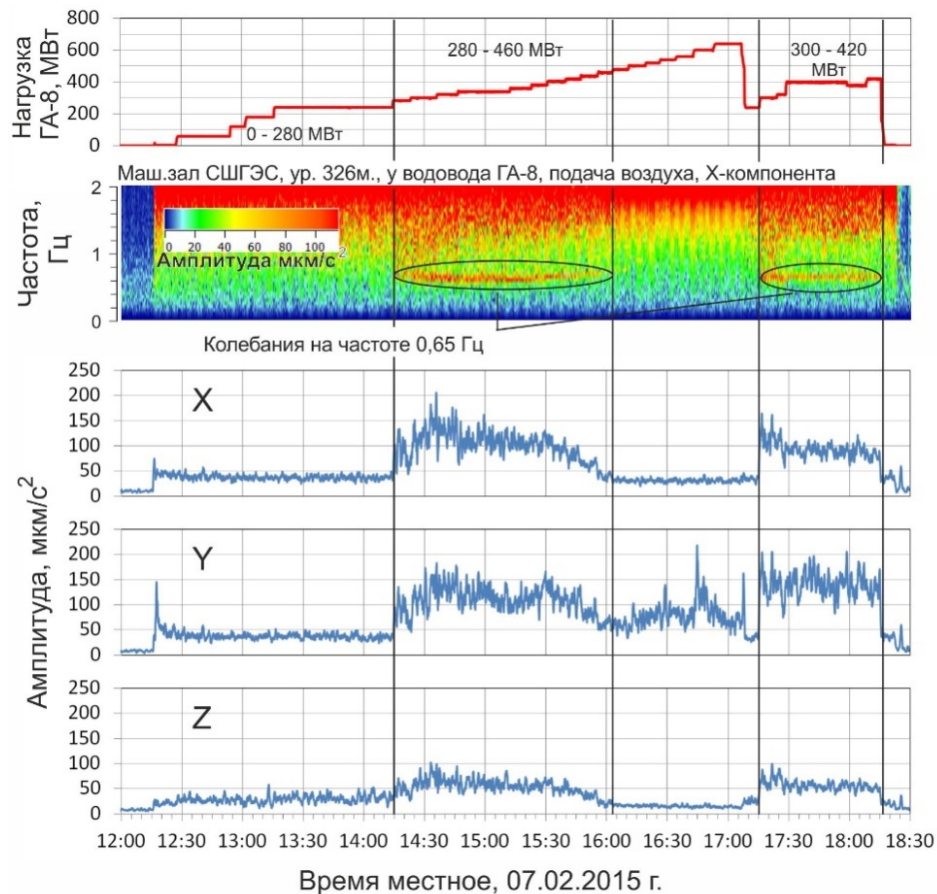


Рис. 6. График изменения нагрузок ГА-8, спектрограмма и графики изменения амплитуд сейсмических колебаний на частоте 0,65 Гц

Проведенные исследования с впуском воздуха в водовод через аэрационные трубы на отметке 542 м показали, что колебания на частотах $\sim 0,6$ Гц не приводят к изменению частот пульсаций давления в водоводе. В то же время для колебаний в водоводе на частотах 3,5; 6,5 и 9 Гц при газонасыщении жидкости наблюдалось понижение значения частоты данных гармоник, что провоцировало резонансные эффекты в теле плотины [6, 7].

Подводя итог, необходимо подчеркнуть, что биения жидкости в водопроводящем тракте, возникающие при работе гидроагрегатов, являются одним из основных факторов, влияющих на собственные колебания элементов конструкции СШ ГЭС. На данный момент довольно хорошо изучено влияние гидроаку-

стических автоколебаний в водоводе на собственные колебания тела плотины, однако, недостаточно исследованы пульсации жидкости в отсасывающей трубе и неясно их совместное влияние на здание и основание станции, что требует проведения дальнейших исследований в этом направлении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления: Патент на изобретение РФ, № 2461847 // Бюл. № 26. 20.09.2012

2. Изменения собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при работе старых и новых гидроагрегатов / П.В. Громыко, А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев, В.Б. Курзин // Геофизические методы исследования земной коры: материалы Всеросс. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. акад. Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8-13 декабря 2014 г.). – Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. – С. 125-128.

3. О собственных акустических колебаниях в водоводах гидротурбин Саяно-Шушенской ГЭС / В.С. Селезнёв, В.Б. Курзин, А.В. Лисейкин, П.В. Громыко // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 7. – С. 41-45.

4. Громыко П.В., Селезнев В.С., Лисейкин А.В. О причинах увеличения амплитуд собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской гидроэлектростанции // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т.2. – С.148–151.

5. Громыко П.В., Лисейкин А.В., Селезнев В.С. Исследование влияния гидроакустических колебаний в водоводах на колебания конструкции элементов сооружения Саяно-Шушенской гидроэлектростанции // Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии: 10-я научн.-техн. конф.: сб. докладов (Санкт-Петербург, 16 ноября 2017 г.). – Санкт-Петербург: Изд-во «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2018. – С. 98-104.

6. Громыко П.В., Селезнев В.С., Лисейкин А.В. Оценка динамического воздействия работы гидроагрегата на элементы конструкции Саяно-Шушенской ГЭС при газонасыщении жидкости в его водопроводящем тракте // Гидроэлектростанции в XXI веке: IV Всеросс. научно.-практ. конф. молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов: сб. материалов (Саяногорск, 13-14 апреля 2017 г.). – Саяногорск: Саяно-Шушенский фил. СФУ, 2017. – С. 206-211.

7. Громыко П.В., Селезнев В.С., Лисейкин А.В. Динамические колебания элементов сооружения Саяно-Шушенской ГЭС, вызванные автоколебаниями жидкости в водопроводящем тракте // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т.3. – С. 94–101.

© П. В. Громыко, В. С. Селезнев, 2019