

УДК 621.224

А.В. РЯБОВ, нач. гидротурбинной лаборатории СКБ (ТГМ)

ОАО «Турбоатом», Харьков;

А.Е. КАТАСОНОВ, нач. лаборатории № 11 СКБ (ТГМ)

ОАО «Турбоатом», Харьков;

А.В. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук; доц. НТУ «ХПИ»;

А.И. ТРУБАЕВ, канд. техн. наук; доц. НТУ «ХПИ»;

А.А. ВОДКА, аспирант НТУ «ХПИ»;

Ю.Н. УЛЬЯНОВ, канд. техн. наук; с.н.с. НТУ «ХПИ»

СОВМЕСТНЫЕ ПУЛЬСАЦИОННЫЕ И ВИБРАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛЬНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ ПЛ-20

Анализируются результаты проведенных модельных исследований пульсационных и вибрационных характеристик гидротурбины. Выполнены расчетно-экспериментальные исследования собственных колебаний ротора гидротурбины. Произведено сопоставление спектрограмм гидравлических возмущающих сил и спектрограмм вибрации конструкции модельного блока.

Ключевые слова: модельные испытания, пульсации давления, вихревой жгут, вибрации, частоты собственных колебаний, гидродинамические возбуждающие силы, спектр.

Введение. На основании данных модельных испытаний решаются многие задачи проектирования и изготовления гидротурбин. Это, в первую очередь, обеспечение высоких энергетических характеристик, создание высоконадежных конструкций, гарантирующих безотказную и долговременную эксплуатацию. Решению этих задач способствуют энергетические, кавитационные, пульсационные, силовые и некоторые специальные модельные испытания, а при отладке головного агрегата и натурные испытания гидротурбин [1].

Цель исследований. Совместные пульсационные и вибрационные испытания проводились в интересах изучения влияния гидравлических возмущающих сил на вибрационные характеристики конструкции гидротурбины.

Описание эксперимента и результатов исследования. Пульсации давления в модельной гидротурбине измерялись с помощью штатной аппаратуры, которая установлена на испытательном стенде ЭКС-100 ОАО «Турбоатом». Датчики давления мембранного типа были установлены на одном уровне со стенками проточной части на обтекателе крышки турбины в средней ее части (датчик № 1), в отсасывающей трубе, на расстоянии $0,3D_1$ ($D_1 = 460$ мм) от оси разворота лопастей (датчики № 2 и № 3, соответственно, в направлении правого берега и нижнего бьефа) (рис. 1). Для измерения вибрации использовался измерительный комплекс УЛЬТРА-В-1 (разработанный в НТУ «ХПИ»), который предназначен для измерения виброускорений на низких и сверхнизких частотах [2] и имеет действительное свидетельство о Государственной метрологической аттестации. Датчики вибрации устанавливались на крышке модельной турбины (Д № 4) и крестовине (Д № 5) (рис. 1). Испытания проводились на пропеллерных режимах, интерес к которым вызван в виду того, что у поворотно-лопастных гидротурбин такие режимы могут возникать во время пуска, остановки гидроагрегата или при нарушении комбинаторной связи по другим причинам. Результаты измерения пульсаций давления и данные виброизмерений показаны на рис. 2.

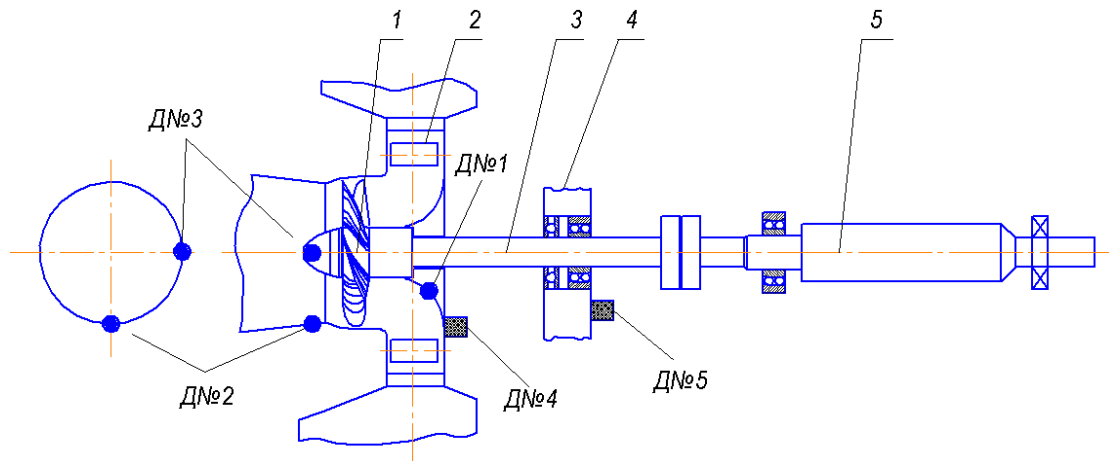


Рис. 1 – Схема установки датчиков на стенде ЭКС-100 ОАО «Турбоатом» (развернутый на 90°):
 1 – рабочее колесо с лопастями; 2 – лопатки направляющего аппарата; 3 – вал гидроагрегата;
 4 – крестовина; 5 – вал балансирной машины; Д № 1, Д № 2, Д № 3 – датчики пульсации давления;
 Д № 4, Д № 5 – датчики вибрации

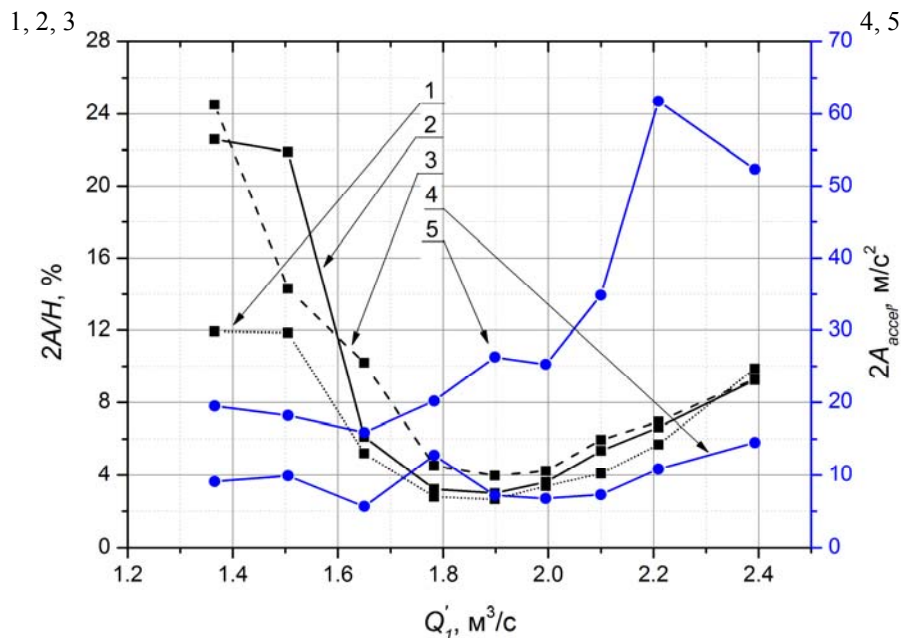


Рис. 2 – Пульсационная и вибрационная характеристика модельной гидротурбины ПЛ-20 на пропеллерном режиме (угол установки лопастей $\phi = +10^\circ$, приведенные обороты $n_1' = 130 \text{ мин}^{-1}$)

На основании анализа приведенной характеристики можно заключить: кривые 1, 2, 3 пульсаций давления, полученные с помощью соответствующих датчиков, имеют традиционную форму – минимальный уровень (2–3) % ($2\Delta H/H$ – пульсации статического напора в точках установки датчиков отнесены к напору испытаний в процентах), что отвечает оптимальным расходам. Рост уровня пульсаций наблюдается при нарушении комбинаторной связи между углом установки лопастей и открытием направляющего аппарата при переходе к меньшим или большим расходам. Последнее объясняется тем, что при уменьшении расходов, по сравнению с оптимальными, на пропеллерном режиме, за рабочим колесом возникает вихревой жгут, который вращается в том же направлении, что и рабочее колесо, а при увеличении расходов возникает вихревой жгут, который вращается в противоположном направлении. В

левой части характеристики жгут вращается с частотой меньшей частоты вращения рабочего колеса, приблизительно в 2,6 раза. В правой части характеристики жгут вращается с частотой близкой к частоте вращения рабочего колеса, и даже большей, чем в противоположном направлении. Такая специфика свидетельствует о том, что, с учетом эффекта Доплера, рабочее колесо возбуждается вихревым жгутом для различных режимов на разных частотах. В левой части пульсационной характеристики частота возбуждения равна разнице частот вращения жгута и рабочего колеса, в правой – сумме.

Кроме рассмотренных выше частот пульсаций давления, при всех режимах и всеми датчиками зарегистрированы пульсации с оборотной частотой $f_{об} = n/60$ и лопастной частотой, которая равняется произведению оборотной частоты рабочего колеса и количества его лопастей $f_{л} = n \cdot z_1/60$. Однако, под крышкой турбины доля лопастных пульсаций значительно меньше, чем жгутовых и оборотных, а за рабочим колесом лопастные пульсации давления наиболее выражены.

Из графиков на рис. 2 хорошо видно, что рост амплитуд вибраций связан с увеличением расхода. Также следует отметить, что высокий уровень амплитуд пульсации давления на режимах с низкими расходами не приводит к увеличению амплитуд вибраций. Последнее объясняется тем, что возмущающие гидравлические силы на режимах с малыми расходами действуют с частотами, далеко отстоящими от собственных частот колебаний элементов конструкции модельной гидротурбины, на которых установлены датчики вибрации. На режимах с большими расходами, в виброграммах пульсаций давления появляются компоненты с большими частотами и, как результат этого, амплитуды вибрации возрастают.

В работе были выполнены расчетно-экспериментальные исследования собственных колебаний ротора гидротурбины. Теоретические результаты получены на основе метода конечных элементов (МКЭ) (табл.).

Экспериментальные исследования проводились по следующей методике. На вал устанавливался трехосевой емкостной вибродатчик, являющийся составной частью измерительного комплекса УЛЬТРА-В-1. Далее, возбуждались свободные колебания вала, которые фиксировались вибродатчиком. Полученные значения частот представлены в таблице.

Таблица

Частоты собственных колебаний ротора гидроагрегата

№	Частота, Гц		Относительная погрешность, %	Характер формы колебаний
	Результаты расчета	Экспериментальные данные		
1	137,2	–	–	крутильный
2	264,3	262,7	+0,6	изгибный генератора
3	312,6	–	–	крутильный
4	316,5	307,5	+2,8	изгибный
5	354,5	367,1	–3,5	изгибный рабочего колеса

На рис. 3 и 4 приведены графики спектров вибраций на крышке турбины (датчик № 4) и пульсаций давления под рабочим колесом (датчик № 2) для режимов с наименьшими и наибольшими расходами, отвечающим крайним точкам диапазона испытаний.

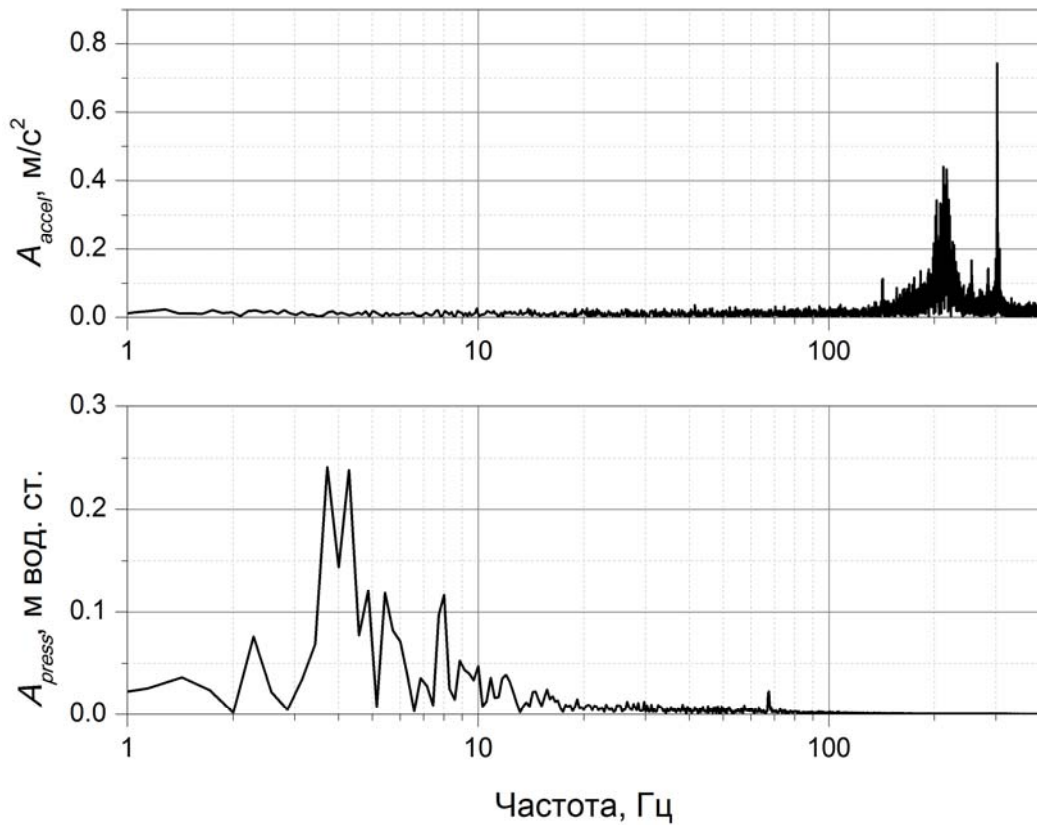


Рис. 3 – Спектрограммы виброускорений (m/s^2) на крышке гидротурбины и пульсаций давления (м вод.ст.) под рабочим колесом при малых расходах

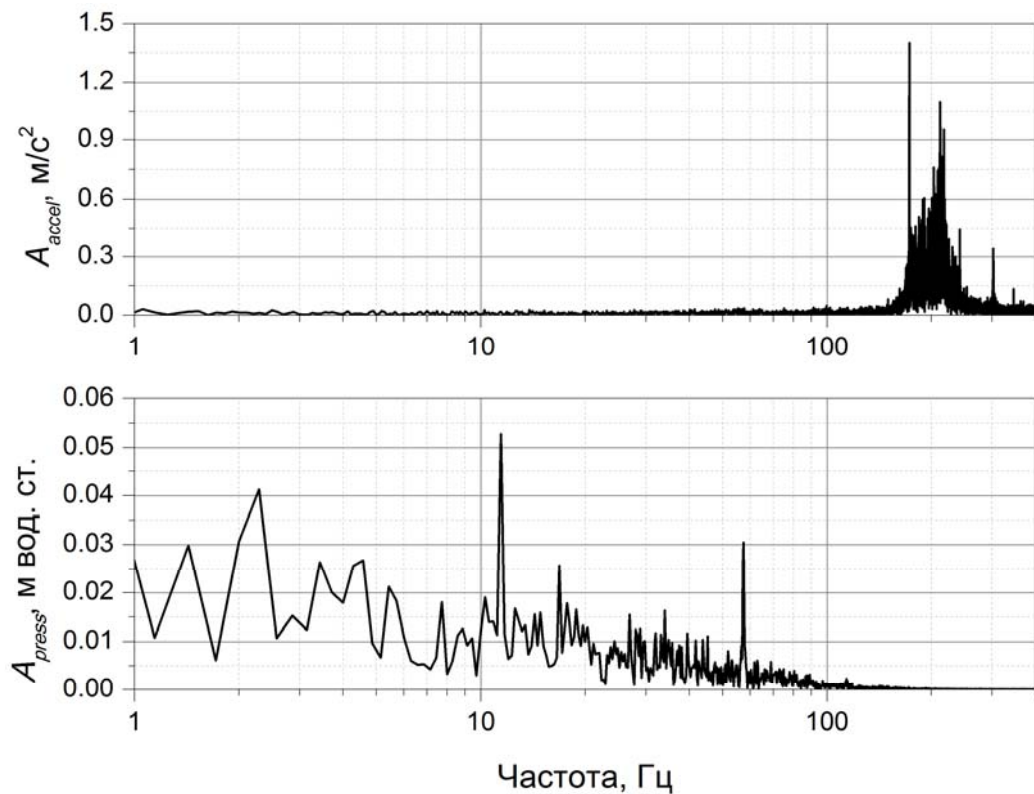


Рис. 4 – Спектрограммы виброускорений (m/s^2) на крышке гидротурбины и пульсаций давления (м вод.ст.) под рабочим колесом при больших расходах

Выводы. Гидравлические возмущающие силы (пульсации давления в проточной части) действуют на элементы конструкции гидроагрегата с частотами, отличающимися от частот собственных колебаний. Однако, имеющиеся в спектре ответа системы частоты соответствуют собственным частотам конструкции. Это свидетельствует о наличии широкополосного нагружения, причиной возникновения которого, очевидно, являются кавитационно-турбулентные процессы в проточной части гидроагрегата.

Опыт эксплуатации гидротурбин различных типов на гидроэлектростанциях и модельные исследования показали, что пульсации давления в модельных гидротурбинах удовлетворительно пересчитываются на натурные гидротурбины. К сожалению, вибрационные характеристики таким образом не моделируются, поскольку жесткости и массы конструкций модели и натуре сильно отличаются, что делает частоты их собственных колебаний строго индивидуальными. Все перечисленные обстоятельства свидетельствуют о необходимости проведения подобного натурального эксперимента. Однако, это ни в коей мере не умаляет важности проведенного модельного исследования, которое позволило отработать методику совместного анализа пульсационных и вибрационных характеристик гидротурбины.

Список литературы: 1. Модельные исследования гидротурбин [Текст] / Ф.В. Аносов, А.В. Белобородов, М.В. Гушин [и др.]; под ред. В.М. Малышева. – Л.: Машиностроение, 1971. – 288 с. 2. Водка, А.А. Виброизмерительный комплекс на основе микроэлектромеханического сенсора [Текст] / А.А. Водка, А.И. Трубаев, Ю.Н. Ульянов // Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля. – Луганськ, 2012.– № 9 (180). Ч.1. – С. 140-147.

Поступила в редколлегию 20.09.13

УДК. 621.224

Совместные пульсационные и вибрационные испытания модельной гидротурбины ПЛ-20 [Текст] / А.В. Рябов, А.Е. Катасонов, А.В. Бондаренко, А.И. Трубаев, А.А. Водка, Ю.Н. Ульянов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 1(1044). – С. 170-174. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2078-774X.

Проаналізовані результати модельних досліджень пульсаційних і вібраційних характеристик гідротурбіни. Проведені розрахунково-експериментальні дослідження власних коливань ротора гідротурбіни. Зроблено порівняння графіків спектральної густини гідравлічних обурюючих сил і вібрації конструкції модельного блоку.

Ключові слова: модельні випробування, пульсації тиску, вихровий джгут, вібрації, частоти власних коливань, гідродинамічні збуджуючі сили що збуджують, спектр.

The pulsations and vibrations characteristics of the model hydroturbine have been analyzed. The computational and experimental studies of the natural oscillations of the rotor turbine have been performed. The comparison spectrograms of hydraulic disturbing forces and spectrograms of vibration design model unit have been performed.

Keywords: model tests, pressure pulsation of the vortex bundle, vibration, natural frequency the hydrodynamic exciting force spectrum.