



С. В. ЕВДОКИМОВ
В. А. СЕЛИВЕРСТОВ
А. А. ОРЛОВА

РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

RESULTS OF MULTI-FACTOR ANALYSIS OF THE CONDITION OF HYDROTECHNICAL CONSTRUCTIONS

Контроль над состоянием основных гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС осуществляется по данным наблюдений за контрольно-измерительной аппаратурой, установленной в сооружениях и в их основании, а также по результатам систематических осмотров и обследований, проводимых как персоналом электростанции, так и приглашёнными экспертами. На гидростанции внедряется компьютерная информационно-диагностическая система контроля состояния сооружений. Внедрение этой системы вызвало необходимость обратить внимание на достоверность получаемых с помощью контрольно-измерительной аппаратуры результатов. Целью исследований является проведение многофакторного анализа состояния гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС по результатам натурных наблюдений за всеми приборами. Установлено, что противифльтрационные элементы подземного контура здания ГЭС оказались для конкретных геологических условий основания недостаточно эффективными с точки зрения гашения фильтрационного напора. Основное падение напора в основании происходит на верховом зубе здания ГЭС, где наблюдается максимальный градиент фильтрации, что весьма опасно. В процессе исследований было выявлено, что несколько пьезометров в основании не работают или их показания вызывают большие сомнения, требуется их ремонт и замена. По результатам работы сделан вывод, что необходимо оснастить основные пьезометры здания ГЭС дистанционными измерителями уровня воды и создать на их базе автоматизированную систему опроса и контроля состояния основания.

Control over the state of the main hydraulic structures of Zhiguli hydroelectric power station is carried out according to observations of the control and measuring equipment installed in the facilities and in their base, as well as the results of systematic inspections and surveys conducted by both the power plant personnel and invited experts. A computer information and diagnostic system for monitoring the condition of facilities is being introduced at the hydroelectric power station. The introduction of this system made it necessary to pay attention to the reliability of the results obtained with the help of instrumentation. The aim of the research is to conduct a multivariate analysis of the state of hydraulic structures Zhigulevskaya HPP on the results of field observations of all devices. It is established that the anti-filtration elements of the underground circuit of the HPP building were not effective enough for the specific geological conditions of the base in terms of damping the filtration head. The main pressure drop in the base occurs on the upper tooth of the HPP building, where the maximum filtration gradient is observed, which is very dangerous. In the course of research it was found that several piezometers in the base do not work or their indications cause great doubts, their repair and replacement are required. According to the results of the work, it is concluded that it is necessary to equip the main piezometers of the HPP building with remote water level meters and create an automated system of survey and monitoring of the base state on their basis.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, информационно-диагностическая система, пьезометр, фильтрационный напор, контрольно-измерительная аппаратура, противofильтрационные элементы

Keywords: hydraulic structures, information and diagnostic system, piezometer, filtration pressure, test equipment, impervious elements

В настоящее время основной контроль над состоянием основных гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС осуществляется по данным наблюдений за контрольно-измерительной аппаратурой, установленной на самих сооружениях и в их основаниях, а также по результатам систематических осмотров и обследований, проводимых как персоналом электростанции, так и приглашёнными экспертами.

На основании анализа результатов натуральных наблюдений и обследований квалифицированные эксперты делают заключение о состоянии гидротехнических сооружений.

В соответствии с последней редакцией Правил технической эксплуатации электростанций [1] формулировка «анализ результатов натуральных наблюдений» была заменена формулировкой «многофакторный анализ состояния сооружения». Это позволяет при анализе состояния гидротехнических сооружений гидроузлов оценивать все действующие факторы.

Безусловным фактором во всех случаях является то, что анализ состояний сооружений квалифицированными экспертами должен выполняться каждые пять лет. В данном анализе помимо оценки состояния самих сооружений должна даваться оценка надёжности и достоверности получаемых по контрольно-измерительной аппаратуре результатов, а также обеспечиваться достаточная работоспособность самой контрольно-измерительной аппаратуры.

Последний анализ состояния гидротехнических сооружений Жигулёвской ГЭС проводился в 1991 г. За прошедший с этого момента период на гидростанции начала внедряться компьютерная информационно-диагностическая система контроля состояния сооружений. Внедрение этой системы вызвало необходимость обратить самое серьёзное внимание на достоверность получаемых с помощью контрольно-измерительной аппаратуры результатов, так как именно по ним система контролирует состояние сооружений.

На основании обработки полученных материалов авторами выполнен многофакторный анализ состояния гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС, представленный ниже. По некоторым группам приборов для анализа использован весь период наблюдения [2–4].

Здание ГЭС расположено у правого берега реки Волги и основанием врезано в коренные породы древнего оврага, образованного

в результате размыва Жигулёвского массива. Противofильтрационными устройствами здания Жигулевской ГЭС являются фундаментная плита с зубом и шпунтовым рядом, а также анкерный понур. Шпунтовой ряд сопрягается со шпунтовыми рядами право- и левобережных подпорных стенок, препятствуя тем самым обходной фильтрации. Для отвода фильтрационных вод и снятия фильтрационного давления за верховым зубом здания станции устроен дренаж, сообщающийся с нижним бьефом.

Основание под зданием ГЭС неоднородно: секции 1 – 6 расположены на овражной части, где здание ГЭС своим верховым зубом врезается в плотные кинельские глины. В русловой части, где гребень кинельских глин расположен глубже, верховой зуб опирается на относительно более водопроницаемые четвертичные миндель-рисские отложения грунтов.

Для контроля фильтрационного режима в основании здания станции и в сопряжении с подпорными стенками было установлено 186 пьезометров. Одна группа пьезометров контролирует работу входного участка здания ГЭС: анкерного понура, зуба СУС и верхового зуба фундаментной плиты здания ГЭС. Вторая группа приборов контролирует фильтрационное давление на фундаментную плиту здания ГЭС.

Для контроля деформации здания ГЭС и сопрягающих устройств было установлено 366 осадочных марок (в настоящее время действует 361), 84 щелемера (действует 76) и 23 створных знака (действует 30).

Как известно, противofильтрационный контур здания ГЭС создавался фундаментной плитой сороудерживающего сооружения с зубом и шпунтовым рядом, анкерным понуром и верховым зубом здания ГЭС [5, 6]. Наблюдения по пьезометрам, контролирующим фильтрационный режим на входном участке под зданием ГЭС, показали, что эффективность этого участка с точки зрения снижения напора была невелика. Так, за верховым шпунтом для секций 1, 5, 6, 7 падение напора было в пределах от 20 до 30 %. Для секций 3, 4 измеренные пьезометрами уровни воды за шпунтом были равны уровням воды в водохранилище, т. е. гашения напора не происходило. Наибольшее гашение напора на верховом шпунте наблюдалось в районе секций 8, 9, 10 и составляло 30–40 % от напора. Основное снижение напора в основании происходило на верховом зубе

здания ГЭС. Это вполне закономерно, так как за верховым зубом располагался дренаж, имеющий прямой выход в нижний бьеф.

Таким образом, конструктивные элементы противофильтрационного контура на входном участке здания ГЭС для конкретных геологических условий не были достаточно эффективны с точки зрения гашения фильтрационного напора.

Как показали исследования, наибольшее гашение напора на понурном участке здания ГЭС наблюдается по секциям 7, 8, 9. Следовательно, в основании этих секций под верховым зубом здания – минимальный градиент напора.

Максимальный градиент напора наблюдается в основании секций 3 и 4, и он несколько меньший в основании секций 5 и 10. Для секций 3, 4 он составляет 0,82–0,85, для секций 5 и 10 – 0,6 и 0,9 соответственно.

Предельно допустимые градиенты для суглинка составляют величину 0,8, а для глин – 1,35. Так как зона секций 1, 2, 3, 4 здания ГЭС своим верховым зубом врезана в плотные кинельские глины, измеренный градиент напора не превышает допустимых значений. Однако следует иметь в виду, что непосредственно под зубом нет пьезометров, поэтому считать градиент на длине между пьезометрами П3 и П4 или П3 и дренажом можно только предположительно. В действительности уровень воды, измеренный пьезометром П3, может наблюдаться гораздо ближе к дренажу, например, непосредственно под зубом. В результате фактический градиент напора будет существенно больше приведённого.

Всё это обуславливает необходимость обеспечения постоянного и особо тщательного контроля над пьезометрами в основании секций 3, 4, 5, 10.

Таким образом, все данные наблюдений подтверждают, что наибольшую опасность с точки зрения обеспечения фильтрационной устойчивости основания представляет зона под верховым зубом секций 3, 4, 5, 10 здания ГЭС. Основным контролирующим параметром для этой зоны должен быть градиент фильтрационного напора, измеряемый между пьезометрами П3 и П4.

Представляет интерес анализ изменения пьезометрических уровней, измеренных приборами в периоды эксплуатации. Показания пьезометров П1, П2, П3 колеблются в соответствии с изменениями верхнего бьефа. Уровни в пьезометре П4, а также пьезометрах П7, П8, П9, П10 изменяются синхронно с колебаниями уровней нижнего бьефа.

В основном показания контролирующих пьезометров (П1, П2, П3, П4) за весь период эксплуатации имеют горизонтальную аппроксимацию, т. е. за исключением колебаний, свя-

занных с изменениями уровней ВБ и НБ, они не изменяются во времени. Исключения составляют показания пьезометров П2 и П3 в секциях 1 и 2. За последние 35 лет показания пьезометра П2 под этими секциями снижались с интенсивностью 0,1 м/год, показания пьезометра П3 – с интенсивностью 0,2 м/год. Если эти данные достоверны, то подобное снижение свидетельствует о кольматации фильтрационных путей в понурной части основания этих секций, что в свою очередь обеспечивает снижение фильтрационных градиентов в зоне верхового зуба.

Обратная картина – рост пьезометрических уровней наблюдается по пьезометру П3 в основании секций 7 и 9, интенсивность роста составляет 0,1 м/год, что свидетельствует о росте градиента напора под верховым зубом здания ГЭС. Этот процесс для указанных секций не представляет опасности, так как градиенты фильтрационного напора по ним находятся в пределах 0,2–0,28, что существенно ниже допустимых значений [6].

Анализ данных наблюдений по пьезометрам показал, что в основном они работоспособны и обеспечивают получение достоверной информации. Однако имеется ряд пьезометров, требующих проверки и ремонта: П4 в секциях 3, 5 (большой разброс показаний) и 2, 6; П5 в секции 6; П7 в секциях 1 и 7.

Для наблюдения за осадками и относительными смещениями секций на здании ГЭС были установлены створы щелемеров-марок: № 3 со стороны верхнего бьефа (в зоне затвора верхнего бьефа); № 5 со стороны нижнего бьефа (в зоне аварийно-ремонтных затворов нижнего бьефа). Кроме того, были установлены два створа щелемеров-марок на сороудерживающем сооружении: № 1 со стороны верхнего бьефа; № 2 со стороны нижнего бьефа.

На рис. 1 приведены графики средних осадок здания ГЭС, определённых по четырем щелемерам-маркам каждой секции, и их аппроксимирующие линии. Средние осадки секций 1–6 близки между собой и имеют одинаковый характер изменения во времени. Наибольшие значения осадок этих секций на конец 2001 г. были в пределах 45–60 мм. Так как интенсивность их роста во времени не превышала 0,3 мм в год, их можно считать затухшими.

Большие по величине осадки наблюдались по секциям 8–10. На 2001 г. величина их составила 105–125 мм. Интенсивность их роста во времени в два-три раза больше, но, тем не менее, не превышает 1 мм в год. Поэтому в целом осадки здания ГЭС следует оценивать как затухающие.

Осадки секций 1–6 на конец 2001 г. не превышают 45 мм, осадки секций 8–10 находятся

в пределах 90–160 мм. Такая неравномерность осадок по длине здания подтверждает неоднородность грунтов в основании здания ГЭС. В основании секций 1–6 грунты имеют большую плотность и, следовательно, больший модуль деформации, нежели грунты, расположенные в основании секций 8–10.

Как показал анализ эпюр осадков здания ГЭС и сороудерживающих сооружений по продольным створам, осадки со стороны нижнего и верхнего бьефов оказались практически одинаковы. В то же время по зданию ГЭС осадки со стороны верхнего и нижнего бьефов в пределах секций 1–5 близки между собой, а в пределах секций 6–10 различаются в два и более раза, т. е. эти секции имеют некоторый наклон в сторону верхнего бьефа. Наибольший наклон в период с 1975 по 2015 гг. сформировался по секциям 8, 9 и частично 10, где различия в осадках марок в створах 3 и 5 составляют около 100 мм. По секциям 1–5 это различие не превышает 20–30 мм. Таким образом, сформировавшаяся неравномерность осадок невелика и далека от предельных значений.

Несмотря на то, что осадка здания практически затухает, наблюдения по щелемерам-маркам необходимо продолжать, причём точность наблюдений должна быть даже выше той, которая была в начале периода эксплуатации. Для этого должны использоваться современные геодезические инструменты и проведена тщательная проверка опорных реперов. Ни в коем случае не должно допускаться снижение частоты наблюдений: наблюдения должны проводиться не реже одного раза в два года, в идеале ежегодно [7].

Измерения горизонтальных смещений, проводившиеся по щелемерам-маркам, дают только относительное значение осадок секций, что не позволяет оценить общие горизонтальные перемещения здания. Тем не менее, по данным имеющихся наблюдений можно констатировать, что измеренные горизонтальные смещения секций вдоль потока находятся в пределах точности наблюдений. Большие по величине перемещения измерены в направлении раскрытия-закрытия швов.

На рис. 2 приведена аппроксимация графиков раскрытия-закрытия межсекционных швов по створу 3. Как видно, швы постоянно закрываются, причём интенсивность их закрытия на протяжении последних лет одинакова и затухания этого процесса не видно. Исключение составляет лишь шов на секции 9 (створ 3), где наблюдается его постоянное раскрытие.

По щелемерам, установленным в потере на 40–50 м ниже створов 5 и 3, наблюдается такая же картина закрытия швов (кроме швов в секциях 3 и 8). По всей видимости, эти длительные деформации имеют характер ползучести и в целом не представляют опасности для сооружений.

Как показал анализ наблюдений за фильтрационным режимом в основании, противофильтрационный контур здания ГЭС, включающий в себя фундаментную плиту с зубом и шпунтовым рядом, а также анкерный понур, в данных геологических условиях основания работает недостаточно эффективно. Так, под секциями 1, 5, 6, 7 шпунт гасит 20–30 % напора, а в районе секций 3–4 не гасит напор вовсе. В результате этого непосредственно под верхо-

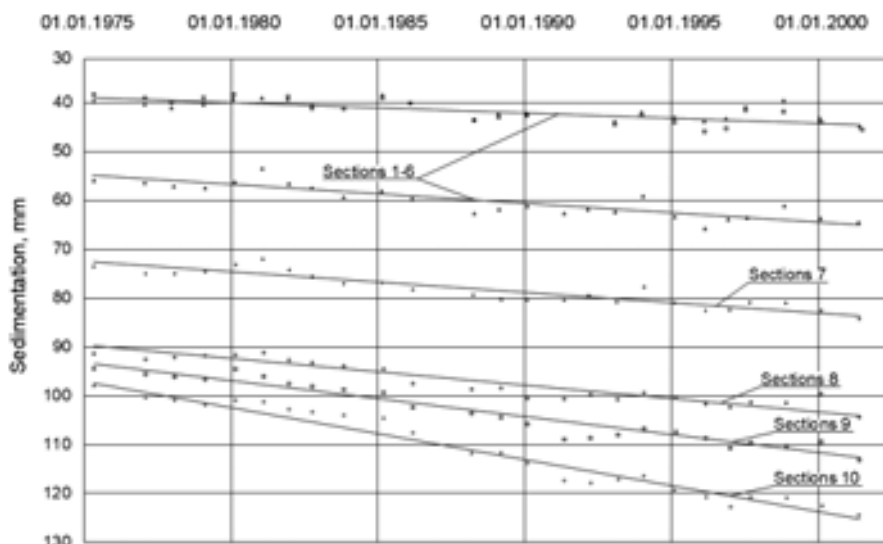


Рис. 1. Аппроксимации средних осадок секций здания ГЭС, измеренных по щелемерным маркам

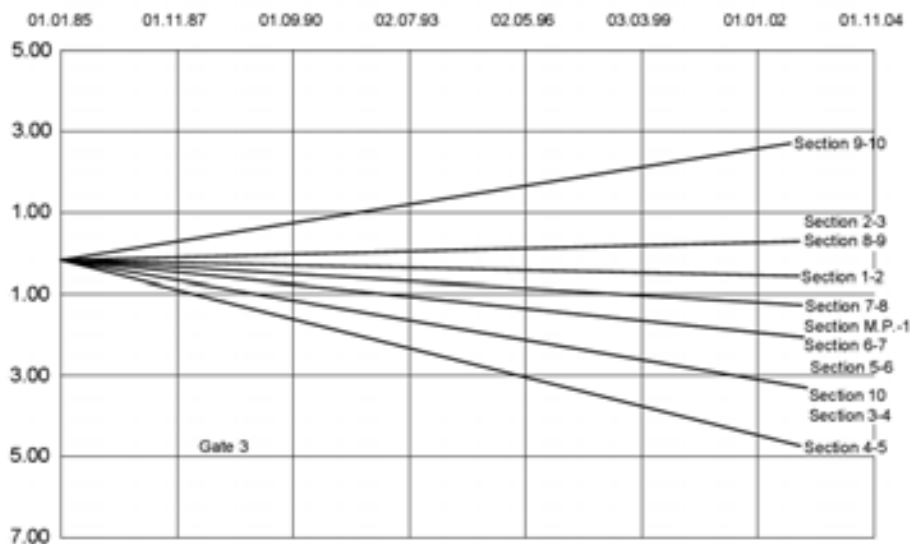


Рис. 2. Сопоставление аппроксимирующих линий раскрытий-закрытий швов между секциями здания ГЭС

вым зубом секций 3, 4 и в несколько меньшей степени секций 5, 10 фильтрационные градиенты находятся в пределах от 0,6 до 0,9, что близко к предельным значениям. Учитывая, что непосредственно под зубом нет возможности замерить распределение пьезометрического напора, фактический градиент может быть существенно больше.

Несколько пьезометров в основании не работают или их показания вызывают большие сомнения. По этим пьезометрам необходимо выполнить ремонт или замену.

Наблюдения за осадками станции показали, что минимальные значения осадки наблюдаются на секциях 1–6, максимальные – на секциях 8–10. В результате можно предположить, что грунт в основании секций 8–10 имеет меньшую плотность и подвержен большим деформациям. В целом значения осадок даже по секциям 8–10 незначительны, а рост их во времени не превышает 1 мм в год, что свидетельствует об их затухании.

Горизонтальные деформации секции в направлении вдоль потока практически отсутствуют, а измеренные по щелемерам поперечные деформации указывают на протекающее с постоянной незатухающей скоростью закрытие швов. Этот процесс имеет линейный характер почти по всем швам в секции и вызывает сомнения в правильности показаний приборов. Необходимо выполнить специальные проверочные измерения для оценки достоверности полученных результатов наблюдения.

Выводы. 1. Противофильтрационные элементы подземного контура здания ГЭС, особенно на выходном участке, оказались для

конкретных геологических условий основания недостаточно эффективными с точки зрения гашения фильтрационного напора. Таким образом, основное падение напора в основании рассматриваемых секций происходит на верхнем зубе здания ГЭС, т. е. в этой зоне наблюдается максимальный градиент фильтрации, что представляется весьма опасным, поэтому за данным процессом необходимо тщательно следить, особенно в районе секций 3 и 4.

2. Основными пьезометрами, определяющими надежность противофильтрационных устройств всего здания ГЭС, являются ПЗ и П4. Однако особое внимание должно быть уделено пьезометрам в секциях 3, 4, 10. В дальнейшем необходимо основные пьезометры здания ГЭС оснастить дистанционными измерителями уровня воды и создать на их базе автоматизированную систему опроса и контроля состояния основания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- СО 153-34.20.501-2003. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Минэнерго. М., 2003. 155 с.
- Романов А.А., Евдокимов С.В. Результаты исследования колебаний бетонных частей секций Жигулевской ГЭС // Научное обозрение. 2015. № 7. С. 188–194.
- Романов А.А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидротехнических сооружений. Самара, 2010. 360 с.
- Романов А.А., Евдокимов С.В., Селиверстов В.А. Исследование колебаний здания Жигулевской гидроэлектростанции // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 6. С. 44–48.

5. Романов А.А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидротехнического оборудования. Самара: АГНИ, 2011. 424 с.

6. Бальзанников М.И., Зубков В.А., Кондратьева Н.В., Хуртин В.А. Комплексное обследование технического состояния строительных конструкций сооружений Жигулёвской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2013. № 6. С. 21–27.

7. Романов А.А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация электротехнического оборудования. Самара: АГНИ, 2012. 544 с.

REFERENCES

1. SO 153-34.20.501-03 Operation Requirements for Electrical Power Plants and Networks in the Russian Federation. Russian Federation Minenergo., 2003. 155 p. (in Russian)

2. Romanov A.A., Evdokimov S.V. The results of the study of oscillations of parts of the concrete sections *Zhigulevskaya HPP. Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2015, no.7, pp. 188-194. (in Russian)

3. Romanov A.A. *Zhigulevskaya GES. Ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Zhiguli hydroelectric power plant. Operation of hydraulic structures]. Samara, 2010. 360 p.

4. Romanov A.A., Evdokimov S.V., Seliverstov V.A. Study of oscillations of the buildings of Zhigulevsk hydroelectric power station. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering], 2015, no. 6, pp. 44-48. (in Russian)

5. Romanov A.A. *Zhigulevskaya GES. Ekspluatatsiya gidromekhnicheskogo oborudovaniya* [Zhiguli hydroelectric power plant. Operation of hydro-mechanical equipment]. Samara, Agni, 2011. 424 p.

6. Bal'zannikov M.I., Zubkov N.V., Kondrat'eva V.A., Khurtin V.A. Complex inspection of technical condition of building structures of Zhigulevskaya HPP. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic engineering construction], 2013, no. 6, pp. 21-27. (in Russian)

7. Romanov A.A. *Zhigulevskaya GES. Ekspluatatsiya elektrotekhnicheskogo oborudovaniya* [Zhiguli hydroelectric power plant. Operation of electrical equipment]. Samara, Agni, 2012. 544 p.

Об авторах:

ЕВДОКИМОВ Сергей Владимирович

кандидат технических наук, заведующий кафедрой природоохранного и гидротехнического строительства Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, тел. (846)242-21-71 E-mail: sali5@mail.ru

ЕВДОКИМОВ Sergey V.

PhD in Engineering Science, Head of the Environmental and Hydraulic Engineering Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 tel. (846) 242-21-71 E-mail: sali5@mail.ru

СЕЛИВЕРСТОВ Владимир Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры природоохранного и гидротехнического строительства Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, тел. (846)242-21-71 E-mail: v.a.seliverstoff@yandex.ru

SELIVERSTOV Vladimir A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Environmental and Hydraulic Engineering Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 tel. (846) 242-21-71 E-mail: v.a.seliverstoff@yandex.ru

ОРЛОВА Алла Алексеевна

доцент кафедры природоохранного и гидротехнического строительства Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, тел. (846)242-21-71 E-mail: allaorlova5@mail.ru

ORLOVA Alla A.

Associate Professor of the Environmental and Hydraulic Engineering Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 tel. (846) 2422171 E-mail: allaorlova5@mail.ru

Для цитирования: Евдокимов С.В., Селиверстов В.А., Орлова А.А. Результаты многофакторного анализа состояния гидротехнических сооружений // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 1. С. 71–76. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.10.

For citation: Evdokimov S.V., Seliverstov V.A., Orlova A.A. Results of Multi-Factor Analysis of the Condition of Hydrotechnical Constructions. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2019, Vol. 10, no. 1, Pp. 71–76. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.10.