УДК 621.43:517.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОПРОВОДЯЩИХ СООРУЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛА САЛЬСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Бандурин М.А., Михайлин А.А., Нефедов В.В., Пухлова А.А., Черненко А.Б.

ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: nvvnpi@gmail.com

В статье приводятся результаты моделирования технического состояния напряженно-деформированных изменений различных водопроводящих сооружений при проведении реконструкции элементов гидроузла расположенного на Сальском водохранилище. В результате эксперимента была построена твердотельная модель несущих элементов. Расчет был выполнен на программном комплексе SCAD, работа которого основана на методе конечных элементов и суперэлементов. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние железобетонных несущих элементов при изгибе, кручении, сжатии и растяжении, а также при их различном сочетании. Результаты проведенных расчетов говорят о наличии существенного запаса прочности несущих железобетонных элементов реконструируемого водоприемного колодца. В результате проведенных численных экспериментов был установлен порог опасности поднятия воды в водоприемном колодце, превышение которого может привести к разрушению сооружений.

Ключевые слова: гидротехника, сооружения, водопроводящий колодец, трубопровод, моделирование, напряженно-деформированное состояние, твердотельная модель, реконструкция, моделирование

MODELING OF STRESS-STRAIN CONDITIONS FOR WATER SPENDING CONSTRUCTIONS AS ILLUSTRATED BY EXAMPLE OF HYDROSYSTEM OF THE SALSK RIVER RESERVOIR

Bandurin M.A., Mihailin A.A., Nefedov V.V., Puhlova A.A., Chernenko A.B.

FGBOU VPO «Platov' South-Russian State Technical University (NPI)», Novocherkassk, e-mail: nvvnpi@gmail.com

The article presents the results of the technical state of modeling stress-strain changes in the various water conveyance structures during reconstruction elements hydroelectric dam located on Sal. The experiment solid model was constructed of bearing elements. The calculation was made on the SCAD program complex, which is based on the finite element method and super element. Considered the stress-strain state of reinforced concrete load-bearing elements in bending, torsion, tension and compression, as well as their various combinations. The results of the calculations indicate the presence of a substantial safety margin bearing concrete elements of the reconstructed water intake wells. As a result of numerical experiments was set threshold of the danger of raising the water in the well water intake, excess of which may lead to the destruction of buildings.

Keywords: hydraulic engineering, construction, feeding canal well, pipeline, modeling, stress-strain state, solid model, reconstruction, modeling

На современном этапе эксплуатации ГЭС в России актуальным является вопрос о реконструкции и техническом перевооружении гидроузлов в целом по стране. Большинство длительно эксплуатируемых гидротехнических сооружений России находится в неудовлетворительном состоянии, требующем модернизации и реконструкции. По прошествии длительного периода эксплуатации гидротехнические сооружения продолжают работать без плановых ремонтов, необходимо произвести техническую реконструкцию сооружения на базе инновационных, а также ранее проверенных технологий ремонта. Всего в России находится в эксплуатации около 65 тысяч гидротехнических сооружений, попадающих под действие закона «О безопасности гидротехнических сооружений» № 117-ФЗ.

Гидроузел Сальского водохранилища представляет собой земляную плотину длиной 240 м и шириной по гребню 10 м, наибольшая высота плотины – 8 м, средняя – 8 м. Состав гидротехнического сооружения – плотина, водосбросное сооружение, водовыпуск, объем водохранилища – 23 млн м^3, площадь водного зеркала при НПУ – 770 га, максимальный напор – 4,0 м, средняя глубина – 3,0 м, ширина водоохранной зоны – 50,0 м.

На данном гидроузле запланирована реконструкция с целью создания малой ГЭС. После проведения реконструкции Сальского гидроузла работа будущей малой ГЭС будет обеспечиваться за счет поднятия уровня воды в водохранилище на 0,5 м выше отметки НПУ = 29,0 м и тем самым создания дополнительного напора для работы малой ГЭС. Сальское водохранилище расположено в бассейне

реки Средний Егорлык, объем водохранилища 23,1 млн м^3, наибольшая длина 22,0 км, площадь водной поверхности 7,7 км^2 = 770 га, при средней глубине 3,0 м [3].

На низконапорных гидроузлах закрытые водосбросы применяют в основном для пропуска расходов, не превышающих 50... 100 м^3/с. Среди таких водосбросов наиболее широко распространены конструкции сифонного, ковшового и шахтного типов. Отличительные особенности водосбросов сифонного типа – незначительный подъём воды в водохранилище (0,5 ... 0,8 м) над НПУ при сбросе максимальных расходов, что позволяет уменьшить площадь отчужденных земель под чашу водохранилища, а также высокая сборность сооружения (коэффициент сборности 56... 63 %). Сооружение возводят из пяти типов унифицированных изделий. К недостаткам конструкции сооружения относятся трудность обеспечения высокой степени герметичности соединения напорных труб в реальных условиях строительства и эксплуатации, а также цикличность работы.

Основной элемент сифонного водосброса – трубопровод, запроектированный из звеньев железобетонных напорных труб. В зависимости от требуемой пропускной способности сооружения трубы укладывают в одну, две или три нити. Данный тип водосброса рекомендуется применять на водотоках с быстро нарастающим паводком и небольшой аккумулирующей емкостью водохранилища. Функции водоприемника в сооружении выполняет шахта, верхнюю кромку которой располагают на отметке нормального подпорного уровня. На гребне предусматривают установку сороудерживающей решетки. В передней части шахты устраивают затворную камеру, в которой монтируют рабочий и резервный затворы. При необходимости забора воды на орошение в шахте на различных её отметках могут быть устроены отверстия с выпуском воды в затворную камеру.

В ходе проведения реконструкции гидроузла Сальского водохранилища запроектировано техническое решение, имеется успешный опыт эксплуатации оборудования на перепадах уже существующих плотин, каналов, систем водоснабжения и водоотведения промышленных предприятий и объектов городского хозяйства, очистных сооружений, оросительных систем и питьевых водоводов.

1. Тип гидроэлектростанции: деривационная малая ГЭС.

2. Сооружения малой ГЭС:

– входная часть – водоприемный колодец (2,8х3,5 м);

– проводящая часть – деривационный трубопровод ($Д_н$ = 0,72 м; 2 нитки),

– здание малой ГЭС 6х6 м;

– отводящий канал ($в_{дн}$ = 4 м, $И_{расч}$ = 1,1 м);

3. Класс капитальности основных сооружений – III класс.

4. Напор максимальный статический: 6,5 м.

5. Максимальный расход: 0,83 м/с.

6. Установленная мощность электростанции: 150 кВт.

7. Среднемноголетняя выработка электроэнергии: 225600 кВт.

8. Минимальное число часов использования установленной мощности в год: 1684 часа.

При мощности малой ГЭС 150 кВт вырабатываемой электроэнергии достаточно для обеспечения ближайшего сельского населения Ростовской области. Использование ресурсов гидроэлектростанции (относительно дешёвой электроэнергии, очищенной воды, конденсата, пара) обеспечит продукции более низкую себестоимость и, соответственно, конкурентоспособность. Использование всей электроэнергии, вырабатываемой малой ГЭС, на производство продукции постоянного спроса будет способствовать повышению её экономической устойчивости, особенно в условиях кризиса.

Ставится задача повышения уровня водохранилища в процессе реконструкции, поэтому в качестве объекта исследований рассматривается водоприемный колодец, и определяются степени надежности реконструируемого сооружения.

На первой стадии эксперимента была построена твердотельная модель [6] (рис. 1) водоприемного колодца.

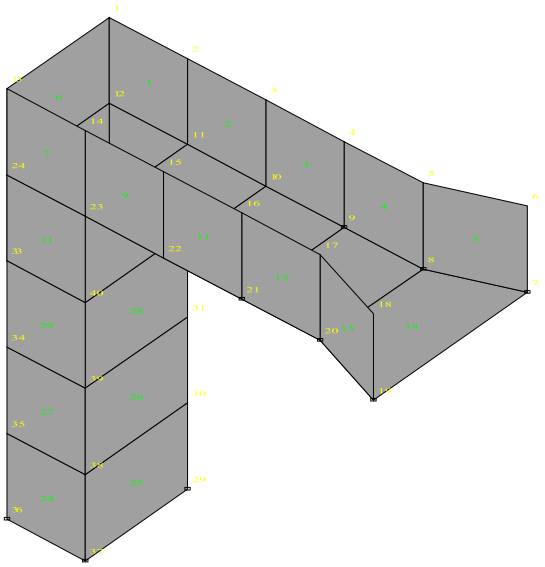
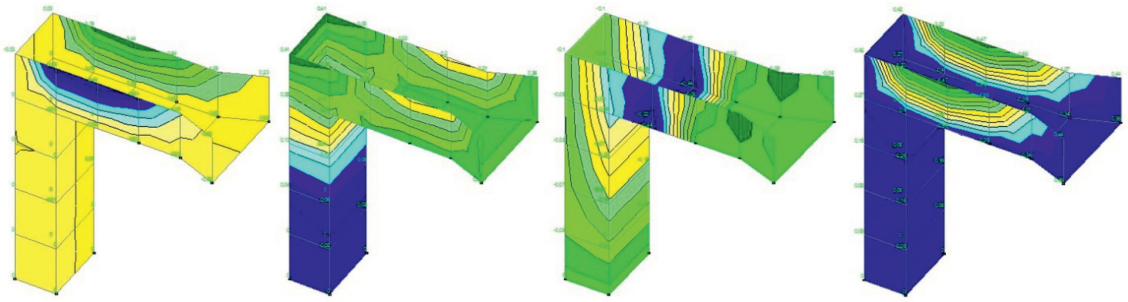
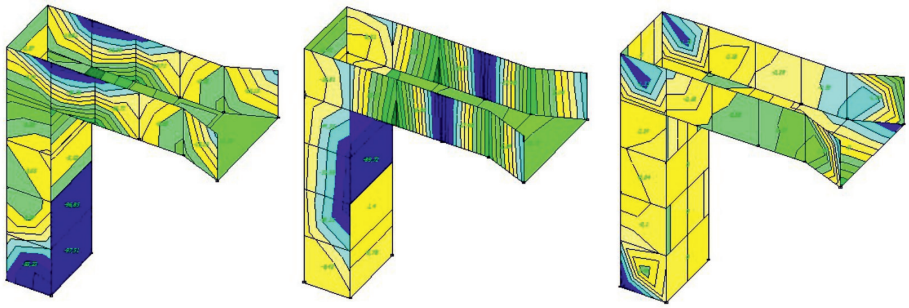


Рис. 1. Твердотельная модель водоприемного колодца



а) б) в) г)

Рис. 2. а) эпюра перемещений по горизонтали поперек водоприемного колодца; б) эпюра перемещений по горизонтали по длине водоприемного колодца; в) эпюра перемещений по вертикали водоприемного колодца; г) эпюра суммарных перемещений водоприемного колодца



а) б) в)

Рис. 3. а) эпюра напряжений по горизонтали водоприемного колодца; б) эпюра напряжений по вертикали водоприемного колодца; в) эпюра суммарных напряжений водоприемного колодца

Расчет был выполнен на программном комплексе SCAD, работа которого основана на методе конечных элементов и суперэлементов. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние железобетонных несущих элементов при изгибе, кручении, сжатии и растяжении, а также при их различном сочетании. Кодирование исходной информации осуществлялось в терминах метода приращений с учетом фрагментального представления несущих элементов в виде объектов простой геометрической формы, выполненных из железобетона марки В45. В постановке численного расчета реконструируемого водопроводящего колодца без образования дефектов преследовалась цель установления адекватности твердотельной модели в напряженно-деформированном состоянии. Число элементов и число узлов ансамбля соответственно составило 143673 и 32742 [6, 1]. Кодирование исходной информации осуществлялось в терминах метода приращений с учетом фрагментарного представления водоприемного колодца в виде объектов простой геометрической формы.

Сравнения эпюр перемещений водоприемного колодца по вертикали, по горизонтали вдоль и поперек несущих элементов выявило незначительные внутренние изменения. Наиболее интересна эпюра перемещений по горизонтали (рис. 2, а), на которой показано изменение положения элементов вследствие приложенных нагрузок, а также некритические смещения бортов. Данные результаты свидетельствует о наличии большого запаса их прочности.

Перемещения по горизонтали вдоль несущих элементов показывают незначительные смещения зон опирания горизонтальных железобетонных элементов (рис. 2, б) [7].

На рис. 2, в представлена эпюра перемещений по вертикали водоприёмного

колодца, где видно слабое место реконструируемого железобетонного водоприемного колодца. В месте сопряжения горизонтальных и вертикальных элементов при эксплуатации сооружения и изменении технических параметров могут возникнуть продольные трещины. Во избежание данной проблемы выявленное слабое место железобетонного сооружения необходимо усилить, так как его технические свойства находятся на опасном пороге технической эксплуатации. Также необходимо обратить внимание на усиление арматурного каркаса водоприемного колодца.

Суммарные эпюры перемещений подчёркивают (рис. 2, г) незначительную жесткость бортовых горизонтальных элементов, нуждающихся тоже в арматурном усилении [5].

несущих элементов. Присутствуют также напряжения в горизонтальных железобетонных элементах.

Проведенное моделирование напряженно-деформированного состояния убедило в наличии существенного запаса прочности несущих железобетонных элементов реконструируемого водоприемного колодца.

Анализ полученных данных показал, что величины абсолютных перемещений удовлетворяют принятым нормам проектирования гидротехнических сооружений. Учитывая, что метод конечных элементов базируется на общих гипотезах теории упругости, ему следует отдавать предпочтение при проектировании и расчетах гидротехнических сооружений. Полученные величины максимальных напряжений

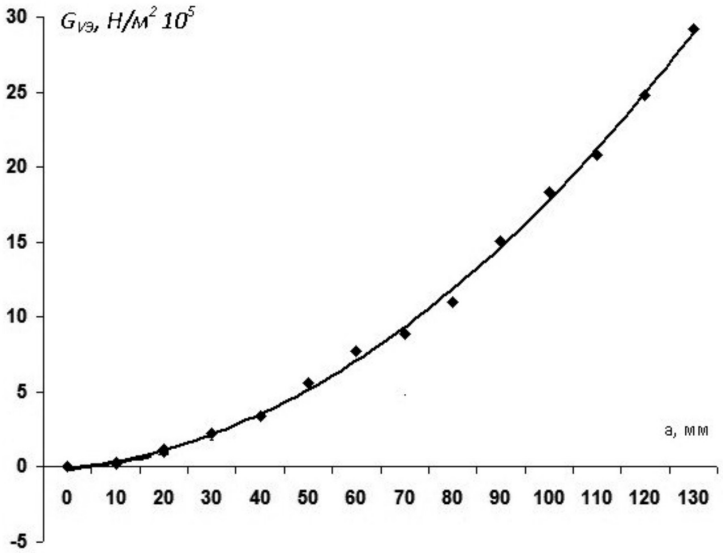


Рис. 4. График эквивалентного напряжения по von Mises водоприемного колодца

Как показали результаты сравнения эпюр эквивалентного напряжения von Mises (рис. 3) [4], наибольшие напряжения возникают по вертикали несущих элементов, а именно в нижней части сооружения. Это свидетельствует о возникновении критических напряжений в основании сооружения, воспринимающего на себя не только нагрузку от воды, но и вес всего сооружения.

Эпюры эквивалентного напряжения von Mises по горизонтали вдоль и поперек несущих элементов (рис. 3, а) показывают также наибольшие напряжения, возникающие в зоне опирания сооружения на фундамент, вызванные деформациями

меньше значений, вычисленных по формулам СП [2].

Получены эмпирические зависимости изменения напряжено-деформированного состояния моделируемых элементов от интенсивности поднятия уровня воды (рис. 4).

Водоприемный колодец:

$$G_{VЭ} = 0{,}000479a^2 + 0{,}0219a - 0{,}337;$$
$$R^2 = 0{,}97;$$

В результате проведенных численных экспериментов был установлен интенсивный порог опасности поднятия воды в водоприемном колодце, превышение которого может привести к разрушению сооруже-

ний – более ¼ превышения уровня наполняемости.

Список литературы

1. Бандурин М.А. Мониторинг и расчёт остаточного ресурса аварийных мостовых переездов через водопроводящие сооружения / М.А. Бандурин // Инженерный вестник Дона. – 2012. Т. 22, № 4–1 (22). – С. 37.

2. Бандурин М.А. Проблемы определения остаточного ресурса технического состояния закрытых водосбросов низконапорных гидроузлов / М.А. Бандурин // Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т. 28, № 1. – С. 69.

3. Бандурин М.А. Совершенствование методов продления жизненного цикла технического состояния длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений / М.А. Бандурин // Инженерный вестник Дона. – 2013. – Т. 24, № 1 (24). – С. 28.

4. Волосухин Я.В. Применение неразрушающих методов при проведении эксплуатационного мониторинга технического состояния каналов обводнительно- оросительных систем / Я.В. Волосухин, М.А. Бандурин // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2012. – № 2. – С. 102–106.

5. Волосухин Я.В. Проведение эксплуатационного мониторинга с применением неразрушающих методов контроля и автоматизация моделирования технического состояния гидротехнических сооружений / Я.В. Волосухин, М.А. Бандурин // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2011. – № 3. – С. 88–93.

6. Кабельков В.А., Кабельков А.Н., Нефедов В.В., Калинин П.В. Исследование автоколебаний, возникающих при динамическом контакте деформируемых тел // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2012. – № 2. – С. 32–35.

7. Михайлин А.А. Сравнительный анализ математических моделей устойчивости глубокоразрыхленных влагонасыщенных склонов / А.А. Михайлин // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2; URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2942.