

Численные методы расчета конструкций

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Г. Л. КОЗИНЕЦ*, канд. техн. наук,

С. Е. ЛИСИЧКИН, д-р. техн. наук,

С. В. БОГАЧЕНКО, инженер,

А. В. ИВОНТЬЕВ**, инженер

*ОАО «Ленгидропроект», 197227, С-Петербург, пр. Испытателей, 22

**ГУП ГПИ «Владимиргражданпроект», E-mail: avivon@mail.ru

В статье предложена методика конечноэлементного моделирования сталежелезобетонных конструкций, позволяющая учитывать реальные свойства материалов. Представлены конечноэлементные модели сталежелезобетонных напорных водоводов и спиральных камер. Выполнен анализ результатов расчета.

Ключевые слова: сталежелезобетонные гидротехнические сооружения, метод конечных элементов, матрица жесткости, метод Ньютона-Рафсона, трещинообразование, критерии прочности.

Работоспособность железобетонного гидротехнического сооружения зависит от прочности составляющих его элементов – бетона, арматуры и стальной оболочки, на которую непосредственно действует гидростатическое давление воды. Для исследования напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонного гидротехнического сооружения классические теории применимы лишь условно, так как комплексный материал по разному сопротивляется растяжению-сжатию, обладает способностью к трещинообразованию, что обуславливает появление деформационной анизотропии, поэтому актуальной является задача адекватного математического моделирования и расчета таких сооружений численными методами.

В настоящее время для расчета сталежелезобетонных сооружений используется ряд методик. Существующие российские нормативные документы фактически приводят расчетные зависимости лишь для плосконапряженных железобетонных конструкций, при этом не учитываются некоторые важные особенности работы сталежелезобетонных конструкций гидротехнических сооружений, не регламентируется учет возможных схем изменения состояния элементов сооружения [1-7].

Большинство новых методик расчета разработано для строительных конструкций за рубежом и положено в основу действующих международных норм по проектированию (*DIN, AMERIKAN-STANDART*) [8], [9]. Применение указанных норм для гидротехнических сооружений в Российской Федерации не регламентировано и крайне ограничено, так как в российских нормах заложены гипотезы и подходы, отличающиеся от тех, что реализованы в международных стандартах. Систематические исследования бетона и его физической нелинейности были начаты в работах А.Ф.Лолейта [14] и В.И.Мурашева [15]. Результаты исследований в этом направлении отражены в работах А.А.Гвоздева и Н.И. Карпенко [12], Т.А.Балана, С.Ф.Клованича [10], А.С.Городецкого [13]. Способ учета распределения арматуры в плоском железобетонном элементе предложен в статье А.А.Гвоздева и Н.И.Карпенко [12] и в дальнейшем использовался в работах А.С.Городецкого, В.С.Здоренко [13], Г.Р.Бидного [11], M.Suidan, W.C. Schnobrich [16], V.Cervenka [17], [18] и др. В настоящее время этот способ получил значительное распространение и используется в большинстве численных иссле-

дований железобетонных строительных конструкций промышленных и гражданских сооружений.

При этом вопросы моделирования сталежелезобетонных гидротехнических сооружений, таких как турбинные сталежелезобетонные водоводы и блоки спиральных камер зданий ГЭС, не изучены в полной мере и проблема анализа поведения неоднородного материала в условиях возникающего в процессе эксплуатации объемного трещинообразования требует дополнительного изучения.

Для решения инженерной задачи с помощью метода конечных элементов возникает вопрос: как корректно аппроксимировать все составляющие сталежелезобетонной конструкции, чтобы получить напряжения в арматуре и металле, сравнить их с нормативными значениями; оценить запас прочности конструкции, находящейся в эксплуатации и определить требуемую проектную толщину металлической оболочки и расчетную арматуру проектируемой конструкции. Первоочередная задача, которую необходимо выполнить, это численное моделирование работы железобетонных элементов, работающих совместно с металлической оболочкой. Предложим следующий алгоритм моделирования, представленный на блок-схеме рис. 1.

Математическое описание жесткости железобетона принимается из условия, когда жесткость i -го конечного элемента представляется в виде суммы жесткостей бетона с учетом трещинообразования и «заполнителей» (арматурных стержней), то есть:

$$[K]_i = [K_b] + \sum [\bar{K}_s] = [B]^T [D_b] [B] dv + \sum_s [H]_s^T [\bar{K}_s] [H]_s, \quad (1)$$

где $[D_b]$ - матрица механических характеристик бетона; $[\bar{K}_s] = E_s A_s \int_{-1}^1 [\bar{B}]^T [B] ad\xi$ - матрица жесткости s -го стержня; E_s, A_s - модуль деформации и площадь поперечного сечения s -го арматурного стержня. Металлическая оболочка аппроксимируется плоскими элементами пластин с матрицей жесткости, включающей матрицы жесткости элементов металлической оболочки:

$$[\bar{K}_s] = \int_{-1}^1 k_s ds. \quad (2)$$

Уравнения равновесия узлов системы в предположении физической линейности задачи, когда свойства материалов не зависят от достигнутого уровня напряжений и деформаций, то есть при постоянстве матриц $[D_b]$ и модуля арматуры E_s :

$$\{P\} = [K] \{q\}, \quad (3)$$

где $[K]$ - матрица жесткости системы, определяемая суммированием матриц жесткости отдельных элементов, $\{q\}$ - узловые перемещения системы; $\{P\}$ - вектор узловых сил системы.

При решении нелинейных задач нелинейная матрица $[D_b]$, равная упруго-пластической матрице, определяется по теории течения и является касательной матрицей, связывающей приращения деформаций и напряжений, т.е. $\{d\sigma_b\} = [D_b] \{d\varepsilon_b\}$. Уравнение равновесия i -го конечного элемента будет выглядеть следующим образом: $\{\Delta R\}_i = [K]_i \{\Delta q\}_i$. В целом для системы разрешающие уравнения МКЭ формулируются в приращениях $\{\Delta P\} = [K] \{\Delta q\}$, где $[K]$ - касательная матрица жесткости системы.

Наиболее подходящим методом решения физически нелинейных задач, является шаговый метод приращения нагрузки с итерационной процедурой Ньютона-Рафсона на каждом шаге решения. Метод Ньютона-Рафсона является методом касательных напряжений, что полностью отвечает физической природе матрицы жесткости, полученной на базе теории течения. Алгоритм решения нелинейных задач шаговым методом с процедурой Ньютона-Рафсона на каждом шаге представлен блок схемой на рис. 2.



Рис.1. Алгоритм моделирования сталежелезобетонных сооружений

Результаты решения поставленной задачи были апробированы на примере расчетов сталежелезобетонного водовода Ирганайской ГЭС и агрегатного блока со спиральной камерой с мягкой прокладкой Ленинградской ГАЭС.

Расчеты выполнены по предельным состояниям первой группы для вариантов основных и особых сочетаний нагрузок.

Условие прочности при наступлении предельного состояния:

$$\gamma_{1c} F < R \frac{\gamma_c}{\gamma_n}, \quad (4)$$

где γ_{1c} - коэффициент сочетаний нагрузок, принимаемый при расчетах по предельным состояниям первой группы равным: для основного сочетания нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации - 1,00; то же, в период строительства и ремонта - 0,95; для особого сочетания нагрузок и воздействий - 0,90; F – расчетное значение обобщенного силового воздействия; R – расчетное



Рис. 2. Блок-схема расчета при использовании шагового метода Ньютона-Рафсона с итерационным уточнением

значение обобщенной несущей способности; $\gamma_c = 1$ - коэффициент условий работы; γ_n - коэффициент надежности по назначению. Начальный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении $E_b = 35 \times 10^3$ МПа. Коэффициент поперечной

деформации бетона (коэффициент Пуассона) для массивных конструкций $\nu = 0,15$.

Стержневая арматура: растянутая и сжатая – класса АШ Ø10...40 мм.

Расчетные сопротивления арматуры сжатию и растяжению для предельных состояний первой группы: $R_s=365\text{МПа}$; $R_{s,ser}=390\text{МПа}$.

Начальный модуль упругости арматуры для класса А-III – $E_s=200000\text{МПа}$.

Для стали оболочки $R_o = 300\text{МПа}$. Таким образом, условие прочности при расчете по предельным состояниям первой группы:

$\sigma_{max} \leq 240\text{МПа}$ (сталь оболочки) – для основных сочетаний нагрузок;

$\sigma_{max} \leq 267\text{МПа}$ (сталь оболочки) – для особых сочетаний нагрузок;

$\sigma_{max} \leq 292\text{МПа}$ (арматура) – для основных сочетаний нагрузок;

$\sigma_{max} \leq 320\text{МПа}$ (арматура) – для особых сочетаний нагрузок.

Согласно техническому заданию в ОАО «Ленгидропроект» был выполнен расчет прочности сталежелезобетонной конструкции напорного водовода с учетом температурных, сейсмических воздействий и гидравлического удара. Максимальные значения перемещений металлической оболочки на открытом участке трубопровода составляют 2,6 мм и полностью компенсируются работой компенсатора, который имеет диапазон регулирования до 10 мм. Результаты расчета армирования водовода представлены в таблице 1. Расчет арматуры турбинного водовода, проведенный для основных сочетаний нагрузок с учетом температурных воздействий показал, что армирование, в целом соответствует проектному. Величина запаса в кольцевом направлении составила до 8%. Величина запаса в продольном направлении составила от 0,6% до 31%. Исключение составляет участок от развилки за дисковым затвором, на котором при основном сочетании нагрузок зимнего периода эксплуатации расчетное армирование превысило проектное на 12%, таким образом, рекомендуется выполнить мероприятия по устранению контакта с открытым воздухом с помощью утеплителя или засыпки грунта. Расчет участка развилки турбинного водовода на гидравлический удар показал, что площадь расчетного кольцевого армирования превышает проектную на 6%. Таким образом, дисковый затвор можно использовать только в качестве ремонтного. Напряженное состояние внутренней стальной оболочки показано на рис. 3.

После выполнения линейного анализа агрегатного блока (включающего спиральную камеру) здания Ленинградской ГАЭС с учетом мягкой прокладки по контакту верхней половины стальной оболочки спиральной камеры на основе полученного напряженного состояния бетона блока была определена требуемая площадь рабочей арматуры, которая составила: в продольном направлении – 24,0 см²/1п.м.; в кольцевом направлении – 24,1 см²/1п.м. Приведенные значения напряжений в стальной оболочке спиральной камеры удовлетворяют критерию прочности стали.

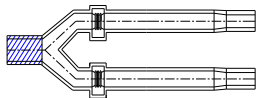
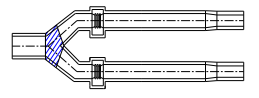
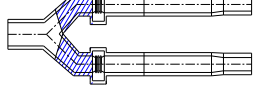
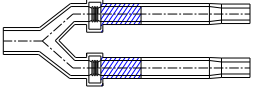
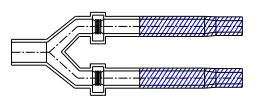
Выводы:

1. Работоспособность сталежелезобетонного турбинного водовода Ирганайской ГАЭС обеспечена с определенными запасами прочности арматуры железобетонной оболочки и стали внутренней стальной оболочки.

2. Проектные решения агрегатного блока, включающего спиральную камеру, здания Ленинградской ГАЭС подтверждены расчетом при обосновании прочности составляющих его элементов – бетона, арматуры и стальной оболочки.

Таблица 1

Армирование сталежелезобетонного водовода

Армирование		Расчетное кольцевое армирование поперечного сечения, см ²	Проектное кольцевое армирование поперечного сечения, см ²	Расчетное продольное армирование поперечного сечения, см ²	Проектное продольное армирование поперечного сечения, см ²
 Участок напорного водовода перед развилкой	Внутренний слой	32,44 (26,44)	29,84 (4Ø20+2L 75 x6)	13,50	19,63 (4Ø25)
	Наружный слой	12,56 (12,56)	12,56 (4Ø20)	13,50	19,63 (4Ø25)
	Σ	45,00 (39,00)	42,40	27,00	39,26
 Развилка	Внутренний слой	19,50	19,63(4Ø25)	19,50	19,63(4Ø25)
	Наружный слой	19,50	19,63(4Ø25)	19,50	19,63 (4Ø25)
	Σ	39,00	39,26	39,00	39,26
 Участок напорного водовода от развилки до дискового затвора	Внутренний слой	32,44 (26,44)	25,32 (4Ø16+2L 75 x6)	19,50	14,73 (3Ø25)
	Наружный слой	12,56 (12,56)	8,04 (4Ø16)	19,50	19,63 (4Ø25)
	Σ	45,00 (39,00)	33,36	39,00	34,36
 Участок напорного водовода от дискового затвора до колена	Внутренний слой	26,44	25,32 (4Ø16+2L 75 x6)	19,50	14,73 (3Ø25)
	Наружный слой	12,56	8,04 (4Ø16)	19,50	19,63 (4Ø25)
	Σ	39,00	33,36	39,00	34,36
 Пристанционный участок	Внутренний слой	40,21	49,45 (4Ø32+2L 75 x6)	8,00	14,73 3Ø25
	Наружный слой	19,79	24,63 (4Ø28)	8,00	19,63 (4Ø25)
	Σ	60,00	74,08	16,00	34,36

Примечания

1. Проектная и расчетная арматура, представленная в таблице, выполняется из арматуры класса А III.
2. Красным цветом отражена расчетная площадь армирования, полученная при рассмотрении случая гидравлического удара в районе дискового затвора.
3. Черным цветом отражена расчетная площадь армирования для основного сочетания нагрузок зимнего периода эксплуатации, а также площадь армирования, принятого в проекте.

Л и т е р а т у р а

1. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений./М.: Госстрой СССР, 1988.

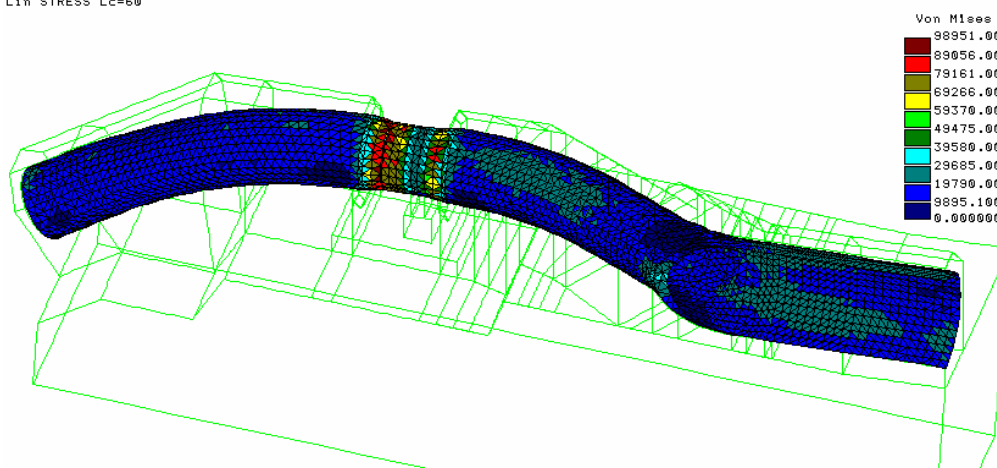


Рис. 3. Приведенные напряжения (по фон Мизесу) в металлической облицовке водовода Ирганайской ГЭС на участке с развилкой (основное сочетание нагрузок с учетом температурных воздействий зимнего периода эксплуатации), КПа

2. СНиП 33.01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения/М.,2003.
3. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия/ М.: Минстрой России, 1996.
4. СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах/ М., 1995.
5. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений/ М., 1987.
6. СТО 17330282.27.140.002-2008. Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Условия создания. Нормы и требования / РАО ЕЭС России, 2008.
7. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции/ М.: Госстрой СССР, 1990.
8. DIN 19704-1, DIN 19704-2, DIN19704-03. Stahlwasserbauten- Teil: Berechnungsgrundlagen: 1998-05.
9. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary on Standard for Analysis of Safety-Related Nuclear Structures // ASCE Standard, Sept/1986.
10. Балан Т.А., Клованич С.Ф. Определяющие соотношения для бетона при сложном, непропорциональном нагружении и нагреве // Строительная механика и расчет сооружений. – 1987. – № 2. – С. 39-44.
11. Бидный Г.Р., Клованич С.Ф., Осадченко К.А. Расчет железобетонных конструкций при сложном нагружении методом конечных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1986. – № 5. – С. 22 - 26.
12. Гвоздев А.А., Карпенко Н.И. Работа железобетона с трещинами при плоском напряженном состоянии// Строит. механика и расчет сооружений.-1965.-№ 2.-С. 20 - 23.
13. Городецкий А.С., Здоренко В.С. Расчет железобетонных балок-стенок с учетом образования трещин методом конечных элементов // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев: Будивельник, 1975. – Вып. 57. – С. 59 -66.
14. Лолейт А.Ф. Новый проект норм // Доклад на I Всесоюзной конференции по бетону и железобетону 20 - 25 апреля 1930 г. в Москве / Тр. конф. – М.: 1931.
15. Мурашев В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона. -М.: Машстройиздат, 1958. – 268 с.
16. Suidan M., Schnobrich W.C. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete // J. Struct. Div., ASCE. – 1973. – V. 99. – №ST10, Oct.
17. Cervenka V. Constitutive Models for Cracked Reinforced Concrete // ACI Journal. – 1985. – V. 82. - № 6. – P. 877 – 882.
18. Cervenka V. Inelastic Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Panels Under Inplane Loads: Ph.D....dis/Dept. Civ. Eng. Univ. Colorado. – Boulder,1970. – 20 p.

NUMERICAL MODELING OF STEEL-AND-REINFORCED CONCRETE HYDRO TECHNICAL STRUCTURES

G.L. Kosinetz, S.E. Lisichkin, S.V. Bogachenko, A.V. Ivontiyev

The method of FE modeling is presented for steel-and-reinforced concrete hydro technical structures. Real properties of material are taken into consideration.