

05.23.07 Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 502/504: 627.8:626.01:693.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-59-67

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГТС, УСИЛЕННЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ БАЗАЛТОКОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ

БЕЛЛЕНДИР ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ¹, д-р техн. наук,
генеральный директор АО Институт «Гидропроект»
e.bellendir@hydroproject.ru

РУБИН ОЛЕГ ДМИТРИЕВИЧ², д-р техн. наук,
директор филиала АО «Институт Гидропроект»-«НИИЭС»
o.rubin@hydroproject.ru

ЛИСИЧКИН СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ³, д-р техн. наук,
заместитель генерального директора ООО «ИЦ СКТЭ»
cskte@mail.ru

БАКЛЫКОВ ИГОРЬ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ², ведущий инженер филиала
АО «Институт Гидропроект»-«НИИЭС»
i.baklykov@hydroproject.ru

¹ АО Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука; 125080, Москва, Волоколамское ш., 2. Россия

² Филиал АО Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука – НИИ энергетических сооружений; 125080, Москва, Волоколамское ш., 2. Россия

³ ООО «Инженерный центр сооружений, конструкций и технологий»; 125362, г. Москва, ул. Свободы, 35. Россия

Представлена разработка методики численного моделирования и расчета железобетонных конструкций эксплуатируемых ГТС, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой, в том числе на основе данных экспериментальных исследований, выполненных в филиале АО «Институт Гидропроект»-«НИИЭС». Расчетные исследования проводились на основе пространственных конечно-элементных моделей в рамках программного комплекса «ANSYS». При разработке моделей использовались результаты экспериментальных и теоретических исследований гидротехнических железобетонных конструкций, в которых предварительно напряженная базальтокомпозитная арматура размещается как в растянутой, так и в сжатой зонах конструкций.

Ключевые слова: эксплуатируемые ГТС, железобетонные конструкции, усиление, предварительное напряжение, базальтокомпозитная арматура, пространственные конечно-элементные модели, нормальные трещины, межблочные швы

Формат цитирования: Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Баклыков И.В. Методика моделирования и расчета железобетонных конструкций эксплуатируемых ГТС, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Природообустройство. – 2021. – № 5. – С. 59-67. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-59-67.

© Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Баклыков И.В., 2021

Original article

METHODS OF MODELING AND CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF OPERATED GTS, REINFORCED WITH PRESTRESSED BASALT COMPOSITE REINFORCEMENT

BELLENDIR EVGENIY NIKOLAEVIC¹, doctor of technical sciences,
general director of JSC «Institute «Hydroproject»
e.bellendir@hydroproject.ru

RUBIN OLEG DMITRIEVICH², doctor of technical sciences,
director of the branch of JSC «Institute «Hydroproject»-«NIIES»
o.rubin@hydroproject.ru

LISICHKIN SERGEY EVGENJEVICH³✉, doctor of technical sciences,
deputy General director of OOO «ITS SKTE (Engineering Center of Structures,
Constructions and Technologies in Power Engineering)»
cskte@mail.ru

BAKLYKOV IGOR VYACHESLAVOVICH², leading engineer
i.baklykov@hydroproject.ru

¹JSC «Design – survey and research institute «Hydroproject» named after S.Ya. Zhuk», 125080, Moscow, Volokolamskoe Shosse, 2, Russia

²Branch of JSC «Institute Hydroproject»-«Research Institute of Energy Structures», 7a, Stroitelny proyezd, 125362, Moscow, Russia

³«Engineering Center of Structures, Constructions and Technologies in Power Engineering», Ltd., 35, ulitsa Svobody, 125362, Moscow, Russia

The development of a methodology for numerical modeling and calculation of reinforced concrete structures of operated hydraulic structures, reinforced with prestressed basalt composite reinforcement, including on the basis of experimental research data carried out in the branch of JSC «Institute Hydroproject»-«NIIES» is presented. Computational studies were carried out on the basis of spatial finite element models in the framework of the ANSYS software package. Developing the models, the results of experimental and theoretical studies of hydrotechnical reinforced concrete structures were used in which prestressed basalt composite reinforcement is placed both in the tensioned and compressed zones of the structures.

Keywords: operated hydraulic structures, reinforced concrete structures, gain, prestressing, basalt composite reinforcement, spatial finite element models, normal cracks, interblock joints

Format of citation: Bellendir E.N., Rubin O.D., Lisichkin S.E., Baklykov I.V. Methods of modeling and calculation of reinforced concrete structures of operated GTS, reinforced with prestressed basalt composite reinforcement // Prirodobustrojstvo. – 2021. – № 5. – S. 59-67. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-59-67.

Введение. В филиале АО «Институт Гидропроект»-«НИИЭС» были проведены экспериментальные и теоретические исследования железобетонных конструкций эксплуатируемых ГТС, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой [1, 2]. На основе полученных результатов комплекса экспериментальных и теоретических исследований была разработана методика численного моделирования и расчета железобетонных конструкций эксплуатируемых ГТС, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой. В рамках пространственных конечно-элементных моделей воспроизводились вертикальные межблочные швы, нормальные и наклонные трещины, стальная и базальтокомпозитная арматура.

Результаты расчетов на основе разработанной методики согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает достоверность разработанной методики.

Материалы и методы исследований. В соответствии с разработанной методикой моделирование опытных железобетонных конструкций, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой (ПН АБК), выполнялось в пространственной постановке в рамках программного комплекса (ПК) «ANSYS» [3]. При этом был учтен опыт численного моделирования железобетонных конструкций ГТС, успешно реализованный в филиале АО «Институт Гидропроект»-«НИИЭС» и АО НИИЭС [4-9].

В основу пространственных конечно-элементных моделей положены результаты

экспериментальных исследований железобетонных моделей:

- воспроизводились вертикальные межблочные швы, расположенные в зоне действия изгибающего момента и поперечной силы;
- нормальные трещины, расположенные в зоне действия изгибающих моментов («чистого изгиба»);
- наклонные трещины, образовавшиеся из вертикальных межблочных швов;
- армирование стальной арматурой в виде двух диаметров 12 мм А500С и предварительно напряженной АБК (ПН АБК)

диаметром 12 мм, расположенной в растянутой или сжатой зонах конструкции.

Следует отметить особенности моделирования взаимодействия ПН АБК и стальной арматуры с бетоном на основной протяженности конструкции, в зонах вертикальных межблочных швов и в зонах вертикальных нормальных трещин.

В рамках ПК «ANSYS» моделируется одна из симметричных половин конструкции.

Для железобетонной модели 1, в которой ПН АБК установлена в растянутой зоне, предложена методика расчета (рис. 1).

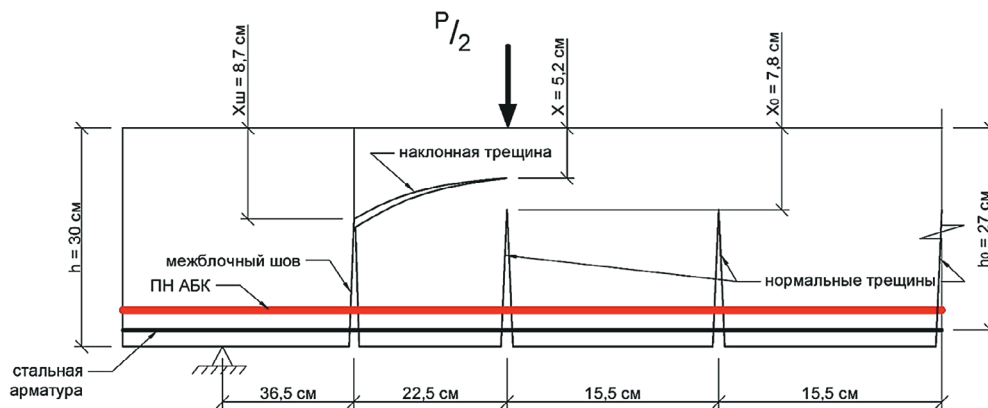


Рис. 1. Геометрия расчетной модели 1, в которой ПН АБК расположена в растянутой зоне

Fig. 1. Geometry of the calculation model 1, in which PN ABK is located in a stretched zone

При треугольной эпюре сжимающих напряжений в бетоне сжатой зоны конструкции высота сжатой зоны над вершиной вертикальной трещины X_0 в сечении действия опытной нагрузки ($P/2$) определяется на основе зависимости

$$x_0 = K_p \cdot x \quad (1)$$

в которой x – высота сжатой зоны конструкции над вершиной наклонной трещины, определяемая в свою очередь по формуле:

$$x = h_0 \cdot \sqrt{\mu \cdot n} = h_0 \cdot \sqrt{\frac{A_s}{b \cdot h_0} \cdot \frac{E_s}{E_b}}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент армирования стальной арматурой; $n = E_s/E_b$.

Коэффициент K_p определяется по результатам комплекса экспериментальных исследований [1] и равен:

$K_p = 1,5$ – при расположении предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуры в растянутой зоне конструкции;

$K_p = 1,85$ – при расположении предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуры в сжатой зоне конструкции.

Исходя из геометрических размеров опытных конструкций и формул (1) и (2):

1. Протяженность вертикальной трещины по направлению снизу вверх по вертикальному межблочному шву принимается равной $30 - 8,7 = 21,3$ см (наклонная трещина, исходя из экспериментальных исследований, выклинивается на расстоянии 8,7 см от верхней сжатой грани).

2. Далее из вершины трещины по вертикальному шву моделируется траектория наклонной трещины в направлении вертикальной линии действия силы $P/2$.

3. Вершина наклонной трещины располагается на расстоянии 5,2 см от верхней сжатой грани на вертикали действия силы $P/2$. При этом высота сжатой зоны над вершиной наклонной трещины x и над вершиной вертикальной трещины x_0 определяется из эксперимента, а также по приведенным выше формулам (1) и (2) [1, 2]:

$$x = h_0 \cdot \sqrt{\mu \cdot n},$$

где $n = E_s/E_b$; μ – коэффициент армирования стальной арматурой; h_0 – рабочая высота сечения; E_s и E_b – модули упругости стальной арматуры и бетона; $x_0 = 1,5 \cdot x$.

Таким образом, $x = 5,2$ см; $x_0 = 7,8$ см.

4. Одна из вертикальных (нормальных) трещин располагается на линии действия силы $P/2$. Ее протяженность по направлению снизу вверх принимается равной $30 - 7,8 = 22,2$ см.

5. Следующие две вертикальные (нормальные) трещины располагаются в направлении центра модели с шагом 15,5 см, при этом третья вертикальная трещина совпадает с осью симметрии модели.

Для железобетонной модели, в которой ПН АБК установлена в сжатой зоне (рис. 2), предложена методика следующего расчета.

Параметры расчетной конечно-элементной модели 2 принимаются по аналогии с

расчетной конечно-элементной моделью 1, в которой ПН АБК установлена в растянутой зоне. Отличие заключается в назначении величин сжатой зоны x и x_0 , которые определяются по формулам (1) и (2) [2]. При этом отношение высоты сжатой зоны над вертикальной (нормальной) трещиной x_0 к высоте сжатой зоны над вершиной наклонной трещины x определяется по зависимости $x_0 = 1,85 \cdot x$.

Таким образом, $x = 5,2$ см; $x_0 = 9,6$ см.

Протяженность вертикальной (нормальной) трещины под силой $P/2$ по направлению снизу вверх принимается равной $30 - 9,6 = 20,4$ см.

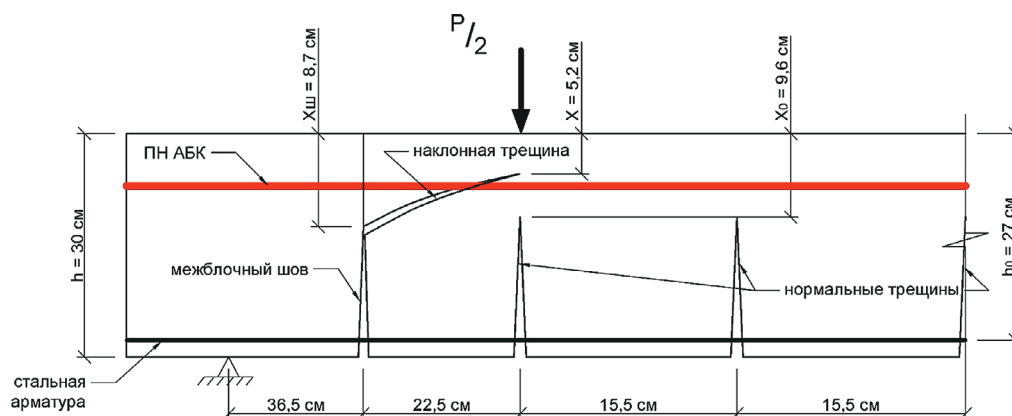


Рис. 2. Геометрия расчетной модели 2, в которой ПН АБК расположена в сжатой зоне
Fig. 2. Geometry of the calculation model 2, in which PN ABK is located in a compressed zone

Далее приводятся примеры расчета железобетонных моделей в соответствии с разработанной методикой.

Результаты и обсуждение. Результаты расчета железобетонной экспериментальной модели 1, в которой ПН АБК расположена в растянутой зоне. На рисунке 3 представлена структурная модель 1 железобетонной экспериментальной модели с ПН АБК в растянутой зоне, на основе которой разработан расчетная конечно-элементная модель 1.

Воспроизведенные в расчетной модели 1 вертикальный межблочный шов и трещины предусматривают раскрытие с трением по бортам, соответствующим коэффициенту трения $\text{tg}\varphi = 0,7$.

Основные размеры расчетной модели 1 железобетонной экспериментальной модели, в которой ПН АБК расположена в растянутой зоне, представлены на рисунке 1.

Величина нагрузки в виде сосредоточенной силы принималась из эксперимента и равна $P = 93,6$ кН. В силу симметрии к расчетной модели 1 прикладывается нагрузка $P/2$, равная 46,8 кН.

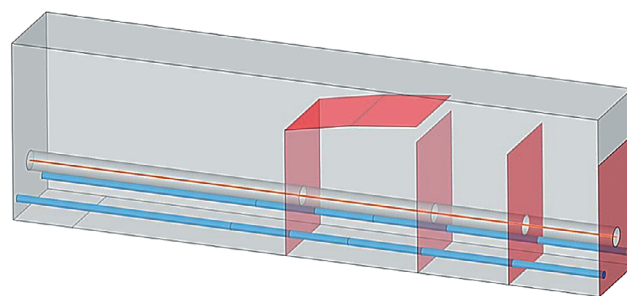


Рис. 3. Структурная модель 1 железобетонной экспериментальной модели с ПН АБК в растянутой зоне:
синим цветом обозначена растянутая стальная арматура 2Ø12 мм;
красным цветом – вертикальный межблочный шов, вертикальные и наклонная трещины;
оранжевым цветом – ПН АБК 1Ø12 мм в растянутой зоне

Fig. 3. Structural model 1 of reinforced concrete experimental model with PN ABK in a stretched zone:
stretched steel reinforcement 2Ø12 mm is indicated in blue;
red – vertical interblock seam, vertical and inclined cracks;
orange – PN ABK 1Ø12 mm in the stretched zone

В таблице 1 приведены физико-механические характеристики материалов расчетной модели 1.

Максимальный прогиб в центре расчетной модели 1 составил 3,78 мм.

Максимальное сжатие в бетоне сжатой зоны на верхней грани модели 1 – 20,85 МПа.

Полученные расчетом значения растягивающих напряжений в АБК не превышают предельного значения, равного 800 МПа [10].

На рисунках 4-6 представлены основные результаты расчетов на основе конечно-элементной модели 1 в соответствии с разработанной методикой.

Физико-механические параметры материалов расчетной модели 1

Таблица 1

Table 1

Physical – mechanical parameters of calculation model 1

Материал <i>Material</i>	Модуль деформации E, МПа <i>Modulus of deformation E, MPa</i>	Коэффициент Пуассона ν <i>Poisson's ratio ν</i>	Плотность ρ , кг/м ³ <i>Density ρ, kg/m³</i>	Коэффициент трения, tg ϕ <i>Friction coefficient, tgϕ</i>
АБК / <i>ABK</i>	50000	0,3	1900	-
Стальная арматура / <i>Steel reinforcement</i>	210000	0,3	7780	-
Бетон В30 / <i>Concrete V30</i>	30000	0,2	2400	-
Цементация отверстий по длине модели после предварительного напряжения АБК <i>Cementation of holes along the length of the model after ABK pre-stressing</i>	40000	0,2	2400	-
Контакты по длине трещин и межблочных швов <i>Contacts along the length of cracks and inter-block seams</i>				0,7

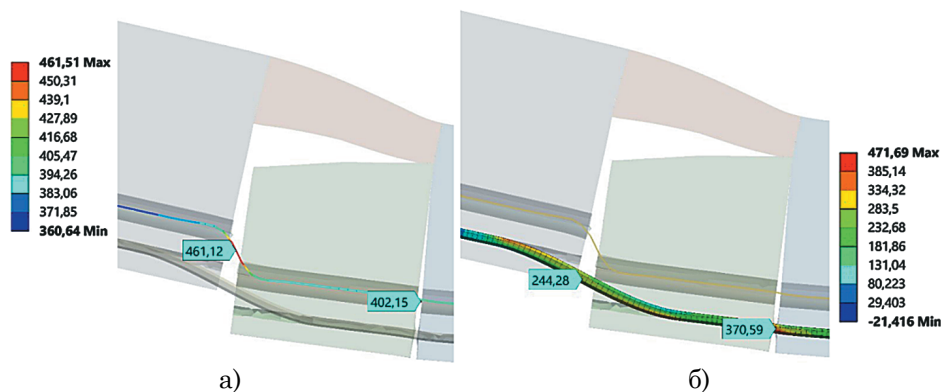


Рис. 4. Растягивающие напряжения в ПН АБК (а) и в стальной арматуре (б) расчетной модели 1 (МПа) на фоне деформированного состояния (масштаб – 1:50)

Fig. 4. Tensile stresses in PN ABK and in steel reinforcement (b) of calculation model 1 (MPa) against the background of the deformed state (scale 1:50)

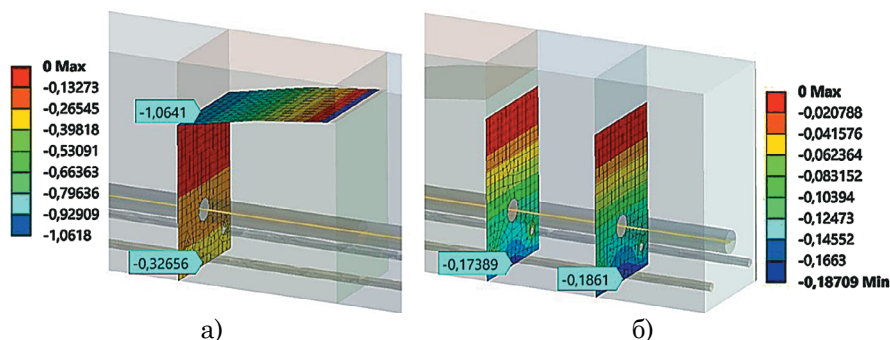


Рис. 5. Ширина раскрытия вертикального межблочного шва и наклонной трещины (а), вертикальных трещин (б) в расчетной модели 1, мм

Fig. 5. The width of the opening of the vertical interblock seam and inclined crack (a), vertical cracks (b) in the calculation model 1, mm

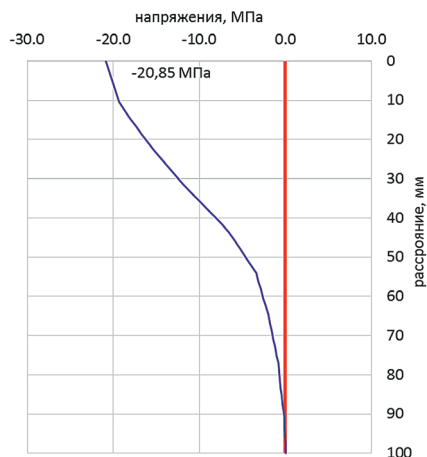


Рис. 6. Эпюра напряжений в бетоне сжатой зоны расчетной модели 1 над вертикальной трещиной, МПа

Fig. 6. The diagram of stresses in concrete of the compressed zone of the calculation model 1 above the vertical crack, MPa

Результаты расчёта железобетонной экспериментальной модели 2, в которой ПН АБК расположена в сжатой зоне.

На рисунке 7 представлена структурная модель 2 железобетонной экспериментальной модели с ПН АБК в сжатой зоне, на основе которой разработана расчетная конечно-элементная модель 2.

Воспроизведенные в расчетной модели 2 вертикальный межблочный шов и трещины предусматривают раскрытие с трением по бортам, соответствующим коэффициенту трения $\text{tg}\varphi = 0,7$.

Основные размеры расчетной модели 2 железобетонной экспериментальной модели, в которой ПН АБК расположена в сжатой зоне, представлены на рисунке 2.

Величина нагрузки в виде сосредоточенной силы принималась из эксперимента и равна $P = 83,2$ кН. В силу симметрии к расчетной модели 2 прикладывается нагрузка $P/2$, равная 41,6 кН.

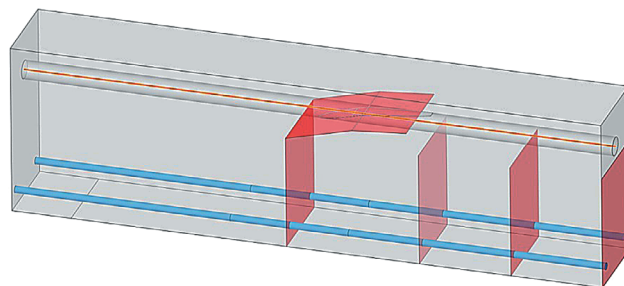


Рис. 7. Структурная модель 2 железобетонной экспериментальной модели с ПН АБК в сжатой зоне: синим цветом обозначена растянутая стальная арматура 2Ø12 мм;

красным цветом – вертикальный межблочный шов, вертикальные и наклонная трещины; оранжевым цветом – ПН АБК 1Ø12 мм в сжатой зоне

Fig.7. Structural model 2 of reinforced concrete experimental model with PN ABK in the compressed zone:

stretched steel reinforcement 2Ø12 mm is indicated in blue;

red color – vertical interblock seam, vertical and inclined cracks;

orange – PN ABK 1Ø12 mm in compressed zone

В таблице 2 приведены физико-механические характеристики материалов расчетной модели 2.

Таблица 2

Физико-механические параметры материалов расчетной модели 2

Table 2

Physical – mechanical parameters of calculation model 1

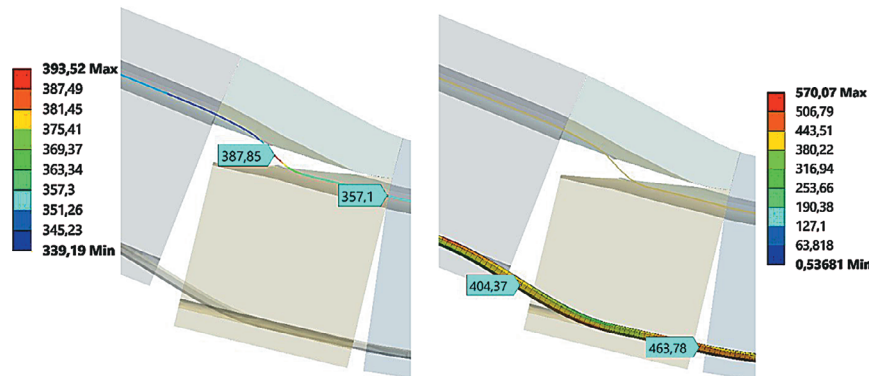
Материал <i>Material</i>	Модуль деформации E, МПа <i>Modulus of deformation E, MPa</i>	Коэффициент Пуассона ν <i>Poisson's ratio ν</i>	Плотность ρ , кг/м ³ <i>Density ρ, kg/m³</i>	Коэффициент трения, $\text{tg}\varphi$ <i>Friction coefficient, $\text{tg}\varphi$</i>
АБК / ABK	50000	0,3	1900	-
Стальная арматура / Steel reinforcement	210000	0,3	7780	-
Бетон В30 / Concrete V30	30000	0,2	2400	-
Цементация отверстий по длине модели после предварительного напряжения АБК <i>Cementation of holes along the length of the model after ABK pre-stressing</i>	40000	0,2	2400	-
Контакты по длине трещин и межблочных швов <i>Contacts along the length of cracks and inter-block seams</i>				0,7

Максимальный прогиб в центре расчетной модели 2 составил 5,72 мм.

Максимальное сжатие в бетоне сжатой зоны на верхней грани модели 2 – 20,68 МПа.

Полученные расчетом значения растягивающих напряжений в АБК не превышают предельного значения, равного 800 МПа [10].

На рисунках 8-10 представлены основные результаты расчетов на основе конечно-элементной модели 2 в соответствии с разработанной методикой.

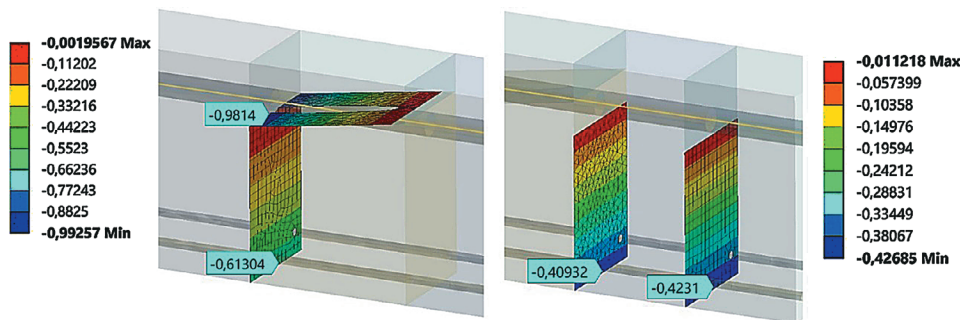


а)

б)

Рис. 8. Растягивающие напряжения в ПН АБК (а) и в стальной арматуре (б) расчетной модели 2, МПа на фоне деформированного состояния (масштаб – 1:50)

Fig. 8. Tensile stresses in PN ABK (a) and in steel reinforcement (b) of calculation model 2, MPa against the background of the deformed state (scale 1:50)



а)

б)

Рис. 9. Ширина раскрытия вертикального межблочного шва и наклонной трещины (а), вертикальных трещин (б) в расчетной модели 2, мм

Fig. 9. The width of opening of the vertical interblock seam and inclined crack (a), vertical cracks (b) in the calculation model 2, mm

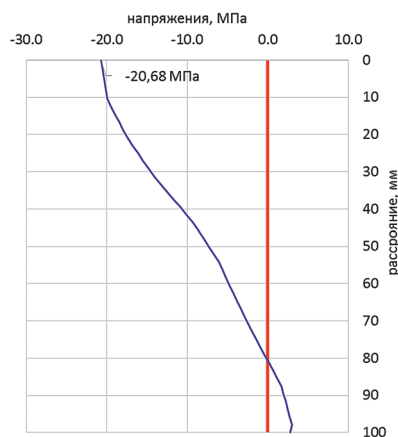


Рис. 10. Эпюра напряжений в бетоне сжатой зоны расчетной модели 2, МПа

Fig. 10. Diagram of stresses in concrete of the compressed zone of calculation model 2, MPa

Результаты расчетов на основе расчетных конечно-элементных моделей 1 и 2 показали хорошее согласование с экспериментальными данными.

Выводы

На основе анализа полученных результатов расчетов можно сделать следующие выводы.

1. Сопоставление горизонтальных напряжений в бетоне сжатой зоны моделей 1 и 2 показывает, что над вершиной нормальной трещины под силой $P/2$ сформировались практически треугольные эпюры сжимающих напряжений с наибольшими значениями в пределах 20...21 МПа на сжатой грани балок. Высота эпюр сжимающих напряжений по вертикали составляет порядка 80-90 мм.

Следует отметить, что большие напряжения сжатия в бетоне получены для модели 2.

2. Растягивающие напряжения в ПН АБК составили:

– в вертикальном межблочном шве в модели 1 – 461,12 МПа (360 + 101,12 МПа), которые выше, чем в модели 2, – 387,85 МПа (360 + 27,85 МПа), с учетом того, что в модели 1 ПН АБК расположена в растянутой зоне, а в модели 2 – в сжатой зоне.

– аналогичная картина отмечается в сечениях с нормальными трещинами: под силой $P/2$ в модели 1 – 402,15 МПа (360 + 42,15 МПа); в модели 2 – 357,10 МПа (360-2,90 МПа) соответственно.

Полученные расчетом значения растягивающих напряжений в АБК не превышают предельного значения, равного 800 МПа.

3. Растягивающие напряжения в стальной арматуре составили:

– в вертикальном межблочном шве в модели 1 (244,28 МПа) – значительно меньше, чем в модели 2 (404,37 МПа), с учетом того, что в растянутой зоне модели 1 стальная арматура работает совместно с ПН АБК, а в растянутой зоне модели 2 работает только стальная арматура;

– аналогичная картина отмечается в сечениях с нормальными трещинами под силой $P/2$ в модели 1 – 370,59 МПа; в модели 2 – 463,78 МПа соответственно.

Полученные расчетом значения напряжений в стальной арматуре не превосходят экспериментальных значений напряжений, соответствующих пределу текучести и равных 477 МПа (для арматуры $\varnothing 12$ – А-III).

4. Ширина раскрытия вертикального межблочного шва и наклонной трещины, образовавшейся из шва в направлении действия силы $P/2$, составила:

– ширина раскрытия вертикального межблочного шва в модели 1 (0,327 мм) меньше, чем в модели 2 (0,613 мм), объясняется

более высокими напряжениями в стальной арматуре в вертикальном шве в модели 2 (см. п. 3);

– ширина раскрытия вторичной наклонной трещины при разрушении модели 1 и модели 2 практически одинакова и находится в пределах 1 мм.

5. Ширина раскрытия нормальных трещин составила:

– трещина под силой $P/2$ в модели 1 и в модели 2-0,174 мм и 0,409 мм соответственно.

Различие ширины раскрытия нормальных трещин (в модели 1 меньше, чем в модели 2) имеет ту же причину, что в п. 4 (ввиду более высоких напряжений в стальной арматуре в трещине в модели 2).

6. Достоверность разработанной методики подтверждается хорошим согласованием результатов расчетов с экспериментальными данными.

7. Из результатов анализа проведенных экспериментально-расчетных исследований следует, что более предпочтительным вариантом усиления эксплуатируемых конструкций гидротехнических сооружений является размещение предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуры (ПН АБК) в растянутой зоне конструкции. Вместе с тем в случаях, когда не представляется возможным это реализовать в условиях постоянной эксплуатации, возможно размещение ПН АБК в сжатой зоне сооружений и конструкций при более системном подходе контроля по первой и второй группам предельных состояний, а также при проведении постоянных натуральных наблюдений.

8. Предложенная методика моделирования и расчета железобетонных конструкций эксплуатируемых ГТС, усиленных ПН АБК, верифицирована с использованием данных экспериментальных исследований моделей и рекомендуется проектным и эксплуатационным организациям для обеспечения безопасности ГТС и продления срока их службы.

Библиографический список

1. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Прочность малоармированных железобетонных конструкций с межблочными строительными швами, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Природобустройство. – 2021. – № 1. – С. 53-62.

2. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования по определению напряженно-деформированного состояния и внутренних усилий в железобетонных конструкциях, усиленных

References

1. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Prochnost' maloarmirovannykh zhelezobetonnykh konstruksiy s mezhblochnymi stroitelnyimi shvami, usilennykh predvaritelno napryazhennoy bazaltokompozitnoy armaturoy // Prirodoobustroystvo. – 2021. – № 1. – S. 53-62.

2. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Eksperimentalnye issledovaniya po opredeleniyu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i vnutrennikh usilii v zhelezobetonnykh konstruksiyakh, usilennykh

предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Строительная механика инженерных сооружений и конструкций. – 2021. – № 3. – С. 62-69.

3. **Saeed Moaveni.** Finite element analysis theory and application with ANSYS // Pearson Prentice Hall. – 2008. – Pp. 868.

4. **Рубин О.Д., Камнев Н.М., Лисичкин С.Е.** Расчет прочности фрагмента турбинного блока со спиральной камерой здания ГЭС гидроузла Аль Вахда // Гидротехническое строительство. – 1995. – № 12. – С. 38-42.

5. **Рубин О.Д.** Расчетная оценка напряженно-деформированного состояния левого блока здания Плявинской ГЭС с учетом данных натурных наблюдений / О.Д. Рубин С.Е. Лисичкин, И.Э. Шакарс, С.П. Новиков // Гидротехническое строительство. – 1998. – № 2. – С. 47-53.

6. **Лисичкин С.Е.** Расчетное обоснование безопасной эксплуатации подкрановой эстакады и агрегатного блока машзала ГЭС Тери, (Индия) / С.Е. Лисичкин, О.Д. Рубин, А.К. Финк, В.М. Горбунов // Безопасность энергетических сооружений. – Вып. 4. – М.: АО НИИЭС, 1999. – С. 52-61.

7. **Рубин О.Д.** Исследования бетонных и железобетонных энергетических сооружений / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, О.Б. Ляпин, А.В. Нефедов // Гидротехническое строительство. – 1999. – № 8/9. – С. 22-28.

8. **Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Гребенщиков В.П.** Расчетное обоснование решений по обеспечению надежности конструкций водосброса № 2 бетонной плотины Богучанской ГЭС // Известия ВНИИГ. – 2005. – Т. 244. – С. 227-233.

9. **Рубин О.Д., Ильин Ю.А., Лисичкин С.Е.** Оценка напряженно-деформированного состояния и прочности железобетонных конструкций компенсационных секций напорных водоводов Загорской ГАЭС // Гидротехническое строительство. – 2001. – № 9. – С. 16-19.

10. СП 295.1325800. 2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2017. – 55 с.

Критерии авторства

Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Баклыков И.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 05.08.2021 г.

Одобрена после рецензирования 18.10.2021 г.

Принята к публикации 01.11.2021 г.

predvaritelno napryazhennoy bazaltokompozitnoy armaturoy // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh sooruzheniy i konstruktsiy. – 2021. – № 3. – S. 62-69.

3. **Saeed Moaveni.** Finite element analysis theory and application with ANSYS // Pearson Prentice Hall. – 2008. – 868 p.

4. **Rubin O.D., Kamnev N.M., Lisichkin S.E.** Raschet prochnosti fragmenta turbinnogo bloka so spiralnoy kameroy zdaniya GES gidrouzla Al Vakhda // Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. – 1995. – № 12. – S. 38-42.

5. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Shakars I.E., Novikov S.P.** Raschetnaya otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya levogo bloka zdaniya Plyavinskoy GES s uchetom dannykh naturnykh nablyudeniy // Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. – 1998. – № 2. – S. 47-53.

6. **Lisichkin S.E., Rubin O.D., Fink A.K., Gorbunov V.M.** Raschetnoye obosnovaniye bezopasnoy ekspluatatsii podkranovoy estakady i agregatnogo bloka mashzala GES Teri, (Indiya) // Sb. Bezopasnost' energeticheskikh sooruzheniy. Vyp. 4. – M.: AO NIIES, 1999. – S. 52-61.

7. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Lyapin O.B., Nefedov A.V.** Issledovaniya betonnykh i zhelezobetonnykh energeticheskikh sooruzheniy // Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. – 1999. – № 8/9. – S. 22-28.

8. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Grebenshchikov V.P.** Raschetnoye obosnovaniye resheniy po obespecheniyu nadozhnosti konstruktsiy vodosbrosa № 2 betonnoy plotiny Boguchanskoy GES // Izvestiya VNIIG. – 2005. – T. 244. – S. 227-233.

9. **Rubin O.D., Iljin Yu.A., Lisichkin S.E.** Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i prochnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy kompensatsionnykh sektsiy napornykh vodovodov Zagorskoy GAES // Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. – 2001. – № 9. – S. 16-19

10. SP 295.1325800. 2017. Konstruktsii betonnyye, armirovannyye polimernoy kompozitnoy armaturoy. Pravila proyektirovaniya. – M.: Standartinform. – 2017. – 55 s.

Criteria of authorship:

Bellendir E.N., Rubin O.D., Lisichkin S.E., Baklykov I.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 05.08.2021

Approved after reviewing 18.10.2021

Accepted for publication 01.11.2021