

УДК 624.196

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ СБОРНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБДЕЛКИ НАПОРНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ

Д-р техн. наук А. И. Вайнберг (ЧАО «Укргідропроєкт»)

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ ЗБІРНОГО ЗАЛІЗОБЕТОННОГО ОБЛИЦЮВАННЯ НАПІРНОГО ГІДРОТЕХНІЧНОГО ТУНЕЛЮ

Д-р техн. наук О. І. Вайнберг (ПАТ «Укргідропроєкт»)

METHOD FOR CALCULATING REINFABRICATED REINFORCED CONCRETE LINING OF A PRESSURE HYDRAULIC TUNNEL

Dr. sc. science O. I. Vaynberg

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.178.2018.139465>

Предложена методика расчетов сборной железобетонной обделки напорного гидротехнического туннеля. Разработаны расчетные схемы, которые следует использовать при определении напряженно-деформированного состояния рассматриваемой обделки. Учитываются особенности работы обделки в строительный, эксплуатационный и ремонтный периоды. Выполнены расчеты по обоснованию конструкции сборной железобетонной обделки строящегося в настоящее время туннеля ГЭС Мтквари в Грузии.

Ключевые слова: напорный гидротехнический туннель, сборная железобетонная обделка, расчетные схемы, критерии механической и фильтрационной прочности.

Запропоновано методіку розрахунків збірної залізобетонної облицювання напірного гідротехнічного тунелю. Розроблено розрахункові схеми, які слід використовувати при визначенні напружено-деформованого стану розглянутого облицювання. Враховуються особливості роботи облицювання в будівельний, експлуатаційний і ремонтний періоди. Виконано розрахунки з обґрунтування конструкції збірної залізобетонної облицювання тунелю ГЕС Мткварі в Грузії, що будується у цей час.

Ключові слова: напірний гідротехнічний тунель, збірне залізобетонне облицювання, розрахункові схеми, критерії механічної та фільтраційної міцності.

The analysis of structural features and operating conditions of the prefabricated reinforced concrete lining of a pressure hydraulic tunnel was carried out. The requirements to be met by the elements of the lining in question – tubing and anti-filtration seals in the longitudinal joints between the tubings are formulated. Features of determining loads and impacts on the tunnel lining in question during the construction, operational and repair periods are analyzed. Design diagrams that should be used to determine the stress-strain state of the lining in question during these periods are developed. A technique for calculating the stress-strain state of the system «lining – an array of rocks» is proposed. The criteria, which ensure the mechanical strength of the tubings and their joints, are formulated. The condition providing the design mode of operation of the anti-filtration elements in the longitudinal joints between the tubes is recorded. The results of calculations for justifying the design of prefabricated reinforced concrete lining of pressure derivation tunnel of Mtkvari HPP in Georgia, under construction at the moment, are presented.

Key words: *pressure hydraulic tunnel, prefabricated reinforced concrete lining, design diagrams, criteria for mechanical and filtration strength.*

Введение. Напорные туннели находят широкое применение в гидротехническом строительстве. Они используются в качестве подводящих водоводов ГЭС и ГАЭС, закрытых водосбросов гидроузлов и в других случаях. Обычно принимается круглое поперечное сечение таких туннелей.

Традиционно в напорных гидротехнических туннелях устраиваются монолитные обделки: бетонные, железобетонные, сталежелезобетонные. Следует отметить, что основной нагрузкой на обделку напорного туннеля является внутреннее давление воды, которое включает статическое давление, давление гидравлического удара и пульсационное давление потока воды в туннеле. В действующих в Украине и в России нормах проектирования и в технической литературе подробно освещены вопросы расчетов и конструирования монолитных обделок напорных гидротехнических туннелей [1–7 и др.].

В настоящее время строительство туннелей осуществляется современными туннелепроходческими комплексами, которые имеют высокую производительность, что позволяет проходить туннельную выработку со скоростью до 60 м в сутки и более. При этом обычно используются сборные железобетонные обделки, которые чаще всего применяются при строительстве транспортных туннелей. Основные особенности сборных железобетонных обделок туннелей связаны с использованием специальных сборных железобетонных элементов – тюбингов. Конструкции тюбингов должны обеспечивать достаточную точность их монтажа, а также возможность устройства противифльтрационных уплотнений, которые должны обеспечить водонепроницаемость обделки. Следует

отметить, что современные туннелепроходческие комплексы позволяют полностью механизировать все работы, связанные с устройством туннеля, в том числе: проходку выработки, монтаж сборных железобетонных элементов обделки (тюбингов), заполнение затюбингового пространства и др.

При устройстве монолитных обделок, которые обычно применяются в напорных гидротехнических туннелях, приходится снижать скорость проходки туннеля с тем, чтобы бетон обделки мог набрать требуемую прочность для восприятия нагрузок строительного периода, в частности, горного давления. Имеются также некоторые другие технологические трудности, которые приходится преодолевать при строительстве монолитных обделок туннелей.

Для сокращения сроков строительства напорных гидротехнических туннелей, которые выполняют в достаточно прочных горных породах, в ряде случаев целесообразно использовать сборные железобетонные обделки, что обеспечивает высокую скорость их устройства. В последние годы такие обделки все чаще применяются при строительстве напорных гидротехнических туннелей. Примером может служить сборная железобетонная обделка подводящего напорного туннеля ГЭС Gibe II в Эфиопии. Этот туннель имеет внутренний диаметр 6.3 м и длину 25.8 км [8].

При обосновании типа обделки напорного туннеля необходимо учитывать следующие отличия в работе монолитных и сборных обделок на внутреннее давление воды. При устройстве монолитных обделок внутреннее давление воды частично воспринимается самой обделкой, а частично передается на массив горных пород. В нормах проектирования гидротехнических туннелей подробно

изложена методика расчетов таких обделок напорных гидротехнических туннелей [3 – 5]. Главной особенностью условий работы сборной железобетонной обделки является то, что внутреннее давление воды передается тубингами на поверхность выработки и полностью воспринимается массивом горных пород.

В нормах проектирования указывается, что применение сборных железобетонных обделок напорных туннелей требует обоснования. Однако в этих нормах не приведена методика и критерии, которые должны использоваться при выполнении такого обоснования. Анализ имеющейся технической литературы показал, что до настоящего времени отсутствуют общепринятые подходы к выполнению расчетов при проектировании сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей. Целью настоящей работы является разработка методики выполнения таких расчетов.

Необходимость разработки такой методики связана с проектированием в ЧАО «Укргидропроект» строящейся в настоящее время ГЭС Мктвари в Грузии. ГЭС установленной мощностью 46.4 МВт расположена на реке Мктвари (Куре). В состав этой ГЭС входит напорный деривационный туннель со сборной железобетонной обделкой. Длина туннеля 9.6 км, внутренний диаметр 5.26 м, толщина обделки 0.25 м, уклон туннеля 0.5 ‰. Для проходки туннеля применяется высокопроизводительный туннелепроходческий комплекс Double Shield Hard Rock ТВМ роторного типа диаметром 6.00 м производства Германии.

Особенности конструкций и условий работы сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей. Рассмотрим сначала особенности конструкций и монтажа сборных обделок туннеля.

Кольцо сборной железобетонной обделки туннеля обычно состоит из шести

тубингов: донный тубинг, 4 боковых, верхний тубинг. На рис. 1 показана конструкция сборной железобетонной обделки туннеля ГЭС Мктвари. Размер кольца вдоль туннеля составляет 1.5 м. Опираение тубингов друг на друга осуществляется по опорным площадкам. Размеры таких площадок обычно меньше размеров поперечного сечения тубинга. Для обделки туннеля ГЭС Мктвари ширина площадки равна 0.15 м при толщине тубинга 0.25 м, длина площадки вдоль туннеля равна 1.3 м при длине тубинга 1.5 м.

Эта конструкция является типичной для такого типа обделок. Отличаться могут размеры тубингов в зависимости от диаметра туннеля, инженерно-геологических условий по его трассе и других факторов.

Каждый тубинг на торцевых поверхностях в кольцевом и продольном направлениях имеет фиксаторы для обеспечения точности сборки. Во всех тубингах предусмотрены отверстия для нагнетания инъекционного раствора за обделку.

Предусматриваются конструктивные меры для предотвращения фильтрации воды из туннеля, если внутреннее давление в туннеле в эксплуатационный период превышает наружное давление грунтовых вод, а также для предотвращения фильтрации воды в туннель в строительный и ремонтный периоды. Для этого устраивается гидроизоляция продольных стыков между тубингами и поперечных вертикальных стыков между кольцами с помощью резиновых противофильтрационных элементов. Каждый такой элемент устанавливается в специальные пазы в торцах соседних тубингов со стороны туннельной выработки (рис. 2). При монтаже тубингов обычно осуществляется обжатие противофильтрационного уплотнения в кольцевом направлении с помощью болтов.

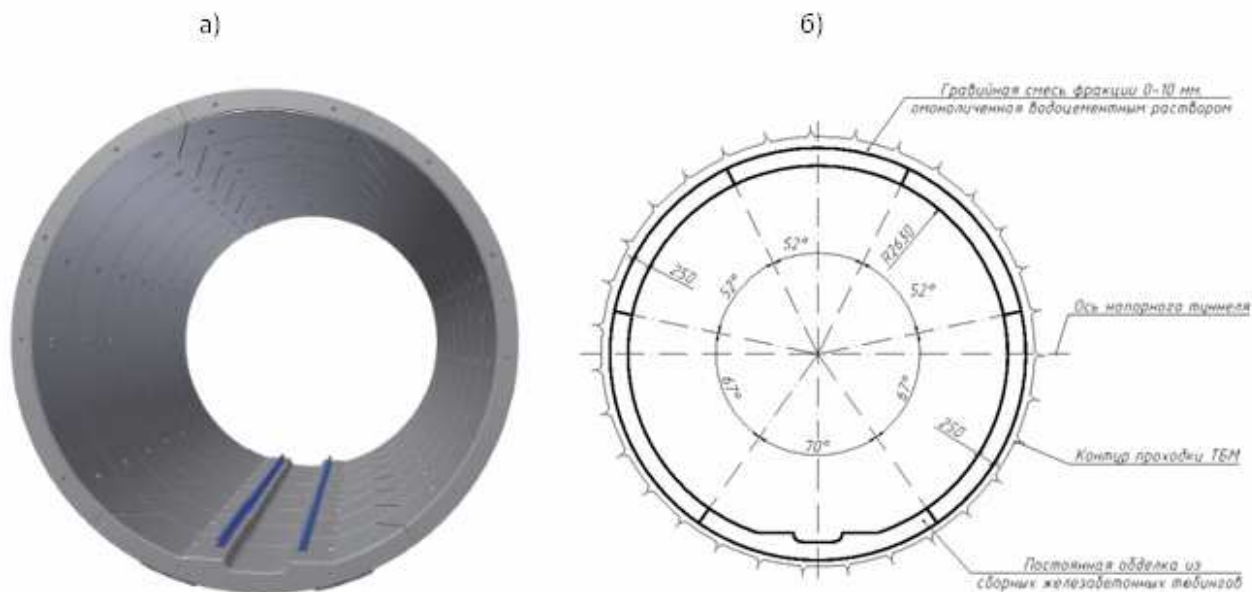


Рис. 1. Конструкция сборной железобетонной обделки напорного туннеля ГЭС Мтквари в Грузии
 а – перспективное изображение; б – типовое поперечное сечение

Для удобства монтажа наружный диаметр состоящего из тюбингов кольца принимается меньшим, чем диаметр контура выработки (рис. 1, б). Образующееся затюбинговое пространство заполняется

гравийной смесью с последующим омоноличиванием ее водцементным раствором на сульфатостойком цементе через отверстия, предусмотренные в тюбингах (образуется заполнительный бетон).

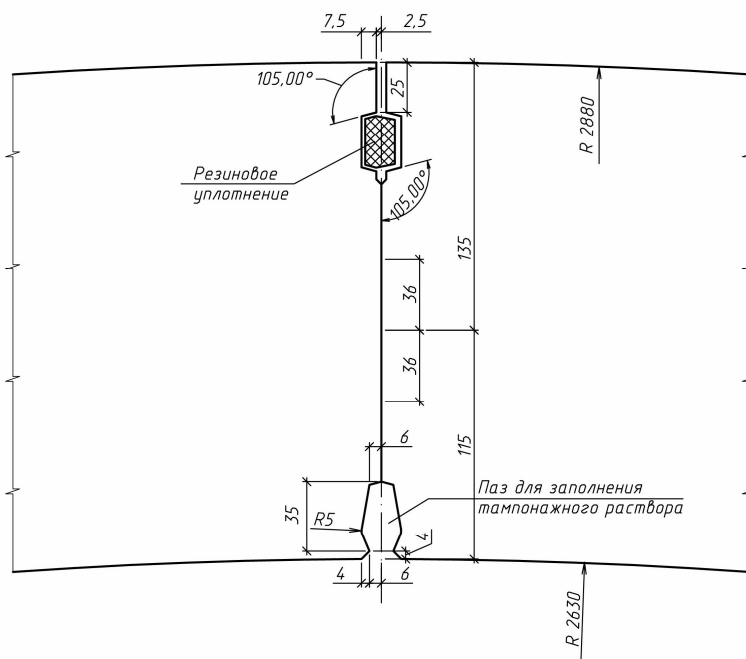


Рис. 2. Конструкция продольного контакта тюбингов

Водоцементный раствор нагнетается через отверстия для цементации последовательно снизу вверх по обе стороны от вертикальной оси туннеля под небольшим давлением, не превышающим 0.4 МПа.

После набора бетоном затюбингового пространства достаточной прочности (не менее 70 %) выполняется его уплотнительное инъецирование. Это необходимо для заполнения трещин в породах, вмещающих туннель, а также для заполнения трещин в слоях первичного нагнетания, возникающих в результате усадочных явлений цементного раствора и деформаций обделки. Уплотнительное инъецирование обычно производится под давлением до 1.0 МПа через скважины, которые заглубляются в массив горных пород на глубину до 0.5 м.

В торцах тюбингов с внутренней стороны туннеля предусматриваются пазы, которые после завершения работ заполняются тампонажным раствором.

Опираение тюбингов друг на друга осуществляется по опорным площадкам, ширина которых для обделки туннеля ГЭС Мтквари составляет 0.15 м, длина вдоль туннеля – 1.30 м (на 0.20 м меньше длины тюбинга).

Рассмотрим теперь особенности условий работы сборных обделок напорных туннелей в строительный, эксплуатационный и ремонтный периоды.

В строительный период на 1-м этапе до омоноличивания гравийной смеси в затюбиновом пространстве на сборную обделку туннеля в общем случае действуют нагрузки от собственного веса обделки, веса гравийной смеси, горного давления и сейсмических воздействий. На 2-м этапе строительного периода дополнительно будет действовать давление уплотнительной цементации, которое будет передаваться на обделку через бетонное кольцо, образованное после омоноличивания гравийной смеси. Для безопасного восприятия обделкой усилий, которые вызываются указанными выше

нагрузками, должна быть обеспечена прочность тюбингов и прочность стыков между ними.

В эксплуатационный период после заполнения туннеля водой наиболее опасными нагрузками на обделку туннеля являются следующие нагрузки: внутреннее статическое давление воды, давление гидравлического удара, пульсационное давление потока воды, сейсмическое давление воды. Под действием внутреннего давления воды швы между тюбингами могут раскрываться в кольцевом направлении. Получаемая ширина раскрытия не должна превышать допустимых значений по условию восприятия внутреннего давления воды резиновыми уплотнениями швов между тюбингами. Вследствие взаимодействия сборной обделки с массивом горных пород в сечениях тюбингов возникают изгибающие моменты, продольные и поперечные силы. Следует обеспечить прочность тюбингов под действием этих усилий.

В ремонтный период после опорожнения туннеля на обделку в общем случае действуют следующие нагрузки: собственный вес обделки, вес растрескавшегося бетонного кольца в затюбинговом пространстве, горное давление, внешнее давление подземных вод и сейсмические нагрузки. Эти нагрузки вызывают в сечениях обделки усилия, для безопасного восприятия которых должна быть обеспечена прочность тюбингов и прочность стыков между ними. При этом необходимо учитывать следующее обстоятельство. В эксплуатационный период под действием внутреннего давления воды возникают радиальные перемещения контура выработки, соответствующие упругим деформациям и деформациям ползучести массива горных пород. При опорожнении туннеля в ремонтный период контур выработки не возвращается в исходное положение. Это приводит к изменению статической схемы работы обделки туннеля.

Общие положения методики расчетов сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей. Приведенный анализ особенностей конструкций и условий работы сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей позволяет сделать следующий вывод. Для обоснования надежности и безопасности рассматриваемых обделок туннелей необходимо выполнять расчеты напряженно-деформированного состояния этих конструкций, расчеты механической прочности тубингов и стыков между ними, фильтрационной прочности противофильтрационных элементов в стыках между тубингами.

При выполнении этих расчетов в общем случае должны учитываться следующие нагрузки: собственный вес обделки, вес зацементированной гравийной смеси в затубинговом пространстве, горное давление, внутреннее давление воды в туннеле, включая статическое давление, давление гидравлического удара и пульсационное давление потока воды, давление подземных вод, сейсмические воздействия. Данные о давлении гидравлического удара и пульсационном давлении потока воды обычно предоставляет завод-поставщик турбинного оборудования ГЭС. Нормативные и расчетные значения остальных нагрузок и воздействий определяются в соответствии с требованиями норм проектирования [1–5, 12–14]. Согласно этим нормам нагрузки и воздействия на обделку туннеля должны приниматься в наиболее неблагоприятных, но возможных основных и особых сочетаниях.

Расчеты должны выполняться отдельно для строительного, эксплуатационного и ремонтного периодов.

При выполнении расчетов ввиду большой длины туннеля целесообразно ограничиться рассмотрением плоских задач.

Расчеты напряженно-деформированного состояния обделки для каждого расчетного периода следует выполнять в соответствии со своей, специально

разрабатываемой, расчетной схемой, моделирующей систему “обделка – массив горных пород”. При разработке расчетных схем необходимо учитывать характер взаимодействия обделки с массивом горных пород, а также деформационные характеристики материалов тубингов и окружающего массива горных пород, включая упругие характеристики и характеристики, описывающие ползучесть. Ввиду сложности расчетных схем и условий работы обделки расчеты ее напряженно-деформированного состояния целесообразно выполнять численным методом – методом конечных элементов с использованием компьютерных программ. Ниже на примере обделки туннеля ГЭС Мтквари с использованием программного комплекса «Лира 10.4» показаны подходы, которые следует применять при разработке расчетных и конечно-элементных схем сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей. Приведены примеры расчетов напряженно-деформированного состояния обделки с использованием этих схем.

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния обделки являются исходными данными для выполнения расчетов механической прочности тубингов и стыков между ними, а также фильтрационной прочности противофильтрационных элементов в стыках между тубингами. Методика этих расчетов и критерии прочности конструктивных элементов должны учитывать требования действующих норм проектирования [3–5, 9–11], а также особенности конструкции и условий работы сборной обделки в расчетные периоды. Основные положения такой методики и критерии прочности конструктивных элементов обделки приведены ниже.

Расчетная схема для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния обделки в строительный период. Принимается расчетная схема в виде плоского криволинейного замкнутого

стержня на упругом основании, очерченного по круговой оси тубинговой обделки туннеля. Стержень аппроксимируется плоскими стержневыми конечными элементами. В местах стыков тубингов предусмотрены стыковочные стержневые элементы, моделирующие опорные площадки. Для связи с основанием используются расположенные радиально абсолютно жесткие стержневые конечные элементы, имеющие длину, равную половине толщины обделки. Основание моделируется одноузловыми конечными элементами односторонней упругой связи в радиальном направлении нормально к контуру выработки. Считается, что эти элементы основания работают только на сжатие. Их жесткость определяется с учетом коэффициента удельного отпора в соответствии с нормами проектирования [3–5]. Тангенциальный к контуру выработки упругий отпор не учитывается.

Считается, что моделирующий обделку стержень загружен следующими нагрузками: собственный вес тубингов, вес бетона затубингового пространства, горное давление, давление цементации, сейсмические воздействия. Внешние нагрузки передаются в узлы стержня с помощью специальных плоских стержневых элементов нулевой жесткости. Такие элементы располагаются между узлами абсолютно жестких элементов по внешнему контуру обделки.

Конечно-элементная расчетная схема обделки (с учетом симметрии относительно вертикальной оси сечения туннеля и нагрузок) для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в строительный период показана на рис. 3, а. На рис. 3, б показан фрагмент конечно-элементной расчетной схемы в зоне стыка верхнего и бокового тубингов.

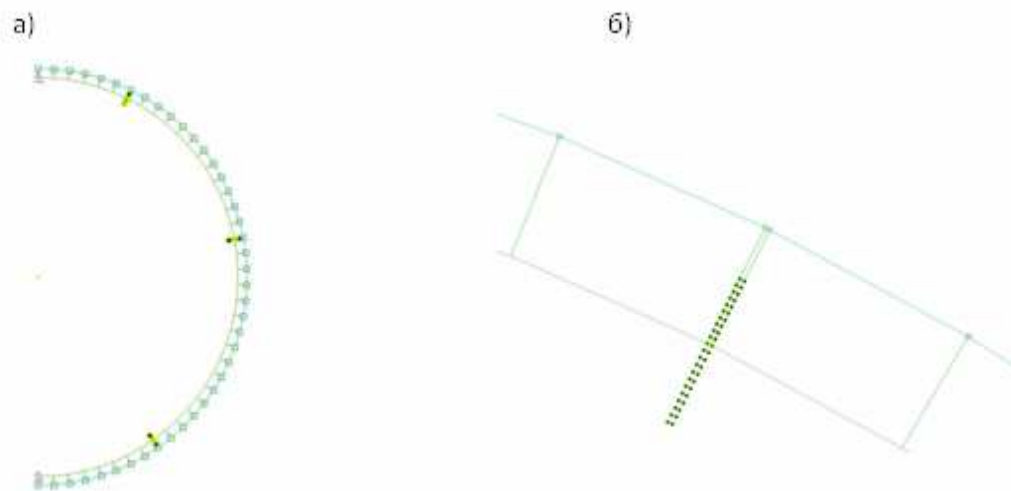


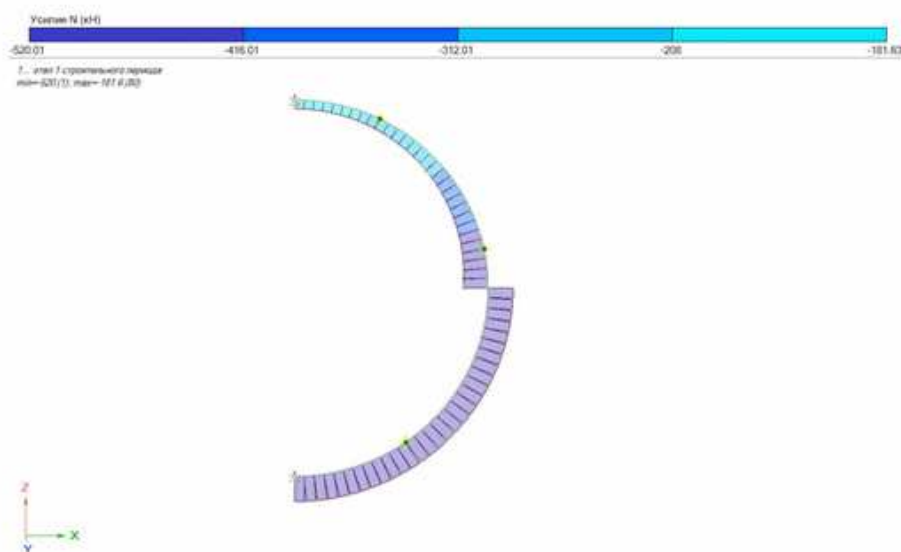
Рис. 3. Конечно-элементная расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в строительный период:

- а – конечно-элементная схема с учетом симметрии относительно вертикальной оси туннеля;
б – фрагмент конечно-элементной расчетной схемы в зоне стыка верхнего и бокового тубингов

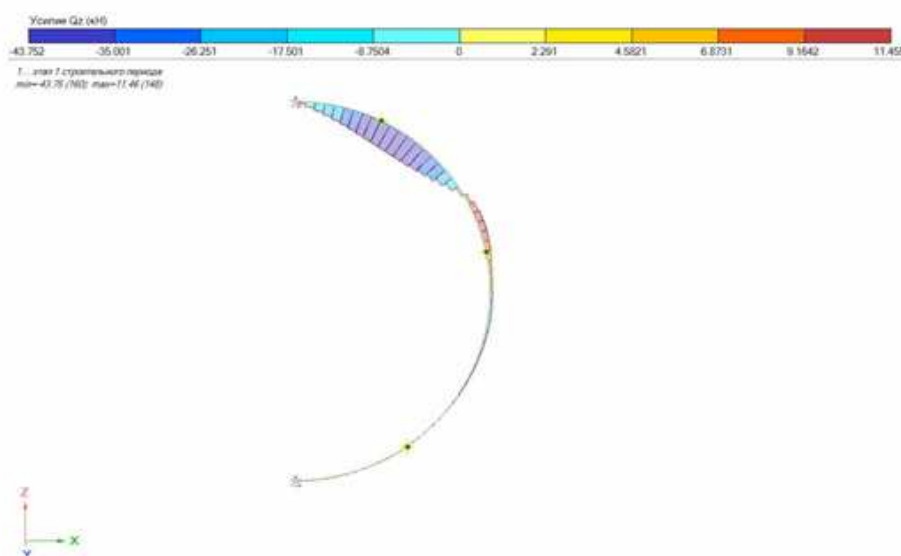
На рис. 4 для примера приведены результаты расчетов по определению усилий в сечениях тубингов обделки ГЭС Мтквари в строительный период. Показаны эпюры продольных сил, поперечных сил,

изгибающих моментов для расчетного случая при основном сочетании следующих нагрузок: собственный вес тубингов, вес бетона затубингового пространства, горное давление.

а)



б)



в)

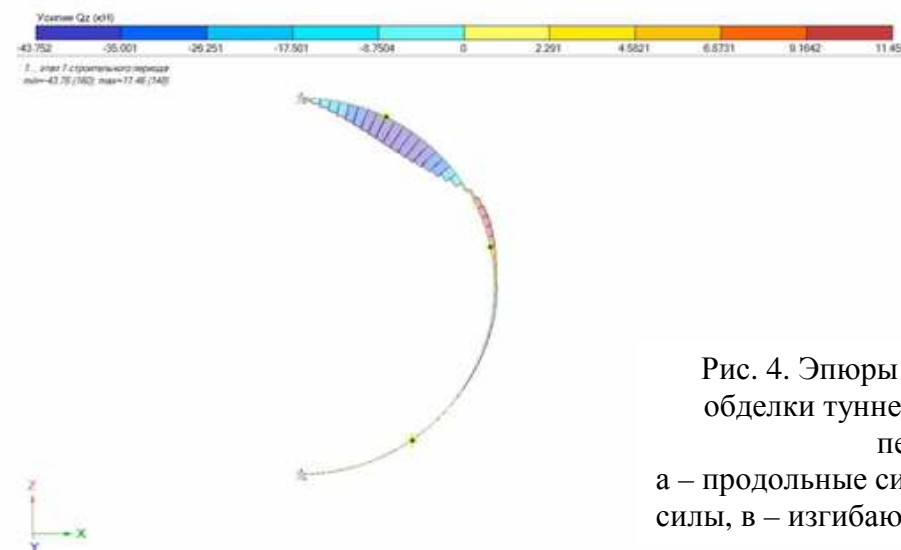


Рис. 4. Эпюры усилий в сечениях обделки туннеля в строительный период:
а – продольные силы; б – поперечные силы, в – изгибающие моменты

Расчетная схема для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния обделки в эксплуатационный период. При выполнении этих расчетов рассматривается расчетная область достаточно больших размеров с тем, чтобы исключить влияние граничных условий на напряжения в обделке. Ввиду симметрии туннеля и нагрузок относительно верти-

кальной оси в расчетную область достаточно включить половину туннеля с прилегающим массивом горных пород. На рис. 5 представлена конечно-элементная расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в эксплуатационный период.

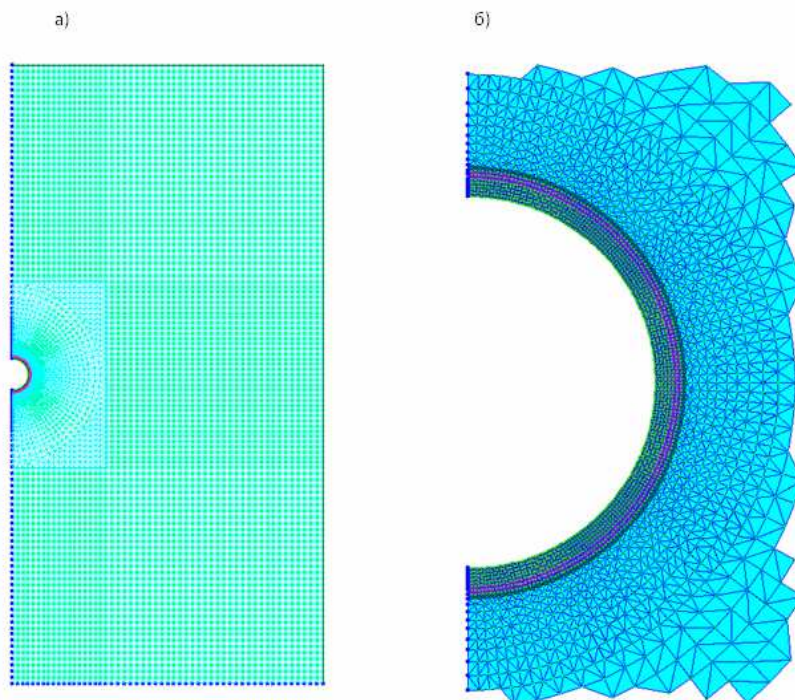


Рис. 5. Конечно-элементная расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в эксплуатационный период: а – конечно-элементная схема с учетом симметрии относительно вертикальной оси туннеля; б – фрагмент конечно-элементной расчетной схемы вблизи обделки туннеля

Для определения напряженно-деформированного состояния в пределах расчетной области решается плоская упругопластическая задача для системы «обделка – массив горных пород». Массив горных пород рассматривается как упругопластический материал в соответствии с моделью Мора-Кулона. Железобетон обделки рассматривается как упругий материал. Учитывается наличие швов между тубингами. Бетон

затюбингового пространства считается упругопластическим материалом.

Принята такая последовательность расчетов.

Сначала определяется естественное напряженное состояние массива горных пород до проходки туннеля под действием собственного веса грунтов.

Далее определяется изменение напряженно-деформированного состояния

массива горных пород вследствие проходки туннеля.

Затем в пределах выработки устанавливается тубинговая обделка и укладывается бетон затубингового пространства, что обеспечивает связь между обделкой и массивом горных пород.

После этого для рассматриваемых эксплуатационных расчетных случаев определяется напряженно-деформированное состояние системы «обделка – массив горных пород» под действием внутреннего давления воды, включая статическое давление, давление гидравлического удара, пульсационное давление потока воды, сейсмическое давление воды.

В результате расчетов определяется напряженно-деформированное состояние системы «обделка – массив горных пород», включая значения ширины раскрытия межтубинговых швов в кольцевом

направлении и значения напряжений в сечениях тубингов. По полученным значениям напряжений численным интегрированием определяются усилия в сечениях тубингов – изгибающие моменты, продольные и поперечные силы. Эти усилия используются в дальнейшем для выполнения расчетов прочности тубингов.

На рис. 6 для примера приведены результаты расчетов по определению напряжений в сечениях тубингов обделки ГЭС Мтквари в эксплуатационный период. Показаны изополя радиальных, кольцевых и касательных напряжений в сечениях тубингов для расчетного случая при основном сочетании следующих нагрузок: внутреннее статическое давление воды при нормальном подпорном уровне в водохранилище, давление гидравлического удара и пульсационное давление потока воды при нормальной эксплуатации ГЭС.

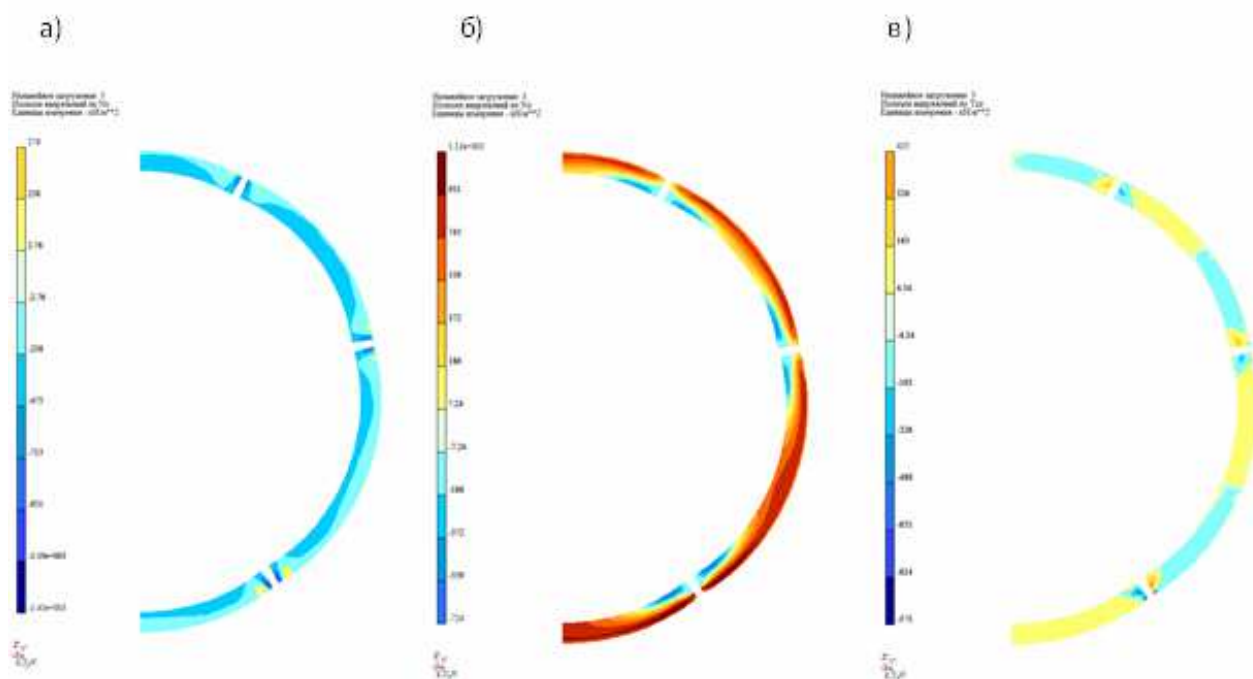


Рис. 6. Эпюры напряжений в сечениях обделки в эксплуатационный период:
 а – радиальные напряжения; б – кольцевые напряжения;
 в – касательные напряжения

Расчетная схема для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния обделки в ремонтный период. При выполнении расчетов по определению усилий в сборной обделке туннеля в ремонтный период принимается расчетная схема, аналогичная той, которая использовалась при выполнении расчетов в строительный период. Вносятся некоторые коррективы в расчетную схему, связанные со следующими обстоятельствами.

Считается, что вмещающий туннель массив горных пород обладает упругими свойствами и свойствами ползучести. Предполагается, что деформации ползучести в этом массиве являются затухающими.

При заполнении туннеля водой в начале эксплуатационного периода под действием внутреннего статического давления воды на контуре выработки возникнут упругие радиальные перемещения. С течением времени вследствие ползучести радиальные перемещения контура выработки будут увеличиваться и достигнут предельных значений через некоторый промежуток времени.

В ремонтный период при опорожнении туннеля возникнут радиальные перемещения контура выработки, направленные к центру сечения туннеля. Однако останутся вызванные ползучестью радиальные перемещения контура выработки. При этом будет иметь место увеличение длины контура выработки по сравнению с исходной длиной. Следовательно, между тубингами после опорожнения туннеля обязательно останутся раскрытыми контактные швы.

Под действием вертикальных нагрузок (собственного веса тубингов и вертикального горного давления) раскрывшиеся контактные швы между нижним и боковыми тубингами закроются. В этом случае горизонтальная проекция верхнего тубинга станет меньше горизонтального расстояния между осями верхних опор боковых тубингов и верхний

тубинг опустится. При этом будет иметь место смещение центров тяжести опор верхнего тубинга относительно центров тяжести опор боковых тубингов. Окончательное положение элементов обделки с учетом перемещений, вызванных ползучестью горных пород, при известных значениях этих перемещений может быть определено с помощью несложных геометрических построений.

Расчетная схема, моделирующая обделку туннеля в ремонтный период, принимается в виде плоского криволинейного замкнутого стержня на упругом основании, очертание которого принимается с учетом перемещений контура выработки, вызванных ползучестью горных пород. Эти перемещения должны быть также учтены при моделировании опорных площадок тубингов. Упругое основание моделируется так же, как и в расчетной схеме, которая используется при выполнении расчетов обделки туннеля в строительный период.

В ремонтный период учитываются следующие нагрузки, действующие на моделирующий обделку стержень: собственный вес тубингов, вес бетона затубингового пространства, горное давление, давление подземных вод, сейсмические воздействия.

Конечно-элементная расчетная схема обделки (с учетом симметрии относительно вертикальной оси сечения туннеля и нагрузок) для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в ремонтный период показана на рис. 7, а. На рис. 7, б показан фрагмент этой схемы в зоне стыка верхнего и бокового тубингов.

На рис. 7, б видно смещение оси стержня, моделирующего верхний тубинг, относительно оси стержня, моделирующего боковой тубинг. Такого смещения нет в расчетной схеме для определения напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в строительный период (см. рис. 3, б).

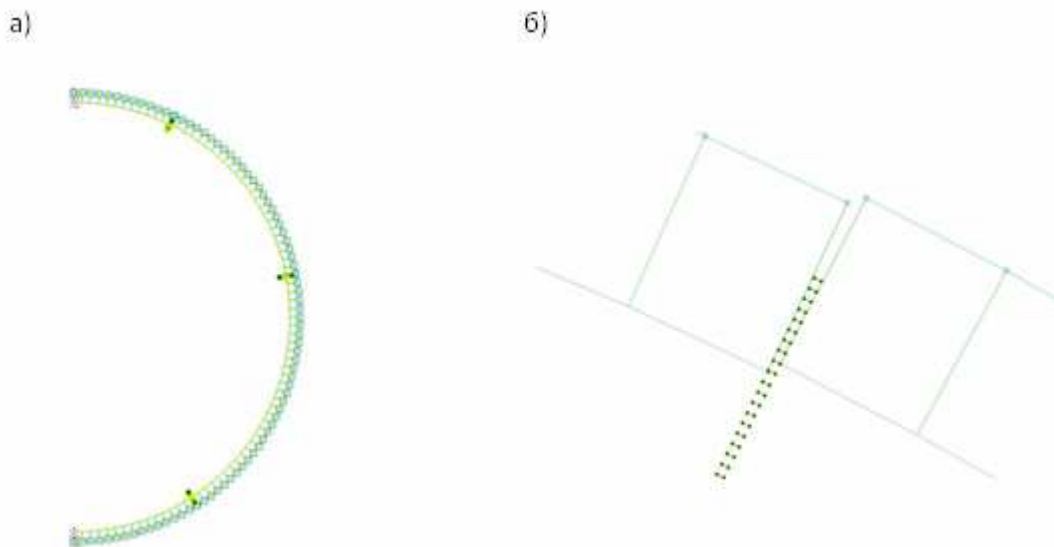


Рис. 7. Конечно-элементная расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния обделки туннеля в ремонтный период:

а – конечно-элементная схема с учетом симметрии относительно вертикальной оси туннеля;
б – фрагмент конечно-элементной расчетной схемы в зоне стыка верхнего и бокового тубингов

На рис. 8 для примера приведены результаты расчетов по определению усилий в сечениях тубингов обделки ГЭС Мтквари в ремонтный период. Показаны эпюры продольных сил, поперечных сил, изгибающих моментов для расчетного случая при основном сочетании следующих нагрузок: собственный вес тубингов, вес бетона затубингового пространства, горное давление, давление подземных вод.

Методика расчетов прочности элементов сборных железобетонных обделок напорных гидротехнических туннелей. Критерии прочности. Расчеты прочности элементов обделок туннелей являются важнейшими расчетами, которые позволяют обосновать надежность и безопасность этих конструкций. Исходными данными для выполнения таких расчетов являются результаты предварительно выполненных расчетов напряженно-деформированного состояния рассматриваемых обделок. Расчеты напряженно-деформированного состояния должны быть выполнены для всей совокупности расчетных случаев,

соответствующих основным и особым сочетаниям нагрузок и воздействий в строительный, эксплуатационный и ремонтный периоды.

Для обоснования надежности и безопасности сборных обделок туннелей необходимо выполнить расчеты механической прочности тубингов и стыков между ними, а также фильтрационной прочности противofильтрационных элементов в стыках между тубингами.

Для выполнения этих расчетов необходимы следующие исходные данные.

1. Геометрические размеры элементов обделки (определяются при проектировании).

2. Данные о прочностных характеристиках бетона и арматуры (принимаются при проектировании).

3. Зависимость предельного давления воды, воспринимаемого противofильтрационным элементом, от значения ширины раскрытия стыков между тубингами (принимаются по данным завода-поставщика).

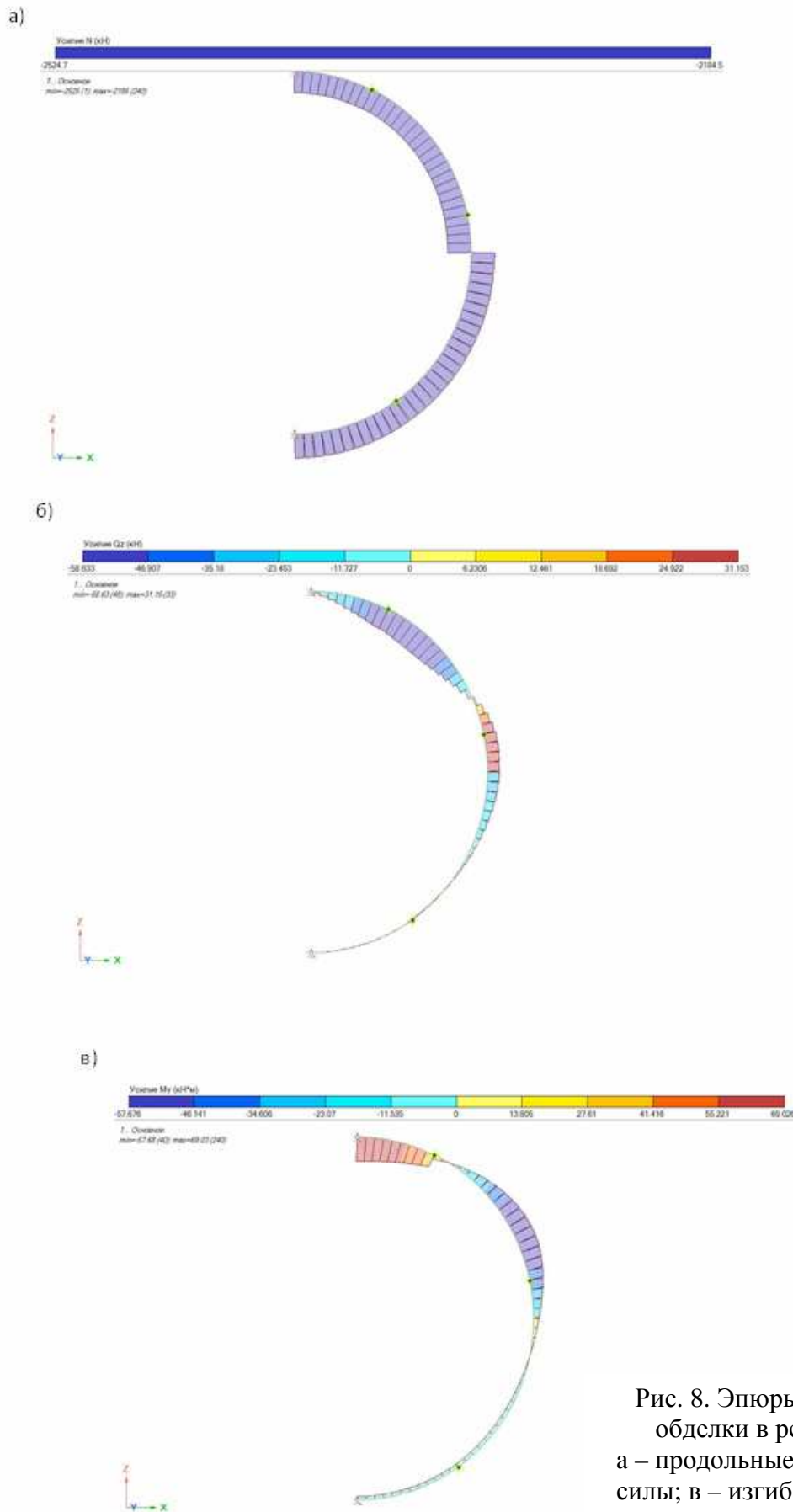


Рис. 8. Эпюры усилий в сечениях обделки в ремонтный период:
а – продольные силы; б – поперечные силы; в – изгибающие моменты

4. Результаты предварительно выполненных расчетов напряженно-деформированного состояния обделки:

– усилия в сечениях тубингов – изгибающие моменты, продольные и поперечные силы;

– возникающие в строительный и ремонтный периоды усилия в стыках тубингов – изгибающие моменты, продольные и поперечные силы;

– возникающие в эксплуатационный период взаимные перемещения тубингов в стыках.

Расчеты прочности тубингов, рассматриваемых как железобетонные конструкции, сводятся к определению требуемых площадей сечения рабочей продольной арматуры у внутренней поверхности $A_{si,r}$ и у внешней поверхности $A_{se,r}$, а также поперечной арматуры $A_{sw,r}$. При выполнении таких расчетов следует использовать методику, регламентированную нормами проектирования [9–11]. Необходимо принять такие критерии прочности тубингов:

$$A_{si} \geq A_{si,r}, \quad A_{se} \geq A_{se,r}, \quad A_{sw} \geq A_{sw,r},$$

где A_{si} , A_{se} , A_{sw} – принятые проектные значения площадей сечения, соответственно, рабочей продольной арматуры у внутренней поверхности и у внешней поверхности тубинга, а также поперечной арматуры.

Кроме того, для тубингов должны быть выполнены расчеты по определению ширины раскрытия трещин a_{cr} , так как эти элементы обделки обычно являются нетрещиностойкими железобетонными конструкциями. Такие расчеты следует выполнять по методике, регламентированной нормами проектирования [3–5, 9–11]. Необходимо принять следующий критерий, обеспечивающий долговечность бетона и сохранность арматуры по условию ограничения ширины раскрытия трещин:

$$a_{cr} \leq a_{cr,u},$$

$a_{cr,u}$ – предельная ширина раскрытия трещин, принимаемая согласно нормам проектирования в зависимости от химического состава воды и градиента напора воды в обделке.

Расчеты прочности стыков между тубингами являются расчетами на местное сжатие (смятие). Методика таких расчетов регламентирована нормами проектирования [9–11]. Критерий, обеспечивающий прочность стыков между тубингами, имеет вид

$$N \leq N_u,$$

где N – расчетное значение продольной силы в стыке тубингов, полученное при выполнении расчетов напряженно-деформированного состояния; N_u – предельное значение продольной силы в стыке тубингов, определяемое в соответствии с нормами проектирования.

Расчеты фильтрационной прочности противотрещиностойких элементов в стыках между тубингами сводятся к сравнению действующего в туннеле внутреннего давления воды p_w с предельным давлением, воспринимаемым противотрещиностойким элементом $p_{w,u}$. Значение $p_{w,u}$ определяется в зависимости от значения ширины раскрытия стыков между тубингами по данным, представленным заводом-поставщиком. Критерий фильтрационной прочности противотрещиностойкого элемента обделки, очевидно, следует записать в виде

$$p_w \leq p_{w,u}.$$

В соответствии с изложенной методикой в ЧАО «Укркидропроєкт» выполнены расчеты по обоснованию запроектированной конструкции сборной железобетонной обделки напорного

деривационного туннеля строящейся в настоящее время ГЭС Мтквари в Грузии. При выполнении этих расчетов рассматривалась вся совокупность расчетных случаев, соответствующих основным и особым сочетаниям нагрузок и воздействий: 4 для строительного периода, 5 для эксплуатационного периода и 2 для ремонтного периода. Для каждого расчетного случая определялось напряженно-деформированное состояние обделки туннеля, выполнялись расчеты механической прочности железобетонных тубингов и стыков между ними, а также фильтрационной прочности противотрационных элементов.

Выводы:

1. Выполнен анализ особенностей конструкции и условий работы сборной железобетонной обделки напорного гидротехнического туннеля.

2. Предложена методика расчетов, обосновывающих надежность и безопасность рассматриваемой обделки напорного туннеля.

3. Разработаны расчетные схемы, которые следует использовать при определении напряженно-деформированного состояния рассматриваемой обделки в строительный, эксплуатационный и ремонтный периоды.

4. Сформулированы критерии, при выполнении которых обеспечена механическая прочность тубингов и их стыков, а также фильтрационная прочность противотрационных уплотнений в продольных швах между тубингами.

5. Выполнены расчеты по обоснованию конструкции сборной железобетонной обделки строящегося в настоящее время туннеля ГЭС Мтквари в Грузии.

Список использованных источников

1. ДБН В.2.4-3:2010. Гидротехнические сооружения. Основные положения [Текст] / Минрегионстрой Украины. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2010. – 37 с.
2. Свод правил СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения [Текст] : актуализированная редакция СНиП 33-01-2003 / Госстрой России. – М. : Минрегион России, 2011. – 44 с.
3. СНиП 2.06.08-84. Туннели гидротехнические [Текст] / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 185. – 19 с.
4. СП 102.13330.2012. Туннели гидротехнические. Актуализированная редакция СНиП 2.06.09-84 [Текст] / Министерство регионального развития Российской федерации. – М. : ООО «Аналитик», 2012. – 52 с.
5. Руководство по проектированию гидротехнических туннелей [Текст] / Всесоюз. проект.-изыскат. и науч.-исслед. ин-т «Гидропроект» им. С. Я. Жука. – М. : Стройиздат, 1982. – 287 с.
6. Рассказов, Л. Н. Гидротехнические сооружения (речные) [Текст] : учеб. для вузов / Л. Н. Рассказов, В. Г. Орехов, Н. А. Анискин [и др.]. – Изд. второе испр. и доп. – М. : Изд-во АСВ, 2011. – Ч. 1. – 584 с.; Ч. 2. – 536 с.
- 7 Гидротехнические сооружения [Текст] : учеб. пособие для вузов / И. А. Васильева, Г. И. Журавлев, П. Е. Лысенко [и др.]; под ред. Н. П. Розанова. – М. : Стройиздат, 1978. – 647 с.
8. Электронный ресурс. – Режим доступа : http://www.selitunnel.com/pdf_articoli/Articolo_RG_per_sito.PDF.
9. СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений [Текст] : Актуализированная редакция / Минрегион России. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 32 с.

10. Свод правил СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений [Текст] / Минэнерго СССР. – М. : ФАУ «ФЦС», 2012 – 67 с.
11. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений (без предварительного напряжения) к СНиП 2.06.08-87 [Текст] : П 46-89 / ВНИИГ. – Л. : Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1991. – 278 с.
12. ДБН В.1.1-12:2006. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України [Текст] / Мінбуд України. – К. : ДП Укрархбудінформ, 2006. – 84 с.
13. Свод правил СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах [Текст] : СНиП II-7-81* / Минстрой России. – М.: ФАУ «ФЦС», 2014 – 126 с.
14. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений [Текст] (пособие к разделу 5 Гидротехнические сооружения СНиП II-7-81) П 17-85 / ВНИИГ. – Л. : Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1986. – 310 с.

Вайнберг Олександр Ісаакович, д-р техн. наук, професор, замісник генерального директора ПАТ «Укргідропроєкт». Тел. : +380577021513. E-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua.

Вайнберг Александр Исаакович, д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора ЧАО «Укргідропроєкт». Тел. : +380577021513. E-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua.

Vaynberg Oleksandr, Dr. sc. Science, Prof, Deputy General Director of Ukrhidroproject PJSC. Tel. +380577021513. E-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua.

Статтю прийнято 7.06.2018 р.