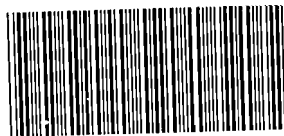


Черный Кирилл Дмитриевич

**МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-
УСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ НА НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СБОРНО-
МОНОЛИТНЫХ ОПОР МОСТОВ В ПРОЦЕССЕ
СТРОИТЕЛЬСТВА**

Специальность **05.23.11** «Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



005545676

- 6 МАР 2014

Москва – 2014 г.



Черный Кирилл Дмитриевич

МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-УСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ ОПОР МОСТОВ В ПРОЦЕССЕ СТРОИТЕЛЬСТВА

Специальность **05.23.11** «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014 г.

Работа выполнена в открытом акционерном обществе «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» (ОАО ЦНИИС).

Научный руководитель:

Величко Владимир Павлович
Кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Васильев Александр Ильич
Доктор технических наук, профессор
кафедры «Мосты и транспортные
тоннели» ФГБОУ ВПО МАДГТУ
(МАДИ)

Селиверстов Вадим Анатольевич
Кандидат технических наук, зам.
генерального директора, главный
инженер ОАО «Гипростроймост»

Ведущая организация:

ОАО «Гипростроймост»

Защита состоится «04» апреля 2014 года, в 10-00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 303.018.01 в конференц-зале при ОАО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» по адресу: 129329, г. Москва, ул. Кольская, д.1

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО ЦНИИС по адресу: 129329, г. Москва, Игарский пр., д.2.

Автореферат разослан *24* февраля 2014 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Петрова Ж. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Строительство мостов в северных районах, характеризуется отдаленностью от бетонных заводов и поселков, суровым климатом и в средней полосе на реках с ледоходом. Для строительства мостов в таких условиях эффективно использовать сборно-монолитные опоры. Контурные блоки из бетона высокого качества обеспечивают им повышенную сопротивляемость климатическим воздействиям, истирающему воздействию льда и плавающих предметов. Кроме того, сборно-монолитные опоры более технологичны и экономичны в строительстве по сравнению с монолитными.

В то же время опыт возведения сборно-монолитных опор в суровых условиях показал, что в них зачастую появляются трещины еще на стадии строительства. Были выявлены случаи, когда эти трещины возникали вследствие проявления скрытых дефектов. Это свидетельствует о том, что технологический аспект работы опор мало изучен и существует необходимость повышения их потребительских свойств.

Трещиностойкость сборно-монолитной опоры определяют внутренние и внешние факторы: конструктивные и технологические. Некоторые из них, особенно те, что действуют в стадии эксплуатации, частично изучены. Однако, сам момент создания сборно-монолитной опоры, в котором имеет место иной набор факторов, не изучен.

В сборно-монолитной опоре наличие зон контакта трех материалов с разной массивностью, геометрией в сечениях и физико-механическими свойствами (блоков, заполнения ядра и швов) изменяет температурно-влажностное и напряженно-деформированное состояние (НДС) всей опоры. В результате конструкция, представляющая собой оболочку из блоков, подвергается дополнительному термическому и силовому воздействию со стороны бетона заполнения. Это воздействие формируется в зависимости от сочетания внутренних факторов (массивности опоры; свойств бетона: водоцементного отношения, теплопроводности, теплоёмкости, предельной растяжимости и др.; экзотермии цемента; усадки бетона; темпа сооружения опоры) и внешних факторов (температуры среды, солнечной радиации, теплофизических свойств опалубки и технологического укрытия). В настоящее время отсутствует комплексная методика учёта влияния внутренних и внешних факторов при оценке трещиностойкости сборно-монолитных опор в процессе проектирования и разработки технологических регламентов. Эти факторы недостаточно учитываются в нормативных документах. Схема взаимодействия опоры с внешней средой от момента начала монтажа контурных блоков до момента завершения строительства, а также необходимость оценить степень участия вышеперечисленных факторов в формировании НДС в сборно-монолитной опоре предопределили направление настоящей работы и системный подход к проведению исследований.

Актуальность работы состоит в повышении потребительских свойств сборно-монолитных опор за счет учета влияния температурно-усадочных процессов на НДС, увеличении качества проектирования и скорости строительства, сокращении затрат на сооружение и ремонт.

Целью настоящей работы является повышение потребительских свойств сборно-монолитных опор мостов за счет учета в процессе строительства влияния температурно-усадочных процессов на их напряженно-деформированное состояние.

Для достижения указанной цели были **поставлены следующие задачи:**

- провести анализ отечественного и зарубежного опыта учета температурно-усадочных воздействий при разработке методов обеспечения трещиностойкости сборно-монолитных опор;

- уточнить факторы, влияющие на температурно-усадочные процессы в сборно-монолитных опорах при строительстве, и обобщить методы учета;

- выполнить ранжирование факторов по степени их влияния на НДС сборно-монолитных опор;

- разработать методику учета факторов, влияющих на температурно-усадочные процессы и НДС в процессе строительства сборно-монолитных опор для повышения их потребительских свойств;

- предложить мероприятия по исключению или снижению влияния выявленных факторов на потребительские свойства с целью учета их в процессе проектирования и строительства.

Методика проведения исследований предполагает использование теоретических и экспериментальных методов на основе рассмотрения опоры, как части моста, так и отдельного конструктивного элемента.

Теоретические методы основываются на многолетнем опыте расчетов с помощью математического моделирования теплофизических процессов и НДС с использованием программы AMGA, разработанной и используемой много лет в ЦНИИСе. Она позволяет рассчитывать тепловое и термонапряженное состояние различных конструкций, в том числе и сборно-монолитных опор. Поля температур и напряжений строятся на основе полученных значений с использованием программы MatLab.

Экспериментальные методы исследования основываются на апробации и внедрении полученных в работе рекомендаций и проверке их достоверности, а именно, в сопоставлении полученных теоретически расчетных данных с замерами температур, определении качества и сплошности бетона на объекте строительства сборно-монолитных опор. Измерения температур проводились с помощью термометров в заранее заложенных термометрических трубках. Исследование сплошности бетона проводилось с использованием неразрушающих методов контроля прибором А1220 «Монолит». Исследование поверхности бетона блоков и швов проводилось с использованием ультразвукового тестера УК 1401М.

Научная новизна работы.

Разработана расчетная модель качественной оценки НДС сборно-монолитных опор в процессе их сооружения с учетом влияния температурно-усадочных процессов. Данная модель учитывает геометрические параметры и разнородные свойства элементов сборно-монолитной опоры, в том числе разные физико-механические характеристики бетона блоков и заполнения, различные внешние и внутренние воздействия путем задания специальных краевых условий, а также условия взаимодействия опоры с другими конструктивными элементами моста.

С использованием этой модели установлены зависимости растягивающих напряжений и стесненных деформаций бетона в разных частях сборно-монолитных опор от: толщины опоры, экзотермии и расхода цемента в бетоне заполнения, усадки бетона заполнения, влияния солнечной радиации во время твердения бетона, технологических перерывов в бетонировании, влияния замерзания водонасыщенного бетона, внезапных похолоданий на стадии строительства.

Определены рациональные режимы при изготовлении контурных бетонных блоков и возведении монолитной части опор.

На основе учета влияния НДС на трещиностойкость сборно-монолитных опор в процессе их строительства представлена иерархия наиболее значимых факторов.

Практическая значимость.

Методика учета влияния температурно-усадочных процессов на НДС сборно-монолитных опор в процессе строительства позволяет повысить их потребительские свойства за счет определения и устранения причин трещинообразования, особенно в суровых климатических условиях.

Разработаны рекомендации по снижению негативного влияния температурно-усадочных процессов на термонапряженное состояние конструктивными и технологическими приемами, а также предложения по повышению трещиностойкости опор на стадии их проектирования и строительства.

Лично автором:

- проведены натурные исследования изменения температуры в бетоне заполнения сборно-монолитных опор в процессе строительства, а также выполнены обследования конструкций после постройки методом неразрушающего контроля;

- предложено значение предельной растяжимости для бетона блоков и заполнения в ледорезной части и выше прокладного ряда;

- обоснована расчетная модель определения влияния основных факторов на напряженно-деформированное состояние для сборно-монолитных опор;

- представлена качественная оценка взаимодействия опоры, как конструктивного элемента моста с другими элементами, и оценены особенности взаимодействия непосредственно в опоре;

- определено влияние расхода цемента в бетон заполнения на термонапряженное состояние в процессе экзотермического саморазогрева в зависимости от толщины опоры;

- адаптированы различные приемы задания краевых условий для определения влияния на напряженно-деформированное состояние температуры и усадки в бетоне заполнения, замерзания водонасыщенного бетона, одностороннего воздействия солнечной радиации;

- впервые исследованы поля температур и напряжений в бетоне блоков на монтаже в зимний период и определены рациональные режимы их прогрева;

- исследован процесс круглогодичного изготовления блоков и выдачи их на необогреваемый склад при отрицательной температуре;

- разработана методика учета влияния температурно-усадочных процессов на НДС при строительстве сборно-монолитных опор.

Достоверность результатов работы базируется на использовании фундаментальных положений теории тепломассообмена и ее влияния на формирование свойств бетона и опоры, как конструктивного элемента, применении современных методов теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых апробированы при строительстве мостов и других транспортных сооружений, в том числе моста через пролив Босфор Восточный в городе Владивостоке и объектов для Олимпиады в городе Сочи. Результаты теоретических исследований подтверждаются экспериментальными данными, полученными при строительстве сборно-монолитных опор моста через реку Москва в городе Бронницы.

Практическое внедрение. Результаты работы реализованы при разработке технологических регламентов на производство работ при строительстве сборно-монолитных опор мостов через реку Ангара на автодороге Богучаны-Байкит и реку Москва в городе Бронницы, что привело к сокращению сроков возведения объектов при высоком качестве строительства, в том числе путем исключения трещинообразования в опорах. Ряд выводов и предложений автора использованы при разработке СТО «Устройство опор мостов».

Апробация работы. Основные научные положения и результаты работы представлены на заседаниях секции «Строительство и реконструкция искусственных сооружений (мосты, путепроводы, виадуки и т.п.)» Ученого совета ОАО «ЦНИИС», на «71 Научно-методической и научно-исследовательской конференции в Московском автомобильно-дорожном институте (МАДИ)».

Публикации. Основные положения работы отражены в 4 опубликованных печатных работах, в том числе 2 в журнале «Транспортное строительство», рекомендованном ВАК.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и общих выводов. Она содержит 173 страницы машинописного текста, 4 таблицы, 66 рисунков и список литературы из 147 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи исследований, показана научная и практическая значимость работы.

Первая глава диссертационной работы посвящена изучению состояния вопроса и постановке задач исследований, необходимых для разработки методики учета напряженно-деформированного состояния (НДС) возникающего в сборно-монолитных опорах (рис. 1) в процессе их строительства.

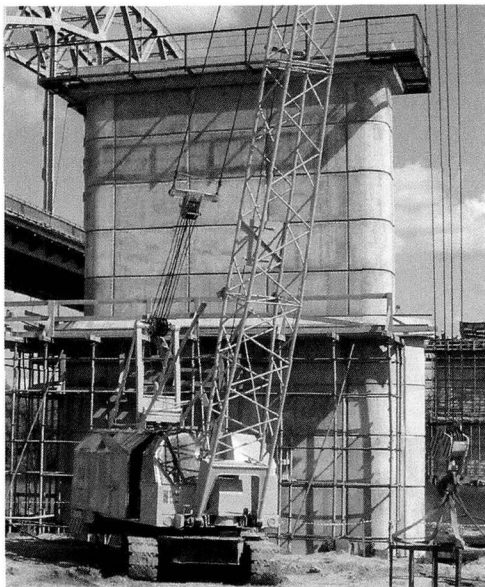


Рис. 1. Общий вид сборно-монолитной опоры.

Свой путь развития сборно-монолитные опоры начали еще с середины 20-х годов 20 века, когда в качестве облицовки в основном выступали гранитные камни. В конечном итоге опоры с блоками заводского изготовления пришли на смену опорам с гранитной облицовкой и сборно-монолитные опоры стали конкурентоспособны с монолитными опорами.

В главе показано на примерах историческое развитие и отмечены некоторые важные даты в процессе развития сборно-монолитных опор. Приведена существующая к концу 20 века классификация наиболее удачных проектных решений опор и применяющихся блоков, разработанных разными проектными организациями. В итоге в результате поиска наиболее эффективных решений в 1990 году был выбран единый типовой проект № 3.501.1-150, который включил в себя все лучшие характеристики

многочисленных блоков и многообразные варианты опор. Эта конструкция, как основная, подверглась исследованию.

Далее рассмотрены основные процессы, протекающие в сборно-монолитных опорах по аналогии с монолитными от момента изготовления блоков, их монтажа на ростверке, заполнения швов и последующей укладки бетона в ядро опоры. К ним отнесены:

1. Теплообмен со средой и внутри массива.
2. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния вследствие разогрева бетона в процессе его твердения.
3. Напряженное состояние от усадки бетона заполнения.
4. Напряженное состояние от набухания бетона заполнения.
5. Напряженное состояние от расширения бетона заполнения при замерзании его на контакте с блоками.
6. Особенности трещинообразования в различных местах опоры.

В блок схеме на рисунке 1 показаны факторы, влияющие на НДС сборно-монолитных опор, и дана их классификация, а на рисунке 2 представлен принципиальный подход к выявлению наиболее опасных из них.

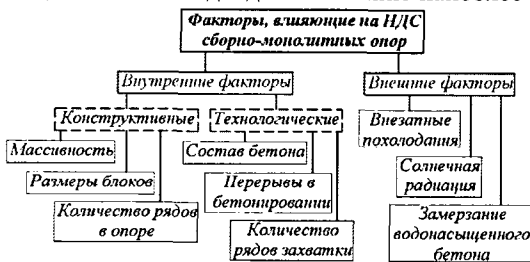


Рис. 2. Блок-схема факторов, влияющих на НДС сборно-монолитных опор.



Рис. 3. Блок-схема методики выявления наиболее опасных факторов, влияющих на НДС сборно-монолитных опор.

Воздействие всех факторов кроме экзотермии рассматривается отдельно. На экзотермию в значительной степени влияют расход цемента и толщина (массивность) опоры, поэтому они должны рассматриваться комплексно.

Изучению роли температурного фактора в конструкциях из бетона были посвящены фундаментальные работы отечественных ученых Абрамова В.С., Айрапетова Г.А., Амбарцумяна С.А., Ахвердова И.И., Баженова Ю.М., Березовского Б.И., Бессера Я.Р., Вегенера Р.В., Волосяна Л.Я., Ганина В.П., Гендина В.Я., Генералова Б.В., Гныри А.И., Головнева С.Г., Грозав В.И., Данилова Н.Н., Запорожца И.Д., Заседателева И.Б., Зубкова В.И., Комохова П.Г., Крылова Б.А., Красновского Б.А., Лагойды А.В, Ли А.И., Лукьянова В.С., Лысова В.П., Малининой Л.А., Малинского Е.Н., Миронова С.А., Мчедлова-Петросяна О.П., Огорокова С.Д., Панченко А.И., Парийского А.А., Сизова В.Н., Скрамтаева Б.Г., Солдаткина М.Т., Соловьянчика А.Р., Топчия В.Д., Шестоперова С.В., Шифрина С.А., Пассека В.В., и других исследователей.

Вопросам влияния теплофизических процессов, в т.ч. экзотермии и теплофизических характеристик материалов на формирование температурных напряжений посвящены работы Горчакова Г.И., Добшица Л.М., Капкина А.А.Москвина В.М., Подвального А.М., Шифрина С.А. и других авторов, которые наполнены научно обоснованными, эффективными, проверенными практикой данными.

Кроме температурного фактора, на термонапряженное состояние сборно-монолитных опор оказывают влияние процессы влагообмена с окружающей средой при производстве бетонных работ и замерзания водонасыщенного бетона заполнения. Теория миграции разработана советскими учеными А.Ф. Лебедевым, П.И. Андриановым, Н.А. Цытовичем, М.И. Сумгиным, А.В. Лыковым и др. Кроме того большой вклад в исследования внесли В.М. Москвин, М.М. Капкин, Б.М. Мазур, А.М. Подвальный.

Вопросам влияния испарения влаги на начальной стадии твердения бетона на его пластическую усадку и конечные физико-механические характеристики посвящены многоплановые исследования Александровского С.В., Айрапетова Г.А., Аруовой Л.Б., Богачева Е.И., Гамаюнова Н.И., Гендина В.И., Дробышевского Б.А., Заседателева И.Б., Копылова В.Д., Крылова Б.А., Куприянова Н.Н., Малининой Л.А., Антипова А.С., Малинского Е.Н., Миронова С.А., Невакшенова А.Н., Новиковой И.П., Орендлихер Л.П., Толкынбаева Т.А., Цимеринова А.И., Шахабова Х.С., а также зарубежных ученых, изучавших особенности твердения бетона в условиях сухого жаркого климата.

Расчет температурного режима выдерживания бетона и термонапряженного состояния в опоре проводился по разработанной В.П. Величко и Э.М. Гулиным в Центральной лаборатории инженерной теплофизики ОАО «ЦНИИС» программе «АМГА». Это доработанная и усовершенствованная версия более старой программы «ЗА» разработанной

В.П. Величко, А.Р. Соловьянчиком, и В.А. Зориной и многократно апробированной при решении целого ряда сложнейших проблемных вопросов, возникавших как при заводском изготовлении изделий сборного железобетона, так и при строительстве сооружений с применением монолитного бетона.

При разработке алгоритма и технологии решения тепловых задач использован метод гидравлических аналогий В.С. Лукьянова.

В основе алгоритма расчета термонапряженного состояния в программе АМГА лежит метод Малинина-Биргера, который оперирует с плоскими сечениями произвольной формы.

Программа совершенствовалась в течение многих лет в процессе решения прикладных задач, возникавших в транспортном строительстве.

Далее в первой главе приведен обзор научных работ, посвященных оценке величины предельной растяжимости бетона в хронологическом порядке. На основе проведенного анализа литературных источников приняты значения предельной растяжимости для бетона блоков и заполнения с целью использования при оценке трещиностойкости сборно-монолитных опор.

Сборно-монолитными опорами мостов занимались многие проектные и строительные организации, а также научные институты. В ЦНИИСе этот вопрос изучали Балючик Э.А., Дробышевский Б.А. и другие.

Вторая глава посвящена методике теоретических исследований по установлению причин трещинообразования от НДС в сборно-монолитных опорах на стадии их строительства. Предложены специальные приемы, позволяющие произвести количественную оценку влияния на НДС сборно-монолитных опор факторов, приведенных в первой главе.

Реализация вышеописанных приемов проводилась с помощью программы АМГА. В главе приведены аналитические зависимости, положенные в основу алгоритма. Программа позволяет рассчитывать объекты разной конфигурации в двухмерной постановке, а так же учитывает разные характеристики материалов в одной конструкции, любые начальные условия в пределах исследуемой конструкции и позволяет задавать варьируемые граничные условия теплообмена на поверхностях. Кроме того, в программе предусмотрена возможность учета тепловыделения цемента при твердении бетона и возможность определять текущую прочность твердеющего бетона. При этом можно учитывать различный минералогический состав цемента и его расход на 1 м^3 бетона.

Для оценки НДС в программе АМГА предусмотрен специальный «ключ». Вычислительный процесс идет в следующем порядке. В начале задаются значения теплоемкости, коэффициента теплопроводности, коэффициентов температурного расширения, модуля упругости бетона, а также параметры начальных и граничных условий. После расчета температуры в элементах области, в той же расчетной схеме рассчитываются значения прочности бетона, значения напряжений сжатия-растяжения, а также предельной растяжимости бетона.

Для учета влияния морозного расширения переувлажненного слоя бетона заполнения на контакте с блоками использовано допущение, полученное в Центральной лаборатории инженерной теплофизики ОАО «ЦНИИС» о том, что «морозное» расширение влажного бетона количественно соответствует температурному расширению «сухого» бетона при повышении температуры последнего на 200°C .

Учет декадных похолоданий производится по методике, предложенной В.С. Лукьяновым и И.И. Денисовым. Она заключается в представлении резкого декадного похолодания в виде трапеции (рис. 3). В трудах авторов имеются карты со значениями A_r и A_d . Они принимаются при задании граничных условий в программе AMGA.

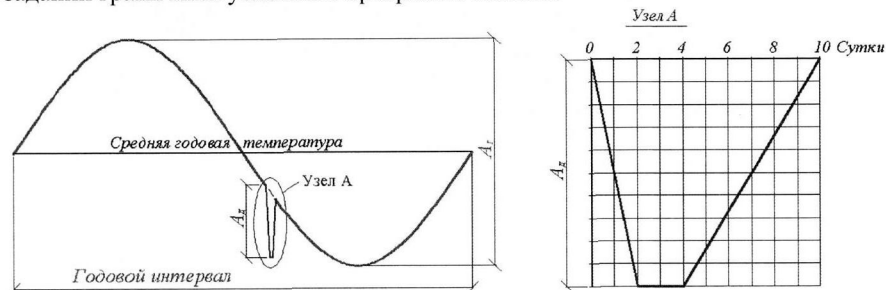


Рис. 3. Схема амплитуды годового хода среднемесячных температур и декадного отклонения от нее.

Методика учета воздействия солнечной радиации на опору, разработана в ЦНИИСе В.П. Величко и В.А. Паталеевым под руководством В.С. Лукьянова и Н.А. Цуканова. По этой методике в главе получена величина расчетной добавки к температуре воздуха для опоры находящейся в Московском регионе, и она принята в расчеты для конкретного примера.

Учет усадки бетона заполнения, в процессе его твердения, выполнен путем сведения этого процесса к температурному сокращению массива бетона на 15°C . Это допущение обосновано в работах предшественников.

В третьей главе приведены экспериментальные исследования, направленные на подтверждение правильности выбранной расчетной модели, ее уточнения и оценки состояния конструкции после постройки с учетом применения технологических рекомендаций, сформулированных на основе расчетов.

Предварительно на мосту через пролив Босфор Восточный в городе Владивостоке была экспериментально отработана методика температурных измерений и произведена оценка достоверности теплофизических расчетов для конструкций с твердеющим бетоном (рис. 4).

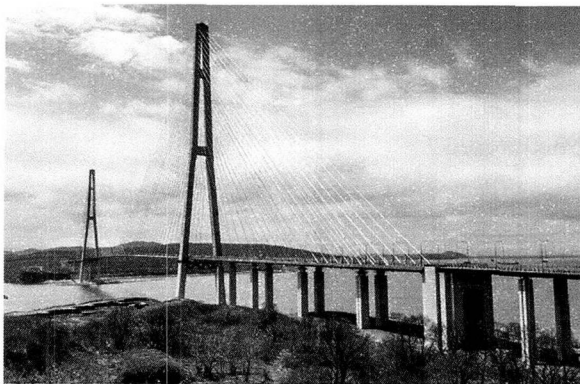


Рис. 4. Мост на остров Русский в городе Владивостоке, на котором проведено экспериментальное уточнение расчетной модели.

Объектом натурального исследования послужил строящийся мост со сборно-монолитными опорами (рис. 5) через реку Москву в городе Бронницы в рамках реконструкции Московского малого кольца.

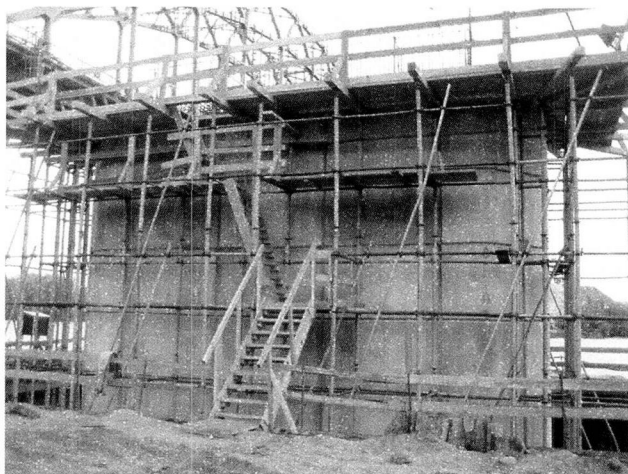


Рис. 5. Сборно-монолитная опора №2 строящегося моста на Московском малом кольце через р. Москву в городе Бронницы.

На всем этапе строительства проводились замеры температур в бетоне и сравнивались с расчетными для их корректировки и пересчета НДС в конструкции (рис.6). Полученные экспериментальные данные были очень близки к теоретическим и в качестве примера представлены на рисунке 7.

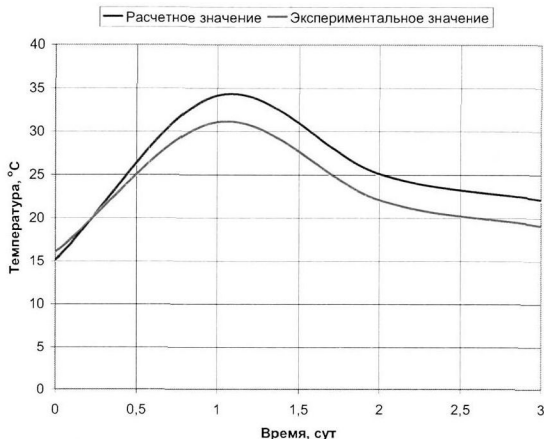


Рис. 7. Графики изменения температуры в бетоне заполнения сборно-монолитной опоры на стадии ее возведения. Первый блок по высоте. Место замера – точка 1 (рис.6).

После того как опоры были построены, они были обследованы на наличие трещин и дефектов. Обследование проводилось визуально и неразрушающим методом.

Данные экспериментальных исследований показали хорошие результаты, свидетельствующие о высоком качестве возведенных конструкций. В качестве примера на рисунке 8 представлена одна из полученных акустических схем с помощью прибора А1220 «Монолит» (синий цвет – отсутствие включений или полостей в бетоне, красный – их наличие), а процесс снятия показаний на рисунке 9.

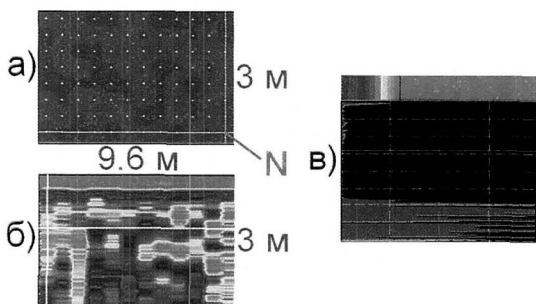


Рис. 8. Акустическая схема результата обработки в программе:
 а) опора №2 вид от опоры 3 (рис. 6б схема №1);
 б) опора с дефектами;
 в) цветная шкала значений сплошности и амплитуда сигналов в точке N.

Наиболее важный из факторов – экзотермия бетона заполнения.

Для выявления влияния экзотермии бетона заполнения на сборно-монолитную опору, состоящую из трех разных видов бетона (блоки, заполнение и швы) были учтены и проанализированы основные влияющие на нее факторы (начальная температура уложенного бетона, расход цемента, толщина опоры и др.).

Начальная температура укладываемого бетона заполнения является одним из важнейших факторов, влияющих на температуру максимального саморазогрева за счет экзотермии и на время набора прочности бетоном. Расчетом показано, что чем выше экзотермия, тем быстрее идет набор прочности, но менее благоприятно термонапряженное состояние в конструкции.

Многовариантными расчетами показано влияние расхода цемента в бетон заполнения на возникающие растягивающие напряжения в конструкции опоры в зависимости от ее толщины (рис. 11). На графике показаны значения предельных напряжений в бетоне блоков и ядра. Как видно из графика повышение расхода цемента в бетон заполнения приводит к неблагоприятному термонапряженному состоянию в конструкции, особенно при расходе более 400 кг/м^3 . Определен критерий трещиностойкости для бетона заполнения и контурных блоков.

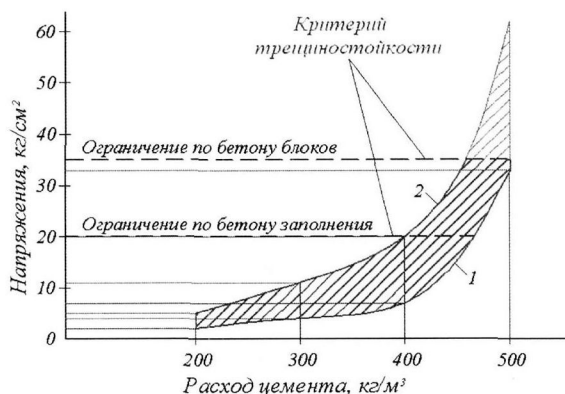


Рис. 11. График зависимости напряжений от расхода цемента в зависимости от массивности (заштрихованная область) конструкций опор: 1 – $b=2.3 \text{ м}$, 2 – $b=4.3 \text{ м}$ (b – толщина опоры).

Установлено также, что НДС зависит от толщины опор, а точнее от массивности бетона заполнения при неизменной толщине блоков. Влияние толщины опоры (вместе с блоками) на напряжения и стесненные деформации представлено на рисунке 12.

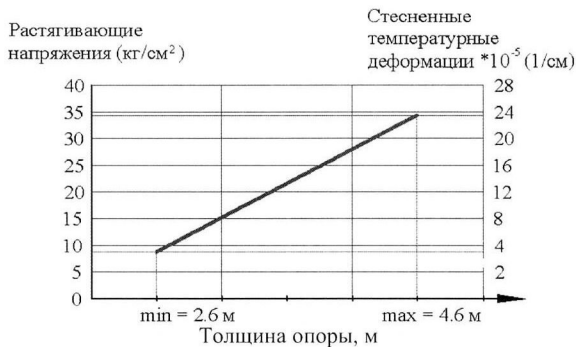


Рис. 12. Влияние толщины опоры на напряженно-деформированное состояние и стесненные температурные деформации в ней.

В ходе исследований установлено, что наличие контурных блоков благоприятно сказывается на температурном режиме бетона заполнения, что фактически приводит к его твердению по методу «термоса». Блоки являются своего рода защитой от крайне нежелательных перепадов температур в твердеющем бетоне заполнения, так как в конечном итоге снижается НДС и, соответственно, вероятность появления трещин. Из практики известно, что наличие в сборно-монолитной опоре зоны контакта двух материалов: бетона блоков и бетона заполнения, затвердевших в разное время и в разных условиях, создает условия для формирования переувлажненного слоя на контакте. Кроме того, во время изготовления опоры в бетоне заполнения существует и остается свободная, не вступившая в реакцию гидратации вода. В случае задержек или перерывов в строительстве без должного ухода, либо в уже забетонированной части вода из ядра может мигрировать по направлению теплового потока на встречу «холоду». Поэтому формируется тонкий слой переувлажненного бетона на контакте с блоками. Во время замерзания эта вода увеличивается в объеме на 9%. Замерзание переувлажненного бетона ядра способно разорвать трубобетонные опоры с толщиной стальной трубы 2÷3 см.

Было проведено исследование для опор разной толщины при одинаковой толщине (3÷5 см) переувлажненного слоя бетона. Ниже на рисунке 13 представлен график изменения напряженного состояния в конструкции от этого воздействия в зависимости от толщины опоры.

Исследование показало, что растягивающие напряжения могут превысить допустимые пределы в опорах небольшой толщины (менее 3 м), в результате чего могут появиться вертикальные трещины в швах между блоками. Возможно также проникновение этих трещин на некоторую глубину и в бетон заполнения.

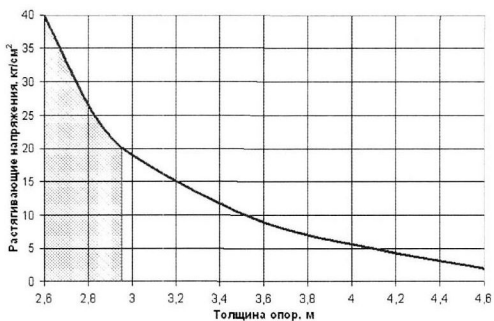


Рис. 13. График зависимости напряжений от толщины опоры при замерзании воды на контакте ядра и блоков. Заштрихован диапазон опасных толщин.

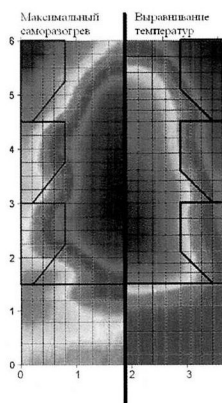


Рис. 14. Качественное представление термонапряженного состояния в разные периоды сооружения опоры (красный цвет — растягивающие напряжения, синий — сжимающие).

В процессе твердения бетона заполнения были выделены 2 основные стадии: максимальный саморазогрев и полное выравнивание температур. Напряжения в опоре в эти два периода практически противоположны по воздействию, но имеют неодинаковое количественное значение, поскольку ядро сначала расширяется под действием температуры, вызывая на поверхности блоков растягивающие напряжения, а потом остывает, сжимается, и в блоках возникают сжимающие напряжения (рис. 14).

Перерывы в бетонировании неизбежны при сооружении сборно-монолитных опор, однако оценка их влияния на НДС и трещинообразование ранее не проводилась. Наши исследования показали, что когда бетонирование ведется послойно, при соблюдении определенных нормами температур старого и нового бетона (таблица 1), напряжения не представляют опасности. В случае длительных перерывов, длящихся более месяца необходимо производить дополнительные технологические операции по зачистке поверхности блоков уже затвердевшего бетона заполнения,

прогреве последнего при необходимости и др. Иначе возникают растягивающие напряжения в поверхностных слоях блоков, что может привести к образованию трещин (рис. 15).

Таблица 1. Требования к температурам старого и нового бетона.

Температура поверхностных слоев жесткого основания, на которое укладывается бетон, и блоков облицовки, °С	Допустимая температура укладываемой бетонной смеси по условию предупреждения температурных трещин, °С
+5	+10 (не более)
+10	+10-20 (не более)
+15...+20	+10...+25

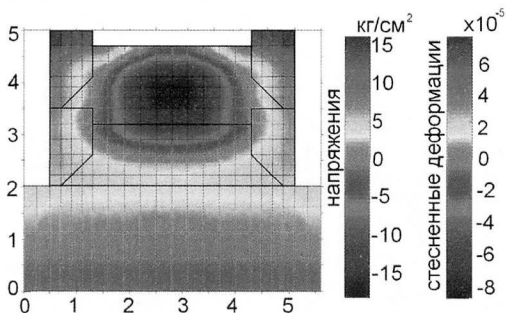


Рис. 15. Поле температурных напряжений и стесненных температурных деформаций при послойном бетонировании с нарушением технологии, перепад температур выше допустимого (первая и вторая захватки).

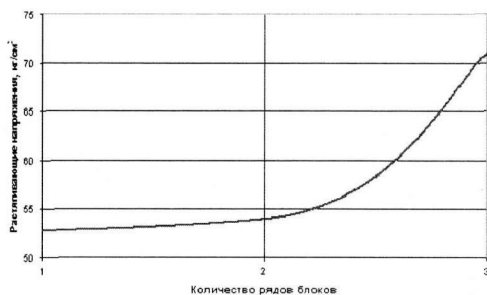


Рис. 16. Наиболее неблагоприятное распределение напряжений в сечении сборно-монолитной опоры при нарушении требований процесса бетонирования после полного выравнивания температур.

На рисунке 16 показано взаимодействие монолитного бетона ростверка либо предыдущей захватки со свежесделанным бетоном заполнения. При максимальном саморазогреве растягивающие напряжения возникают в бетоне блоков и в швах, а при выравнивании температур в бетоне заполнения. Это термонапряженное состояние усугубится при

последующей укладке бетона после перерыва. Вот почему так важно соблюдать температурный режим при возведении опор и не допускать перерывы в процессе бетонирования.

Солнечная радиация при одностороннем воздействии на забетонированную опору может изменить распределение температур в ней и повлиять на НДС. Автором установлено, что влияние солнечной радиации наиболее заметно при длительном и регулярном воздействии (подряд несколько дней).

В качестве примера был проведен анализ ее влияния на опору, построенную в Московской области (рис. 17). Величина расчетной добавки к температуре воздуха $5,64\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оказалось, что этот фактор не оказывает существенного воздействия в данном случае, однако в южных районах страны, а также на юге Дальнего Востока это влияние должно учитываться в расчетах.

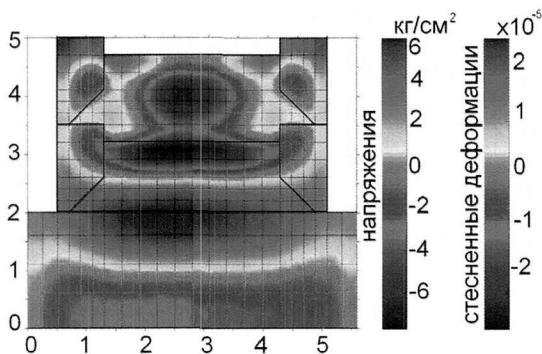


Рис. 17. Поле температурных напряжений и стесненных температурных деформаций во второй захватке сборно-монолитной опоры на третьи сутки с учетом воздействия солнечной радиации (левая сторона).

В процессе сооружения сборно-монолитной опоры, а также в первые недели после окончания бетонных работ на ее НДС может повлиять кратковременное, например декадное, похолодание и не только зимой, но даже летом. На территории России по многолетним методанным зафиксированы величины декадных похолоданий в диапазоне $10\div 23^{\circ}\text{C}$ для разных регионов.

Влияние декадных похолоданий может проявиться и раньше в виде незначительной добавки напряжений на монтаже блоков и позднее после заполнения ядра, а так же в самом бетоне заполнения спустя несколько суток. На рисунке 18 в качестве примера приведен результат прогноза НДС при понижении температуры на величину равную 20°C . На левой части показано поле напряжений и стесненных деформаций на 10 сутки, а на правой – на 14 сутки. Из рисунка видно, что в конструкции появляются остаточные напряжения в ядре, которые возникают вследствие «защемления» холода в центре опоры после начала повышения температуры на ее поверхностях.

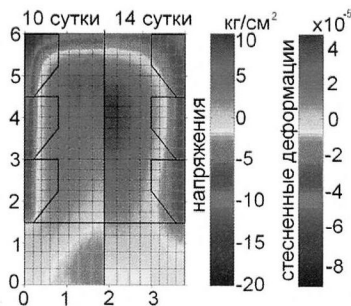


Рис. 18. Поле температурных напряжений и стесненных температурных деформаций на 10 и 14 сутки от декадных похолоданий.

Несмотря на то, что напряжения невелики, в сочетании с другими факторами они могут усилить их негативное влияние на НДС.

Усадочные напряжения в массивных монолитных опорах могут существенно влиять на процесс трещинообразования. Наше исследование показало, что в сборно-монолитных опорах усадочные напряжения принципиального значения не имеют, так как растягивающие напряжения возникают только в бетоне заполнения (рис. 19), где усадочные трещины менее опасны, чем в блоках. Кроме того напряжения не достигают высоких значений. В блоках же усадочные напряжения при соблюдении технологии их изготовления обычно вообще не возникают.

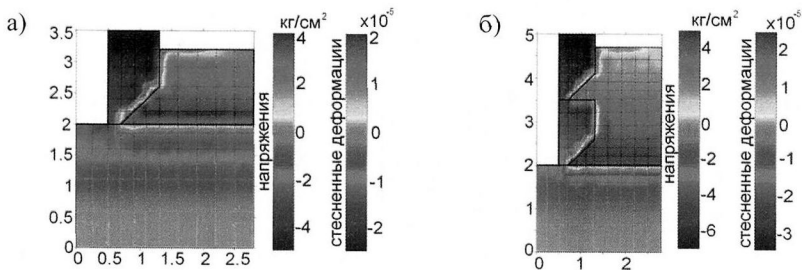


Рис. 19. Значения напряжений от воздействия усадки в бетоне заполнения опоры: а – один ряд контурных блоков, б – два ряда контурных блоков.

Качество сборно-монолитной опоры существенно зависит от качества изготовления контурных блоков и от соблюдения особых правил монтажа в зимних условиях. Как правило, блоки изготавливают на полигонах вблизи строящегося моста. При экзотермическом разогреве в момент максимального саморазогрева на поверхности блока возникают растягивающие напряжения, а после выравнивания сжимающие. При ускорении процесс изготовления блоков электропрогревом поверхности, для более интенсивного набора бетоном прочности сокращаются сроки производственного процесса, однако в блоках создается неблагоприятное собственное термонапряженное состояние за счет сформировавшейся вогнутой кривой нулевых напряжений,

что приводит к последующему образованию трещин в изначально бездефектных блоках от воздействия температурных инверсий окружающей среды (рис. 20).

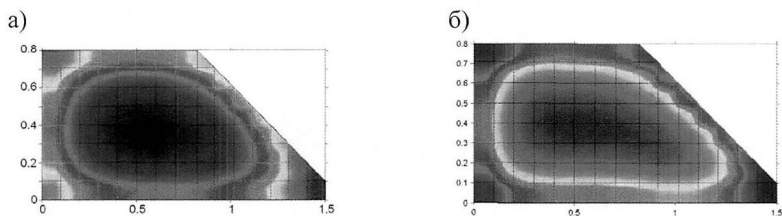


Рис. 20. Качественное представление термонапряженного состояния в разные периоды сооружения блоков (красный цвет – растягивающие напряжения, синий – сжимающие): 1. При благоприятном термонапряженном состоянии: а) максимальный саморазогрев; б) полное выравнивание температур; 2. При неблагоприятном термонапряженном состоянии, вызванном электропрогревом поверхности: а) полное выравнивание температур; б) максимальный саморазогрев.

Перед тем как начать работы по бетонированию сборно-монолитной опоры, выставленные по периметру блоки на заданную проектом высоту (количество n рядов) укрывают теплоизоляционным покрытием и начинают согревать теплогенераторами. В основном прогрев осуществляется с внутренней стороны опоры, куда в последствие будет уложен бетон ядра. Но в таком случае создается неблагоприятное термонапряженное состояние на поверхности блока, которая не успевает так же динамично прогреться и в ней начинают возникать растягивающие напряжения. Исследование этого фактора показало, что наиболее щадящим является прогрев со всех сторон блока с интенсивным обдувом теплым воздухом с температурой в диапазоне $+25\div+30^{\circ}\text{C}$ (рис. 21). Как видно из рисунка растягивающие температурные напряжения при одностороннем прогреве могут представлять опасность трещинообразования.

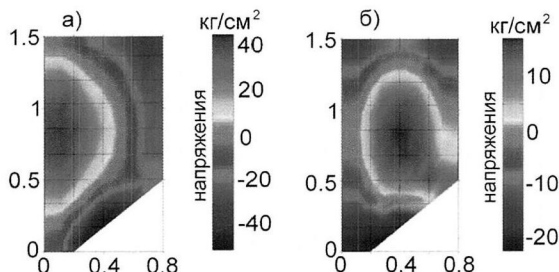


Рис. 21. Поля напряжений в поперечном сечении прогреваемого блока (теплак, прогрев с внутренней стороны (а) и со всех сторон (б), начальная температура блока -15° , температура прогрева $+30^{\circ}$).

На основе исследования различных вариантов изготовления блоков в условиях круглогодичного изготовления был сделан вывод, о том, что необходим выбор оптимального варианта изготовления, который обеспечит благоприятное термонапряженное состояние в блоках для повышения их потребительских свойств. Разработанная автором методика позволяет это сделать.

В пятой главе систематизированы итоги исследований, полученные в главах 2-4 и, выработан общий подход к учету НДС сборно-монолитных опор мостов во время их строительства. В результате разработана методика учета влияния внутренних и внешних факторов, наиболее заметно влияющих на НДС (рис. 22).



Рис. 22. Влияние основных факторов на НДС сборно-монолитных опор.

Методика предполагает выполнение следующих шести этапов, представленных на рисунке 23:

1. Анализ исходных данных для расчета:

а) Оценка внешних факторов:

- местоположение объекта строительства;
- климатические условия;
- наличие реки;

б) Оценка внутренних факторов:

- массивность опор;
- характеристики бетона;
- количество рядов блоков в захватке и в опоре;
- размер блоков.

2. Выбор факторов, значимых для данного объекта и установление наличия взаимовлияния.

3. Составление расчетной модели с учетом внешних особенностей объекта и внутренних факторов субъекта строительства. Определяется наличие или отсутствие симметрии рассматриваемой конструкции. Делается разбивка на элементы конечных размеров с учетом наличия у субъекта двух материалов: бетона блоков и заполнения. Определяются участки контура, контактирующие с окружающей средой или другим субъектом (например, ростверк).

4. Определение параметров расчета:

- а) Временные рамки расчетного интервала (начало и конец);
- б) Краевые условия (начальная температура, граничные условия);
- в) Теплофизические характеристики бетона;
- г) Физико-механические характеристики бетона;
- д) Дискретность времени на расчетном интервале;
- е) Форма представления результатов (графики, таблицы, поля).

5. Проведение расчета изменения температуры, напряжений и роста прочности в расчетной модели конструкции.

6. Проверка трещиностойкости. В случае обеспечения параметров растягивающих напряжений и предельной растяжимости бетона в сборно-монолитной опоре происходит завершение расчета. В противном случае осуществляется возврат к пункту 3. Выполняется корректировка параметров расчета с использованием диаграммы на рисунке 23 и проводится повторный расчет.

7. Практические рекомендации:

а) Конструктивные (изменение массивности опоры, величины захватки по высоте);

б) Технологические (снижение В/Ц, недопущение переувлажнения бетона выставленных блоков и основания в теплый период года и по возможности уменьшение длительности перерывов в строительстве, своевременное укрытие поверхности бетона, назначение рациональных режимов прогрева в зимний период и проч.).

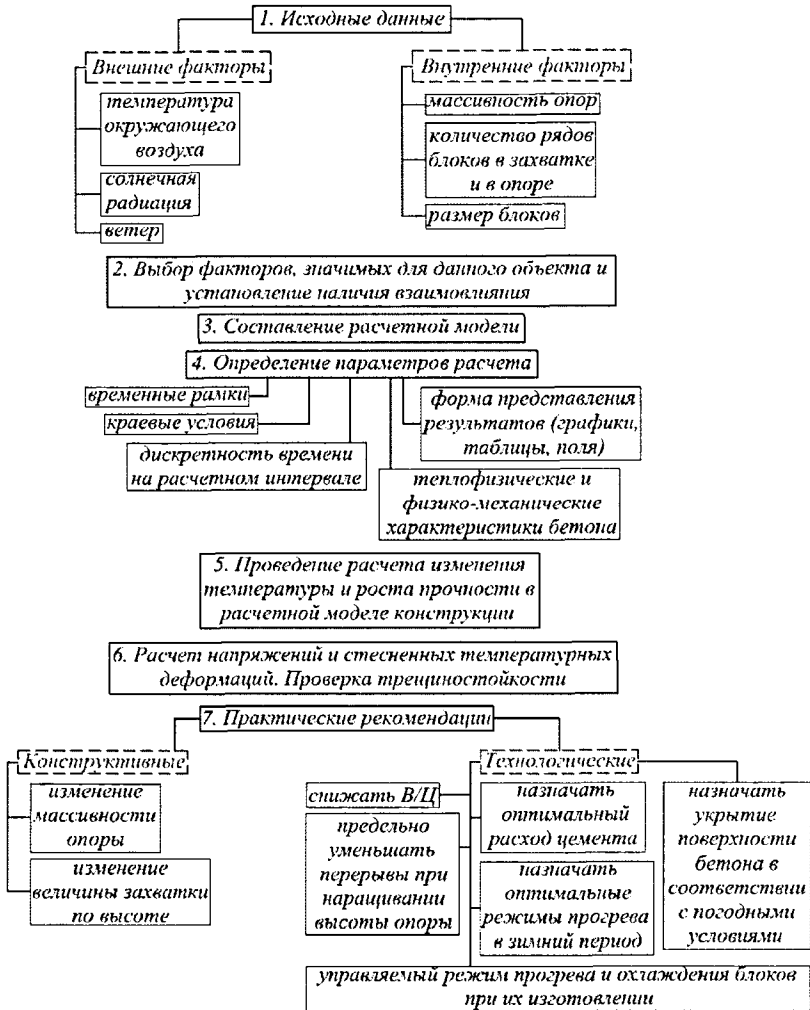


Рис. 23. Методика учета НДС сборно-монолитных мостовых опор, возникающего в процессе их сооружения.

В шестой главе приведен анализ экономической эффективности от применения разработанной методики. Эффективность заключается в исключении трещинообразования. В результате экономии на текущих и капитальных ремонтах опоры можно сократить затраты в размере половины ее первоначальной стоимости. Например, в Московской области при стоимости строительства опоры равной 1,75 млн. руб., экономия на ремонтах за весь период эксплуатации составит 1,2 млн. руб. с учетом того, что в первые 30 лет ремонт не потребуется.

Выводы:

1. На основе анализа опыта строительства монолитных опор выявлено влияние на напряженно-деформированное состояние температурно-усадочных процессов, которые могут являться причиной возникновения трещин в блоках и швах сборно-монолитных опор, а также приводить к скрытым дефектам в бетоне заполнения в процессе строительства.

2. При выполнении работы был решен ряд вопросов, связанных с методологией исследования термонапряженного состояния сборно-монолитных опор в процессе разработки ряда Технологических регламентов для объектов саммита АТЭС (мост на остров Русский и океанариум в городе Владивостоке) и при подготовке к Олимпийским играм (вантовый мост на совмещенной автомобильной и железной дороге).

3. При непосредственном участии автора на строящихся объектах проводились замеры температур в бетоне заполнения, анализировались и сравнивались с расчетными значениями для назначения наилучших режимов твердения бетона. На этой основе уточнялся расчетный механизм для разработки новой методики для сборно-монолитных опор.

4. Специально для сборно-монолитных опор разработана расчетная модель, включающая специальные приемы задания краевых условий, для определения влияния термонапряженного состояния на трещинообразование от следующих факторов: замерзания водонасыщенного бетона, усадки, солнечной радиации, декадных похолоданий.

5. В процессе разработки методики учета температурно-усадочных процессов на НДС решены следующие вопросы:

- определено количественно влияние расхода цемента в бетон заполнения на термонапряженное состояние в процессе экзотермического саморазогрева в зависимости от толщины опоры;
- предложено значение предельной растяжимости для бетона блоков и заполнения в ледорезной части и выше прокладного ряда;
- впервые предложена и опробована для опор разной толщины методика учета усадки в бетоне заполнения;
- предложена и опробована методика учета замерзания водонасыщенного бетона на контакте блоков с бетоном заполнения;
- обоснована возможность не учета солнечной радиации в средней полосе и северных районах страны;
- предложена и опробована методика учета влияния декадных похолоданий на НДС;
- впервые установлены особенности влияния на трещиностойкость опоры перерывов в бетонировании;
- приведены приемы качественной оценки взаимодействия элементов в опоре, а также опоры с ростверком в момент максимального саморазогрева и после полного выравнивания температур по сечению;

- впервые исследованы поля температур и напряжений в бетоне блоков на монтаже в зимний период и определены рациональные режимы их прогрева;

- исследован процесс и даны предложения по круглогодичному изготовлению блоков с выдачей их на необогреваемый склад при отрицательной температуре.

6. На основе результатов многовариантных расчетов установлены критерии трещиностойкости для бетона заполнения и блоков по предельным растягивающим напряжениям и предельной растяжимости бетона. Критерием степени влияния изученных факторов приняты вызываемые ими предельные значения растягивающих напряжений.

7. Проведена качественная и количественная оценка воздействия на НДС опор основных влияющих факторов: экзотермии бетона заполнения, замерзания водонасыщенного бетона заполнения на контакте с блоками, расхода цемента, толщины опоры, усадки, длительных перерывов в бетонировании, внезапных похолоданий, одностороннего воздействия солнечной радиации. Проведено ранжирование этих факторов по степени их влияния на НДС сборно-монолитных опор.

8. На основе результатов натурных и теоретических исследований разработана новая методика учета влияния температурно-усадочных процессов на НДС сборно-монолитных опор мостов. Она заключается в системном подходе к оценке рассматриваемых факторов и дает возможность анализировать их сочетание с учетом конкретных условий объекта строительства.

9. Разработанная методика успешно применена автором при разработке Технологических регламентов на круглогодичное строительство сборно-монолитных опор на мосту через реку Ангара на автомобильной дороге Богучаны-Байкит и через реку Москва в городе Бронницы. Построенные опоры не имели трещин.

10. Экономическая эффективность от применения разработанной методики может составить более половины стоимости самой опоры за счет повышения потребительских свойств (эффективности, долговечности, надежности, качества и др.) готовой конструкции и сведения к минимуму объемов ремонтных работ в процессе эксплуатации. Кроме того, вследствие применения более рациональной технологии сооружения опор достигается сокращение сроков строительства.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Величко В.П., Черный К.Д. Учет напряженно-деформированного состояния в сборно-монолитных опорах мостов на стадии их сооружения. // Транспортное строительство, 2013, № 2. С. 11-13.

2. Балочик Э.А., Величко В.П., Черный К.Д. Изготовление блоков облицовки в зимний период строительства моста через реку Ангару. // Транспортное строительство, 2012, № 10. С. 4-7.

Другие статьи и материалы конференций:

3. Величко В.П., Черный К.Д. Напряженно-деформированное состояние в сборно-монолитных опорах мостов на стадии их сооружения от воздействия внутренних и внешних факторов. // Мир дорог, 2013, № 69. С. 34-35.

4. Балочик Э.А., Черный К.Д. Повышение трещиностойкости опор мостов из монолитного бетона конструктивными методами. // Сб. научных трудов ЦНИИС № 257. Комплексные проблемы транспортного строительства. М., 2010. С. 49-57.

Подписано в печать 13.02.2014.

Формат 60 × 84 1/16.

Объем 2 п.л. Тираж 80 экз. Заказ 1.

Отпечатано в типографии ОАО ЦНИИС.

129329, Москва, Кольская 1

Тел.: 8-499-180-94-65