

6
А-60

Государственный комитет по делам
строительства СССР

Научно-исследовательский институт бетона и железобетона
"НИИБ"

На правах рукописи

Инженер В.Н. Горячев

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОЛЫЦЕВОГО
СЕЧЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ /ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНСТРУКЦИЯМ
БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ АТОМНОГО РЕАКТОРА/

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1971

Государственный комитет по делам
строительства СССР

Научно-исследовательский институт бетона и железобетона
"НИИЖБ"

На правах рукописи

Инженер В.Н. Горячев

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОЛЫЦЕВОГО
СЕЧЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ /ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНСТРУКЦИЯМ
БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ АТОМНОГО РЕАКТОРА/

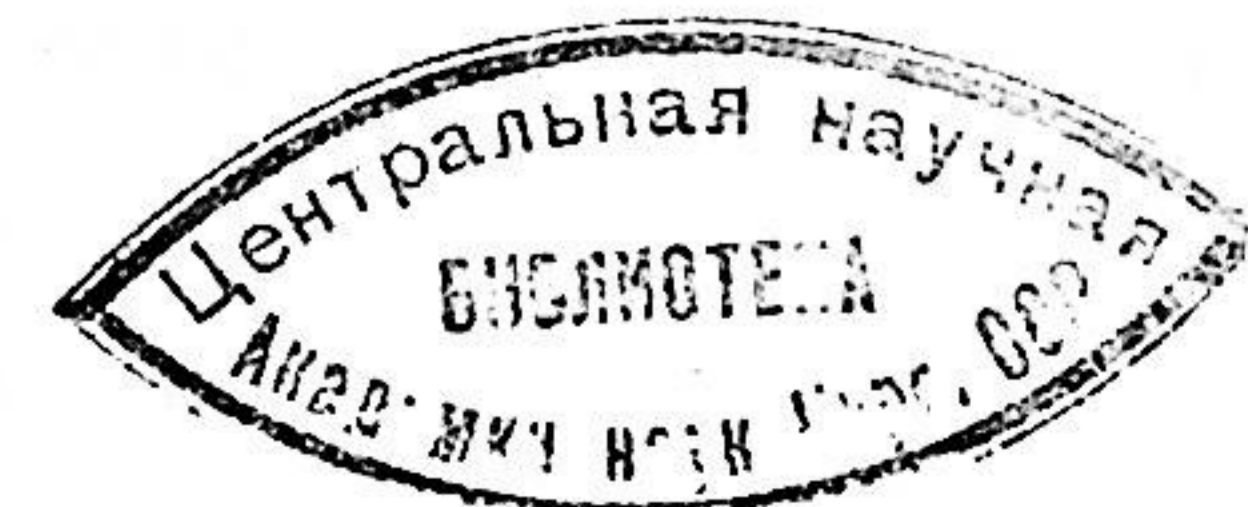
(специальность - 480 - строительные конструкции)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

Кандидат технических наук В.М. МИЛОНОВ



Москва - 1974

Работа выполнена в лаборатории жаростойких железобетонных конструкций Научно-исследовательского института бетона и железобетона "НИИЖБ" Госстроя СССР.

Научный руководитель - кандидат технических наук
В.М.Милонов

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор В.В.Михайлов
кандидат технических наук
Я.Ф.Хлебной

Ведущая организация - институт Теплоэлектропроект

Ученый Совет направляет Вам для ознакомления данный реферат и просит Ваши отзывы и замечания направлять в адрес Ученого Совета НИИЖБ, Москва, Ж-389, 2-ая Институтская, 6.

Автореферат разослан " 9 " IX 1971 г.

О дне защиты диссертации будет сообщено в газете "Вечерняя Москва".

Ученый секретарь Ученого
Совета НИИЖБ
кандидат технических наук

Д.С.Киселевич

В В Е Д Е Н И Е

В современных промышленных сооружениях железобетонные конструкции часто подвергаются воздействию повышенной температуры. При этом значительный объем составляют конструкции кольцевого сечения, как, например, дымовые трубы, боровы, бункера, градирни, фундаменты и пр. В последние годы в связи с развитием в Советском Союзе атомной энергетики расширяется объем применения железобетона в массивных конструкциях биологической защиты реакторов.

Первая в мире атомная электростанция введена в действие в СССР в июле 1954 г, а с пуском первой очереди Нововоронежской АЭС в нашей стране началась промышленная эксплуатация атомных электростанций. Намечается дальнейшее развитие атомной энергетики в районах Кавказа, Дальнего Востока, Крайнего Севера и предусматривается ввод в 1971-1980 гг значительного числа новых мощностей на действующих АЭС.

При работе атомного реактора в большом количестве выделяется тепло и радиоактивное излучение, что требует устройства специальной тепловой и биологической защиты. Биологическая защита атомных реакторов, предохраняющая обслуживающий персонал от вредного воздействия радиации, является статически неопределимой конструкцией и по своей форме подходит к толстостенному полуму цилиндру с днищем. При значительной толщине до трех и более метров собственный вес защиты и внешние нагрузки не оказывают существенного влияния на ее напряженное состояние, в то время как температурный перепад в радиальном направлении создает значительные усилия растяжения у наружной поверхности и сжатия у внутренней поверхности защиты. Воздействие повышен-

ной температуры является основным фактором, обуславливающим напряженно-деформированное состояние железобетонной конструкции защиты при ее эксплуатации.

Расчет статически неопределимых железобетонных конструкций на воздействие повышенной температуры методом теории упругости приводит к завышенным температурным усилиям, а следовательно, и к излишнему расходу арматуры, вследствие неучета пластических деформаций и возможного образования трещин, снижающих жесткость сечений. Температурные усилия в статически неопределимых конструкциях непосредственно зависят от их жесткости. Поэтому учет действительной жесткости сечений позволяет наиболее достоверно оценить напряжения и деформации в статически неопределимой железобетонной конструкции от воздействия повышенной температуры.

Основы расчета жесткости железобетонных конструкций были разработаны проф. В.И.Мурашевым, который учитывал влияние образования трещин и пластических деформаций на жесткость. Проф. В.И.Мурашев предложил метод расчета по предельным состояниям железобетонных конструкций кольцевого сечения и сплошного диска на температурный перепад в радиальном направлении. Экспериментальное подтверждение этого метода для расчета дымовых труб и фундаментов доменных печей было получено в опытах А.Ф.Куренкова, А.Ф.Милованова и В.С.Зырянова, Я.М.Немировского и Б.А.Альтшулера.

В дальнейшем, на основании большого количества опытных данных, проф. А.А.Гвоздев развил теорию жесткости и предложил единую методику определения кривизны и прогибов железобетонных элементов.

Проведенные до настоящего времени экспериментально-теоре-

тические исследования работы железобетонных конструкций кольцевого сечения при нагреве были, в основном, выполнены на средне и сильноармированных тонкостенных железобетонных элементах. Для биологической защиты, работающей в условиях повышенных температур, находят применение конструкции из железобетона с низкими коэффициентами армирования $\mu \leq 0,3\%$.

В связи с этим основной целью настоящей работы было изучение напряженно-деформированного состояния при температурном перепаде толстостенных слабоармированных конструкций кольцевого сечения. Работа выполнялась в НИИЖБ в 1965-1969 гг. Было проведено экспериментально-теоретическое исследование работы толстостенных железобетонных колец и полого цилиндра с днищем.

Учитывая, что длительное воздействие температуры оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние статически неопределимых железобетонных элементов, испытания образцов проводились как при кратковременном, так и при длительном нагреве.

Кроме того были проведены обследования конструкции биологической защиты атомного реактора для установления действительного характера распределения температуры по толщине защиты при разогреве бетона от экзотермии цемента в период ее возведения, в пусковой период и при эксплуатации реактора.

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ приведены некоторые особенности конструкции биологической защиты и дан анализ методов расчета толстостенных элементов кольцевого сечения, а также рассмотрены результаты ряда экспериментальных работ.

Основываясь на работах советских исследователей А.Н.

Комаровского, А.Е. Дасова, Н.А. Аршинова, Д.Л. Бродера и др. и зарубежных специалистов Б. Прайса, К. Хартона, К. Спинни, Н. Ситзена, А. Олингера и др. рассматриваются особенности конструкции биологической защиты атомных реакторов и условия ее эксплуатации.

Активная зона реактора атомной электростанции, как правило, имеет цилиндрическую форму. Поэтому наиболее экономичной и целесообразной наружной поверхностью боковой биологической защиты является форма правильного многоугольника. Толщина стен биологической защиты равная 3-3,5 м принимается из условия обеспечения безопасности обслуживающего персонала от воздействия радиации.

Железобетонные конструкции биологической защиты нагреваются от реактора путем конвекции тепла, основная часть которого связана с кинетической энергией продуктов деления и обычно возникает внутри тепловыделяющих элементов. На действующих в нашей стране станциях температура внутренней поверхности защиты, имеющей систему охлаждения, не превышает 90-100°C. Помимо этого внутренняя зона по сечению защиты нагревается еще в результате замедления нейтронов и поглощения γ излучения, что приводит к дополнительному повышению температуры бетона вблизи внутренней поверхности защиты на 10-15%. Одним из основных требований, предъявляемых к конструкциям биологической защиты, является недопущение в ней сквозных трещин, причем ширина раскрытия трещин не должна превышать 0,3 мм.

Для обеспечения нормальной эксплуатации железобетонных конструкций защиты, повышения их защитных свойств и долговечности, большое значение имеет правильный расчет и проектирование.

В работе приведен обзор развития метода расчета железобетонных конструкций кольцевого сечения при неравномерном нагреве. Приведены основные положения метода проф. В.И. Мурашева и предложения проф. А.А. Гвоздева, на основе которых даются предложения по расчету толстостенных железобетонных конструкций кольцевого сечения при неравномерном нагреве по радиусу. Для определения температурного момента по высоте цилиндра был использован с соответствующими дополнениями расчет полубесконечной цилиндрической оболочки с различными условиями загрузки на краю, как это предлагается в работах П.Л. Пастернака, С.П. Тимошенко, А.М. Овечкина и др. Равномерно распределенные по периметру цилиндра моменты и поперечные силы в месте сопряжения стен с днищем определялись из решения канонических уравнений методом сил.

В О В Т О Р О Й Г Л А В Е приводятся задачи и программа исследований, конструкция опытных образцов и методика их испытаний при нагреве со стороны внутренней поверхности до 100 и 300°C.

Испытания проводились для изучения особенностей напряженно-деформированного состояния, трещиностойкости толстостенных железобетонных конструкций кольцевого сечения при кратковременном и длительном действии неравномерного по сечению нагрева. При этом одной из основных задач была более точная оценка изменения жесткости кольцевого сечения, а следовательно, и температурных усилий в различных стадиях работы испытываемой конструкции.

В процессе испытаний намечалось установить величину температурного перепада, при которой образуются трещины и проследить

за изменением средних деформаций растянутой арматуры в образцах с различными коэффициентами армирования; оценить влияние коэффициента армирования на процесс трещинообразования и характер распределения деформаций по периметру образцов при температурных перепадах, характерных для конструкций биологической защиты на действующих АЭС. В результате испытаний необходимо было установить влияние криволинейности эпюры распределения температур по толщине стенки защиты на ее напряженно-деформированное состояние.

Кроме лабораторных экспериментов в программу исследований входили обследования конструкции биологической защиты на Нововоронежской АЭС. Обследование массивной железобетонной конструкции защиты выполнялось с целью изучения температурных полей в молодом бетоне, который разогревается вследствие экзотермической реакции гидратации цемента при схватывании и твердении бетона в период строительства, и установления действительного характера распределения температуры бетона в различных сечениях по высоте и толщине защиты в процессе пуска и эксплуатации реактора.

В лабораторных условиях были испытаны 8 железобетонных колец с наружным диаметром 1,5 м, высотой 0,5 м и толщиной стенки 0,38 м, выполненные с армированием 0,1; 0,2; 0,3; 0,6 и 1,2%. Одностороннее и двустороннее армирование образцов осуществляли стержнями периодического профиля диаметром 10 и 18 мм из стали классов А-II и А-III. Был также испытан цилиндрический образец диаметром 1,5 м, высотой 2,5 м и толщиной стенки 0,38 м, который имел двустороннее армирование $\mu = 0,2\%$ и стенки были жестко соединены с железобетонным днищем толщиной

0,25 м. Кольцевые и цилиндрический образцы были выполнены в масштабе 1:8 от конструкции защиты Нововоронежской АЭС. Кроме того был испытан один большой кольцевой образец с $\mu = 0,2\%$, диаметром 3 м, высотой 1 м и толщиной стенки 0,75 м в масштабе 1:4 от натурной конструкции.

Для приготовления бетона использовался портландцемент завода "Спартак" марки 500, песок средней крупности и гранитный щебень с наибольшей крупностью зерен 20 мм. Прочность бетона составляла 250–300 кг/см².

Одновременно с опытными образцами были изготовлены кубики 10x10x10 см, восьмерки с размером сечения в средней части 10x10 см и призмы 10x10x40 см для определения прочности при сжатии и растяжении, модуля упругости, усадки и ползучести бетона при повышенной температуре.

Образцы испытывали на специальном стенде. Для снижения трения между стендом и образцом при его расширении во время нагрева устраивалась подсыпка из графитового порошка. Установленный на стенд кольцевой образец с электронагревателем внутри накрывали сверху колпаком с двойным остеклением. Образцы сначала нагревали до 100°C на внутренней поверхности, после остывания до 20°C повторно нагревали до 300°C.

При первом нагреве температура поднималась по 5 и 20°C в час, а при повторном нагреве по 30°C в час. При 100°C кольцевые образцы выдерживались в течение 12–15 часов, а цилиндрический – в течение ^ямедца, и затем они остывали. Остывание до установления постоянной температуры по толщине образцов длилось примерно одни сутки. При повторном нагреве до 300°C образец выдерживался в течение 24 часов. В двух образцах вблизи от внутренней поверхности при бетонировании была заложена нитка

ромовая спираль, позволявшая создавать местное повышение температуры на 10-15°C.

Температуру бетона и арматуры замеряли хромель-копелевыми термомпарами, установленными в различных сечениях образца. Деформации арматуры измеряли глубинными тензодатчиками, мессурами и специально термообработанными тензодатчиками. Для внесения температурной поправки в показания тензодатчиков и мессур на их базы устанавливали термомпары.

Перемещения стенки в радиальном направлении замеряли индикаторами и прогибомерами, установленными на специальной раме и соединенными с образцом кварцевыми тягами, имеющими незначительный коэффициент температурного расширения.

Раскрытие трещин на внешней поверхности образца измеряли капилляроскопом с ценой деления 0,05 мм. Через стеклянный колпак устанавливали глубину проникновения трещин на торцевой поверхности образцов и момент образования трещин на внутренней поверхности при остывании.

Влияние нагрева на физико-механические свойства бетона определяли по результатам испытания бетонных кубиков и призм при температурах 20, 60, 120, 200 и 300°C.

Для измерения температуры бетона биологической защиты Нововоронежской АЭС в процессе строительства и эксплуатации реактора в различных сечениях по высоте и толщине конструкции было установлено более 100 хромель-копелевых термомпар.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ изложены результаты испытаний колец и цилиндрического образца при кратковременной и длительном нагреве.

Первые трещины в растянутой зоне бетона со стороны наруж-

ной поверхности возникали при приведенном температурном перепаде 30-36°C.

Процесс трещинообразования, характеризующийся количеством трещин в бетоне, их шириной раскрытия и характером развития, существенно зависел от коэффициента армирования и размера образцов. Так при температуре внутренней поверхности бетона 100°C в малых образцах диаметром 1,5 м с коэффициентом армирования $\mu = 0,1\%$ со стороны их наружной поверхности было обнаружено всего три вертикальные трещины с максимальным раскрытием 0,5 мм. При той же температуре бетона и коэффициентах армирования $\mu = 0,2-0,3\%$ количество трещин увеличилось до 8, при $\mu = 0,6; 1,2\%$ до 12-16 шт. Ширина раскрытия трещин была меньше 0,3 мм. Количество трещин в большом кольцевом образце диаметром 3 м было примерно в 1,5 раза больше, чем в малом, а ширина их раскрытия отличалась незначительно.

Следует отметить, что образование трещин в образцах при их нагреве имело ступенчатый характер. После появления первых трещин образование новых трещин прекращалось на некоторое время, вследствие резкого уменьшения температурного момента в результате падения жесткости кольца. Только после увеличения температурного перепада при дополнительном повышении температуры бетона возникали новые трещины, располагавшиеся равномерно по периметру образца. С уменьшением коэффициента армирования образцов возрастала неравномерность распределения деформаций растяжения кольцевой арматуры, установленной вблизи их наружной поверхности. Чем меньше коэффициент армирования, тем больше "пики" на кривых деформаций в местах образования первых трещин и больше зона влияния трещин на деформации арматуры. В слабоармированных образцах ($\mu \leq 0,3\%$) арматура на участках между

трещинами деформировалась незначительно.

При остывании образцов после их первого нагрева до 100°C деформации арматуры и раскрытие трещин уменьшались. При осмотре образцов, после их остывания, трещин на их внутренней поверхности не было обнаружено. При повторном нагреве образцов до 300°C сначала происходило раскрытие и развитие ранее образовавшихся при первом нагреве трещин, и только при температуре внутренней поверхности 230°C появлялись новые трещины. После остывания образцов на их внутренней поверхности были обнаружены трещины, образовавшиеся в результате температурной усадки бетона.

Анализ возникновения и развития трещин показал, что при одностороннем нагреве до 100°C образцы работали в стадии незаконченного процесса трещинообразования. Эта стадия, особенно в образцах с коэффициентом армирования $\mu \leq 0,3\%$, характеризуется сравнительно малым количеством трещин и большими участками нетреснувшего бетона, что приводило к крайне неравномерному распределению деформаций арматуры по периметру образцов. Температурные усилия в слабоармированных образцах при сравнительно небольших перепадах температуры оказались недостаточными для того, чтобы вызывать дальнейшее растрескивание оставшихся целых частей бетона. С повышением температуры нагрева и увеличением коэффициента армирования процесс трещинообразования в образцах достигал стадии завершения. При этом деформации арматуры распределялись по периметру образцов более равномерно. При возникновении первых трещин происходит переход от работы образца в первой стадии, характеризующейся восприятием растягивающих усилий бетоном, к работе во второй стадии с передачей усилия в основном кольцевой арматуре. В сечении с трещиной

резко понижается жесткость образца, причем это снижение зависит от коэффициента армирования; чем меньше μ , тем больше снижение жесткости. С понижением общей жесткости уменьшаются усилия в кольцевой арматуре, что выражается в уменьшении деформаций в сечениях вдали от трещин. Этим объясняется тот факт, что после образования первых трещин процесс трещинообразования на некоторое время прекращается пока повышение температуры при пониженной жесткости не приведет к увеличению температурных усилий. После образования новых трещин происходит дополнительное снижение жесткости и так повторяется несколько раз до завершения процесса трещинообразования.

Отмечается значительное различие в деформациях растяжения кольцевой арматуры в большом и малых образцах с одинаковыми коэффициентами армирования при их первом нагреве до 100°C с различной скоростью. Деформации арматуры больше в образце с медленным нагревом. Различные значения деформаций арматуры при одинаковых температурных перепадах в образцах с медленным и быстрым подъемом температур объясняется различным распределением температур по сечению образцов. В образце с быстрым нагревом распределение температур более криволинейно и возникающая криволинейности распределения температур внутренние напряжения сжатия на поверхности образца снижают деформацию растяжения арматуры. В образце с медленным нагревом распределение температур приближается к прямолинейному и напряжения почти полностью отсутствуют. Следует отметить, что после образования трещин внутренние напряжения в сечениях с трещиной пропадают, а большие участки образца, работающие без трещин, продолжают испытывать внутреннее напряженное состояние. Поэтому на этих участках эффект уменьшения деформаций арматуры после образова-

ния трещин остается, что и отражается на значениях средних деформаций.

При нагреве до 100°C процесс трещинообразования в образцах не заканчивался полностью. При принятии постоянной по периметру образца жесткости для образца с трещинами температурный момент M_t в слабоармированных образцах с $\mu \leq 0,3\%$ становится меньше момента трещинообразования $M_{от}$ вследствие значительного снижения жесткости после появления трещин. Это не позволяло пользоваться обычной формулой для определения коэффициента ψ_a , значения которого в этом случае становятся отрицательными, что противоречит физическому смыслу. Поэтому определить теоретические значения средних деформаций арматуры, используя методику расчета с постоянной по периметру жесткостью B , в слабоармированных образцах не представлялось возможным.

При определении температурного момента в слабоармированных образцах ($\mu \leq 0,3\%$) в стадии незаконченного процесса трещинообразования нельзя принимать жесткость сниженной по всему периметру образца, как для сечения с трещинами, так как трещин мало и имеются достаточно большие участки нетреснувшего бетона. Поэтому предлагается при определении M_t принимать жесткость как в сечении с трещиной, только на определенных участках в зоне влияния трещин, а на остальных участках, где трещин нет - принимать жесткость как в образце без трещин, т.е. учитывать переменную жесткость по периметру образца при постоянном температурном моменте.

Учет переменной по длине элемента жесткости нашел применение в работах С.В.Александровского, С.М.Крылова и для элементов, работающих в условиях повышенных температур - в работах В.Н.Самойленко, Г.Ф.Гитман, А.А.Бородина.

В данном случае в соответствии с количеством трещин, образовавшихся на различных этапах нагрева, периметр образца разбивался на участки с трещинами, для которых жесткость определялась как для сечения с трещинами, и на участки без трещин - с жесткостью, вычисляемой как для сплошного тела. Каждый участок зоны влияния трещины принимался длиной равной теоретическому значению l_r , вычисленному по формуле СНиП П-В.7-67. Затем с учетом переменной по периметру образца жесткости, используя метод сил строительной механики вычисляли температурный момент. Поскольку в статически неопределимых железобетонных конструкциях момент и жесткость взаимосвязаны, задача сводилась к использованию метода последовательных приближений, выполнявшегося с помощью электронно вычислительной машины системы "Урал".

По предлагаемой методике были определены теоретические температурные моменты и деформации арматуры всех образцов с $\mu \leq 0,3\%$. При учете особенностей деформирования слабоармированных образцов теоретические средние деформации кольцевой арматуры хорошо согласуются с опытными. Теоретические значения деформаций при постоянной жесткости были определены только в образцах с $\mu = 0,6$ и $\mu = 1,2\%$, так как в этих образцах трещин образуется значительно больше и снижение жесткости в сечении с трещиной, а следовательно, и температурного момента было значительно меньше, чем в слабоармированных образцах. Кроме того, при постоянной жесткости были определены деформации во всех образцах при их нагреве до 300°C , т.к. процесс трещинообразования заканчивался.

Ширину раскрытия трещин можно определять по обычной формуле, причем для элементов с $\mu \leq 0,3\%$ значения σ_a и ψ_a нужно

вычислять с учетом переменной по периметру жесткости.

Анализ опытных деформаций и перемещений стенки цилиндрического образца с днищем и сопоставление их с теоретическими показали, что с достаточной точностью определение температурных усилий в цилиндрической железобетонной конструкции можно выполнять при действительной характеристике жесткости, пользуясь известными зависимостями изгиба цилиндрической оболочки при различных условиях загрузки равномерно распределенных по периметру краевых усилий. Краевые усилия при этом определяются методами строительной механики при соответствующих значениях температурных перемещений.

Длительные испытания цилиндрического образца с днищем при нагреве до 100°C показали, что деформации арматуры за период тридцать суток при температурном перепаде по толщине образца в 56°C уменьшились приблизительно на 20-30%. Это объясняется проявлением усадки и ползучести бетона при длительном нагреве. За время длительной выдержки ширина раскрытия трещин уменьшается вдвое, от первоначально замеренной, на вторые сутки нагрева. Использование при определении теоретической деформации арматуры опытных значений коэффициента упругости бетона $\nu_{\text{пл}}$ в формуле жесткости для различных моментов времени позволило получить удовлетворительную сходимость опытных и теоретических значений средних деформаций кольцевой арматуры.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ изложены результаты обследования натурной конструкции биологической защиты при бетонировании, твердении бетона на Нововоронежской АЭС и в период пуска и эксплуатации атомного реактора. Кроме этого приводится анализ изменения температурного момента с учетом пол-

зучести бетона в период прогрева конструкции до стационарного распределения в течение 30 суток температур.

В период твердения бетон в железобетонной конструкции биологической защиты атомного реактора может нагреваться вследствие экзотермии цемента до 60°C . Максимальный нагрев бетона был через 60-80 часов после начала бетонирования. При такой температуре разогрева бетона возможно образование трещин на поверхности конструкции и поэтому при проектировании необходимо учитывать возникновение напряженного состояния в конструкции в период строительства до приложения эксплуатационной нагрузки.

Сопоставление опытных и вычисленных температур бетона в различные время после начала бетонирования показало, что для оценки напряженного состояния конструкции от экзотермии цемента распределение температуры можно определять по методу С.В.Александровского.

Исследование температурных полей в конструкции биологической защиты АЭС подтвердило, что решая вопрос трещиностойкости массивных железобетонных конструкций при их проектировании, необходимо предусматривать мероприятия по снижению вынужденных температурных напряжений, возникающих до приложения эксплуатационной нагрузки. Наряду с конструктивными и производственными мероприятиями особое внимание следует уделять уменьшению внутреннего тепловыделения бетона технологическими мерами.

В результате натурного обследования установлено, что в период пуска реактора в эксплуатацию конструкция защиты нагревается незначительно. В зонах на уровне кольцевого бака с охлаждением температура бетона доходит до 40°C . Причем распределение температур по толщине сечения близко к прямолинейному закону и перепад температур не превышает 10°C . Конструкции за-

щиты ниже кольцевого бака нагреваются более значительно. В период работы реактора максимальная температура бетона на расстоянии 60 см от внутренней поверхности была 84°C , при этом наружная поверхность нагревалась до 30°C , а внутренняя - до 60°C и приведенный температурный перепад не превышал 60°C . Бетон на уровне трубопроводов теплоносителя нагревался до 80°C .

В период пуска и полугодовой эксплуатации атомного реактора установленное распределение температур по толщине биологической защиты, которое может быть использовано для определения температурных усилий при дальнейшем проектировании станций с аналогичным режимом.

Прогрев конструкции защиты толщиной 3,5 м до стационарного потока тепла длится более месяца. К моменту установления стационарного распределения температур в значительной степени проявляется ползучесть бетона, а следовательно, произойдет релаксация температурных напряжений. По данным автора, а также в работах А.Ф.Милованова, Н.И.Тупова, С.И.Рыжовой, А.С.Лычева и др. основная часть ползучести бетона при повышенной температуре проявляется в первые 20 суток. Особенности расчета бетонных и железобетонных конструкций, работающих в условиях неравномерного нагрева с учетом ползучести бетона рассмотрены в работах П.И.Маслова, Н.Х.Арутюняна, Н.Е.Прокоповича, С.В.Александровского, а применительно к ограждающим конструкциям ядерных реакторов в работе И.И.Гольденבלата и Н.А.Николаенко.

Основываясь на положениях, изложенных в этих работах, и, используя для определения меры ползучести опытные данные, полученные при испытании призм были определены теоретические температурные усилия, возникающие в период прогрева 3-х метровой конструкции защиты. Температурные усилия, вычисленные с

учетом ползучести бетона, достигают максимальной величины через 6 суток после начала нагрева конструкции и составляет примерно 70% от усилий, подсчитанных без учета ползучести бетона. В процессе дальнейшего прогрева до стационарного распределения температур по сечению температурные усилия продолжали понижаться из-за ползучести бетона и к 30 суткам составляли уже примерно 55% от момента без учета ползучести, что должно учитываться при подборе армирования конструкции защиты.

Общие выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Первые трещины в толстостенных элементах кольцевого сечения появляются при приведенном температурном перепаде по толщине стенки равном $30-36^{\circ}\text{C}$ независимо от коэффициента армирования и размеров сечения.
2. Образцы при одностороннем нагреве до 100°C работают в стадии незаконченного процесса трещинообразования. Эта стадия, особенно в образцах с $\mu \leq 0,3\%$, характеризуется малым количеством трещин и большими участками нетреснувшего бетона, что приводит к крайне неравномерному распределению деформаций арматуры по периметру. С повышением температуры и увеличением армирования процесс трещинообразования в образцах достигает стадии завершения. При этом деформации арматуры распределяются по периметру образцов более равномерно.
3. Средние деформации растяжения кольцевой арматуры при одной и той же полноте эпюры распределения температур по сечению стенки и температурном перепаде не зависят от размеров образца.

4. Определение температурных усилий при расчете по раскрытию трещин элементов кольцевого сечения с $\mu \leq 0,3\%$ при нагреве до 100°C , т.е. в стадии незаконченного процесса трещинообразования, необходимо производить с учетом переменной по периметру жесткости. В стадии законченного процесса трещинообразования, наступающей при нагреве образцов до температуры более 100°C , температурные усилия можно определять при постоянной по периметру жесткости, вычисляемой с учетом наличия трещин в растянутой зоне бетона.

5. Для определения температурных усилий в зоне сопряжения стенки цилиндра с дном можно использовать без существенной погрешности известное решение краевой задачи, применяемой при расчете полубесконечной цилиндрической оболочки.

6. Расчетный температурный момент в вертикальных и в горизонтальных сечениях защиты можно снижать примерно на 30% за счет ползучести бетона в период прогрева конструкции, примерно на 15% при расчете на нестационарное и на 30% при расчете на стационарное распределение температуры по сечению.

7. Элементы кольцевого сечения, работающие при нагреве до 300°C , необходимо армировать с внутренней стороны для ограничения ширины раскрытия трещин при остывании.

8. При проектировании конструкции биологической защиты необходимо предусматривать конструктивные, технологические и производственные мероприятия по снижению вынужденных растягивающих температурных напряжений, вызванных разогревом бетона от экзотермии цемента в процессе строительства. Для определения максимальной величины температуры разогрева бетона и характера ее изменения во времени при оценке напряженного состояния конструкции следует пользоваться методом проф. С.В.Александровского.

Основные материалы данного исследования были опубликованы в следующих работах:

1. К вопросу об экзотермии бетона, "Новое в технологии бетона и железобетона", Тезисы докладов и сообщений IУ научно-технической конференции молодых научных сотрудников, М., 1967.

2. Железобетонные конструкции в цехах с повышенным тепловыделением, Издательство литературы по строительству, М., 1970.

3. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонного цилиндра с дном при нагреве, "Строительная механика и расчет сооружений", № 6, 1970.