

На правах рукописи



**Зоалкфл Даниаль Аммарович**

**НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ  
МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В СТАДИИ ВОЗВЕДЕНИЯ**

2.1.9. Строительная механика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание

ученой степени кандидата технических наук

Грозный — 2025

Работа выполнена в лаборатории металлов, сплавов и композиционных материалов федерального государственного бюджетного учреждения науки Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук.

Научный руководитель: **Языев Сердар Батырович** – доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы", профессор, заведующий кафедрой «Технологий строительства и конструкционных материалов» (2.1.9)

Официальные оппоненты: **Федосов Сергей Викторович** – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет (НИУ МГСУ), профессор, кафедры "Технологии и организация строительного производства" (05.17.08.)

**Акопян Владимир Феликсович** – кандидат технических наук, ФБГОУ ВО «Донской государственной технической университет», доцент кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» (05.23.17)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

Защита состоится 30 мая 2025 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.295.01 при ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» по адресу: 367026, г. Махачкала, пр. Шамиля, 70, ауд. 202 (диссертационный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» <http://www.dstu.ru>.

Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования РФ <http://vak3.ed.gov.ru>.

Дата рассылки автореферата 28 апреля 2025 г

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



Ханзада Рауповна  
ЗАЙНУЛАБИДОВА

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Толстостенные цилиндрические оболочки являются одним из широко используемых типов массивных железобетонных конструкций. Они применяются в гидротехнических сооружениях, защитных конструкциях реакторов АЭС, пусковых установках ракетных комплексов и т.д. К таким конструкциям, как правило, предъявляются повышенные требования по трещиностойкости, и наличие в них начальных трещин, образовавшихся на стадии изготовления, недопустимо.

Массивность конструкции предопределяет необходимость разработки специальных технологических решений по регулированию параметров тепло- и массообмена, темпа бетонирования, а также подбору рецептуры бетонных смесей для исключения риска раннего трещинообразования. Выбор рациональных технологических решений может быть осуществлен на основе методов компьютерного моделирования. Решение задачи определения напряженно-деформированного состояния в массивных монолитных железобетонных конструкциях в процессе возведения требует расчета нестационарного температурного поля при наличии внутренних источников тепловыделения, а также учета при расчете внутренних напряжений таких факторов, как ползучесть и усадка бетона, зависимость характеристик материала от времени и температуры, послойность изготовления конструкции.

**Степень разработанности проблемы.** Исследованию температурных полей и напряжений при возведении массивных монолитных конструкций посвящены работы С.В. Федосова, В.И. Андреева, В.Т. Ерофеева, А.А. Гвоздева, И.Е. Прокоповича, В.С. Лукьянова, И.Д. Запорожца, С.В. Александровского, А.Г. Тамразяна, Г.В. Несветаева, Н.А. Анискина, А.В. Бушмановой, Y. Zhao, M. Zhang, W. Klemczak и др. Большинство публикаций по данной проблеме относится к массивным монолитным фундаментным плитам и стенам, для расчета которых применяются упрощенные методики. Для толстостенных цилиндрических оболочек такая задача ранее не ставилась.

Проблемой определения температурных напряжений в неоднородных толстостенных цилиндрических оболочках занимались такие ученые, как С.Г. Михлин, В.А. Ломакин, С.В. Федосов, В.И. Андреев, В.Т. Ерофеев, Р.А. Турусов, Б.М. Языев, С.В. Литвинов, Ю.Ф. Козельский, Э.К. Агаханов, А.С. Чепурненко и др. Указанные авторы не исследовали напряженно-

деформированное состояние монолитных конструкций в стадии возведения, однако имеющийся в их работах аппарат может быть адаптирован к решению рассматриваемой проблемы.

**Цель диссертационной работы** — разработка алгоритмов определения температурных полей, а также напряженно-деформированного состояния в толстостенных цилиндрических оболочках в процессе возведения с учетом неоднородности теплофизических и механических свойств, вызванной теплом гидратации.

**Объект исследования:** толстостенные цилиндрические оболочки из монолитного железобетона.

**Предмет исследования:** напряженно-деформированное состояние монолитных толстостенных цилиндрических оболочек на стадии возведения, обусловленное неравномерным нагревом за счет тепла гидратации цемента и теплообмена с окружающей средой, а также деформаций усадки бетона.

**Задачи исследования:**

- выбор основных соотношений модели, определяющих изменение во времени механических характеристик бетона, а также ее валидация путем сравнения с экспериментальными данными;
- разработка методики определения нестационарных температурных полей при возведении толстостенных цилиндрических оболочек с учетом зависимости коэффициента теплопроводности бетона от степени его гидратации, а также стадийности возведения конструкции;
- разработка алгоритмов расчета напряженно-деформированного состояния при возведении толстостенных цилиндрических оболочек в одномерной осесимметричной постановке;
- разработка алгоритмов расчета напряжений, возникающих в процессе твердения в массивных монолитных конструкциях в двумерной осесимметричной постановке.

**Научная новизна работы:**

- впервые исследовано влияние неоднородности, вызванной зависимостью коэффициента теплопроводности бетона от степени его гидратации, на результирующие температурные поля при возведении толстостенных цилиндрических оболочек;

- проведено исследование влияния технологических перерывов между укладкой слоев на величину максимальной температуры в объеме конструкции, а также перепада температур между ее центром и поверхностью;
- предложен оригинальный подход к определению напряженно-деформированного состояния трехслойной толстостенной оболочки в процессе возведения;
- впервые решена задача определения напряженно-деформированного состояния при бетонировании массивных монолитных конструкций с учетом послойности возведения.

#### **Теоретическая значимость работы:**

- показано, что эффектами ползучести при определении напряженно-деформированного состояния массивных монолитных конструкций на стадии возведения можно пренебречь;
- установлено, что при определении температурных полей, возникающих при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек, зависимость коэффициента теплопроводности бетона от степени его гидратации можно не учитывать;
- показано, что учет послойности возведения конструкции приводит к незначительному изменению максимальных температур в объеме, максимального перепада между центром и поверхностью конструкции, а также максимальных величин напряжений;
- установлены существенные различия в результатах расчета при постоянном модуле упругости бетона во времени, а также в случае учета зависимости физико-механических характеристик материала от степени зрелости.

**Практическое значение работы:** разработанные алгоритмы реализованы в виде пакета прикладных программ в среде MATLAB, который позволяет путем численного моделирования выбрать оптимальные параметры теплообмена на поверхностях конструкции, а также параметры кинетики тепловыделения бетона для снижения риска раннего трещинообразования конструкций.

**Методы исследования.** Исследование базируется на современных методах строительной механики и теории упругости неоднородного тела. Анализ выполняется при помощи численных методов, а именно метода конечных разностей и метода конечных элементов, реализованных автором в среде

MATLAB. Для расчетов во временной области применяется явная схема интегрирования по времени на основе метода Эйлера.

**Внедрение результатов работы.** Разработанные автором программные продукты и рекомендации используются в практике проектирования института ООО «Севкавнипиагропром».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- основные соотношения модели, определяющие зависимость физико-механических характеристик бетона от степени его зрелости и апробация модели на экспериментальных данных для образцов, твердеющих при 100% ограничении деформации;
- алгоритмы расчета температурных полей при возведении осесимметричных массивных монолитных конструкций с учетом зависимости коэффициента теплопроводности бетона от степени гидратации, а также с учетом стадийности возведения конструкций;
- алгоритмы определения напряженно деформированного состояния при возведении однослойных и трехслойных толстостенных цилиндрических оболочек из монолитного железобетона в одномерной осесимметричной постановке;
- алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния при возведении осесимметричных массивных монолитных конструкций в двумерной постановке и практические рекомендации по уменьшению риска раннего трещинообразования.

**Достоверность результатов** обеспечивается: строгой математической постановкой задачи, проверкой выполнения граничных условий, дифференциальных и интегральных соотношений; сравнением результатов с экспериментальными данными других авторов; сравнением с результатами расчета в верифицированном программном комплексе ANSYS.

**Апробация работы.** Результаты исследования докладывались на Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Ростов-на-Дону, 2023), международных научно-практических конференциях International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2023 (г. Новосибирск), Строительство и архитектура – 2024 (г. Ростов-на-Дону).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах, из них в ведущих рецензируемых изданиях, определенных ВАК РФ – 4, в изданиях, входящих в международные реферативные базы Scopus/Web of Science – 1. Получено авторское свидетельство на программу для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложений. Изложена на 111 страницах машинописного текста и содержит 66 рисунков и 2 таблицы.

**Соответствие работы паспорту научной специальности.** В соответствии с паспортом специальности ВАК 2.1.9. Строительная механика работа включает следующие области исследований:

- п. 2: «Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета»;
- п. 4: «Численные и численно-аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях».

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы и выбор направления исследования, сформулированы цели и задачи, основные положения, приведена краткая аннотация всех глав работы.

**В главе 1** представлен литературный обзор по выбранному направлению исследования, в котором рассматриваются механизмы раннего трещинообразования, а также существующие методики расчета температурных полей и напряжений при возведении массивных монолитных конструкций. Также представлены основные соотношения расчетной модели, определяющие зависимость физико-механических характеристик бетона от степени его зрелости  $C_m$  (Concrete maturity), записываемой в виде интеграла:

$$C_m(t) = \int_0^t T(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $T(\tau)$  – температура бетона в момент времени  $\tau$ .

Предел прочности бетона при сжатии  $R$  в момент времени  $t$  определяется по эмпирической формуле, предложенной Г.В. Несветаевым:

$$\frac{R}{R_{28}} = \exp\left(0,35 \left[1 - \left(\frac{15800 - 122,5\bar{T}}{\bar{T}t}\right)^{0,55}\right]\right), \quad (2)$$

где  $R_{28}$  – прочность бетона в возрасте 28 суток,  $\bar{T} = 3Б/t$ ,  $t$  – возраст бетона в часах.

Модуль упругости бетона в возрасте более 1 суток определяется как функция от прочности при сжатии:

$$E(R) = 1000 \frac{0,04R + 57}{1 + \frac{29}{3,8+0,8R}}, \text{ МПа} \quad (3)$$

При  $t \leq 24$  ч зависимость модуля упругости от времени представляется уравнением вида:

$$E(t) = E_{24} \cdot \exp\left(1,348 \left[1 - \left(\frac{24}{t}\right)^{1,438}\right]\right). \quad (4)$$

где  $t$  – время в часах,  $E_{24}$  модуль упругости бетона после 1 суток твердения, вычисленный на основе формул (2)-(3) с учетом времени и температуры твердения.

Для деформаций усадки бетона  $\varepsilon_{sh}$  нами используется явная зависимость от времени:

$$\varepsilon_{sh}(t) = -(0,2B - 2)(a \ln t - b) \cdot 10^{-5} \leq 0, \quad (5)$$

где  $B$  – класс бетона (МПа),  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты.

Прочность бетона на растяжение  $R_t$  принимается функцией от прочности на сжатие:

$$R_t = 0,29 \cdot R^{0,6}. \quad (6)$$

Валидация используемых соотношений выполнена на экспериментальных данных, представленных в отчете COIN Project норвежских ученых. В указанной работе твердение образцов происходило при полном ограничении на их деформацию, и при этом выполнялись замеры температуры и напряжений в различные моменты времени. Испытания проводились для образцов с прочностью в проектном возрасте 28 сут  $R_{28} = 80$  МПа. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

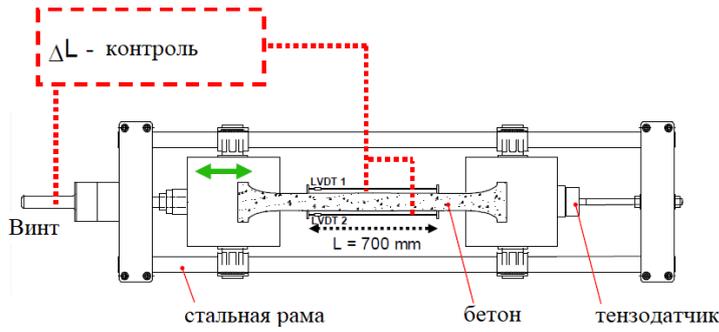


Рисунок 1 – Схема испытаний, проведенных в COIN Project

$$\varepsilon_{cr} = - \int_{\tau_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (7)$$

Мера ползучести принималась в виде:

$$C(t, \tau) = \frac{\varphi(\tau)}{E(t)} (1 - e^{-\gamma(t-\tau)}), \quad (8)$$

$$\varphi(\tau) = \frac{8000}{(E(\tau))^{0,785}}, \gamma = 0,05 \text{ сут}^{-1}.$$

Значения  $E(\tau)$  в формулу (8) следует подставлять в МПа.

На рис. 2 приведено сравнение значений напряжений в различные моменты времени, полученных экспериментально, с результатами численного моделирования с использованием соотношений (1)-(5) и (7)-(8). Штриховой линией на данном графике показано решение без учета деформаций ползучести, а штрихпунктирной – без учета ползучести и усадки.

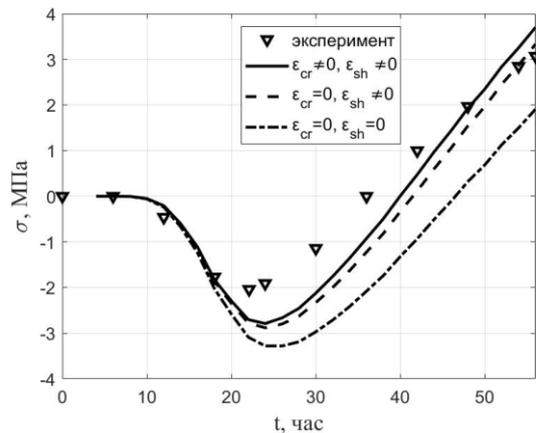


Рисунок 2 – Сравнение результатов эксперимента с результатами расчета

Из рис. 2 видно удовлетворительное совпадение результатов эксперимента с теорией. Также представленные на рис. 2 графики показывают, что влияние ползучести в рассматриваемых временных диапазонах несущественно, и ей можно пренебречь. В то же время деформациями усадки бетона пренебрегать нельзя. В дальнейших расчетах ползучесть нами не учитывалась.

В главе 2 рассматриваются вопросы определения температурных полей при возведении толстостенных цилиндрических оболочек в одномерной и двумерной постановке. Исследуется влияние зависимости коэффициента

При моделировании эксперимента помимо деформаций усадки бетона нами учитывалась его ползучесть. Деформация ползучести определялась по формуле:

теплопроводности бетона  $\lambda$  от степени гидратации  $\xi$  на результирующие температурные поля. Зависимость  $\lambda(\xi)$  принимается в виде:

$$\lambda(\xi) = \lambda_{\infty}(1,33 - 0,33\xi). \quad (9)$$

Степень гидратации определяется из дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = f(\xi) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (10)$$

где  $E_a$  – энергия активации,  $R$  – универсальная газовая постоянная, а функция  $f(\xi)$  определяется эмпирической формулой:

$$f(\xi) = \frac{m}{n_0} \left( \frac{A}{m\xi_{\infty}} + \xi \right) (\xi_{\infty} - \xi) \exp\left(-\frac{\bar{n}\xi}{\xi_{\infty}}\right). \quad (11)$$

Здесь  $A_0$ ,  $m$ ,  $n_0$  и  $\bar{n}$  – постоянные материала, зависящие от типа цемента.

Решение задачи теплопроводности с учетом зависимости коэффициента теплопроводности бетона от степени гидратации выполняется методом конечных элементов. При конечно-элементной дискретизации дифференциальное уравнение теплопроводности сводится к системе дифференциальных уравнений:

$$[C] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + [K]\{T\} + \{F\} = 0, \quad (12)$$

где  $[C]$  – матрица демпфирования,  $\{T\}$  – вектор узловых значений температуры,  $[K]$  – матрица теплопроводности,  $\{F\}$  – вектор нагрузки, содержащий вклад внутренних источников тепловыделения и условий окружающей среды.

При аппроксимации производной температуры по времени в форме метода Эйлера система дифференциальных уравнений (12) на каждом шаге по времени сводится к системе линейных алгебраических уравнений:

$$\left( [K] + \frac{[C]}{\Delta t} \right) \{T\} = \frac{[C]}{\Delta t} \{T_{t-\Delta t}\} - \{F\}. \quad (13)$$

Для нахождения степени гидратации в каждый момент времени также можно использовать аппроксимацию по Эйлеру.

Для анализа влияния изменения коэффициента теплопроводности бетона в зависимости от степени гидратации на результирующее температурное поле была решена тестовая задача в одномерной осесимметричной постановке для толстостенного цилиндра при следующих исходных данных: плотность бетона  $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость  $c = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ , коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхности  $h_a = h_b = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , температура среды и начальная температура бетонной смеси  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , внутренний радиус цилиндра  $a = 1,5 \text{ м}$ , внешний радиус  $b = 2,38 \text{ м}$ , предельное

значение коэффициента теплопроводности бетона при степени гидратации  $\xi = 1$ :  $\lambda_{\infty} = 2,67$  Вт/(м · К). Константы в функции (11) и уравнении (10):  $\xi_{\infty} = 0,96$ ,  $\bar{n} = 6$ ,  $A/m = 10^{-5}$ ,  $m/n_0 = 0,35 \cdot 10^8$  час<sup>-1</sup>,  $E_a/R = 5000$  К.

Функция изменения во времени количества теплоты, выделяемого 1 м<sup>3</sup> бетона в процессе твердения, принималась в виде:

$$Q(t) = Q_{28} \cdot \exp \left[ k \cdot \left( 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^x \right) \right], \quad (14)$$

где  $t$  – время в сутках.

Расчет выполнялся при  $Q_{28} = 130$  МДж/м<sup>3</sup>,  $k = 0,13$ ,  $x = 0,42$ .

Решение производилось при помощи разработанной автором программы на основе метода конечных элементов в среде MATLAB с учетом зависимости коэффициента теплопроводности бетона от степени гидратации, а также методом конечных разностей при  $\lambda(r, t) = const$ . Помимо этого, для контроля достоверности результатов выполнялось двумерное конечно-элементное моделирование в программном комплексе ANSYS. В указанном программном комплексе невозможно заложить зависимость (9).

На рис. 3 приведены графики изменения во времени максимальной температуры в цилиндре, а также температур у внутренней и внешней поверхности. Сплошным линиям соответствует решение с учетом зависимости коэффициента теплопроводности от степени гидратации, а штриховым – при  $\lambda(r, t) = const$ . При расчете методом конечных разностей с постоянным коэффициентом теплопроводности результаты совпали с решением в ANSYS.

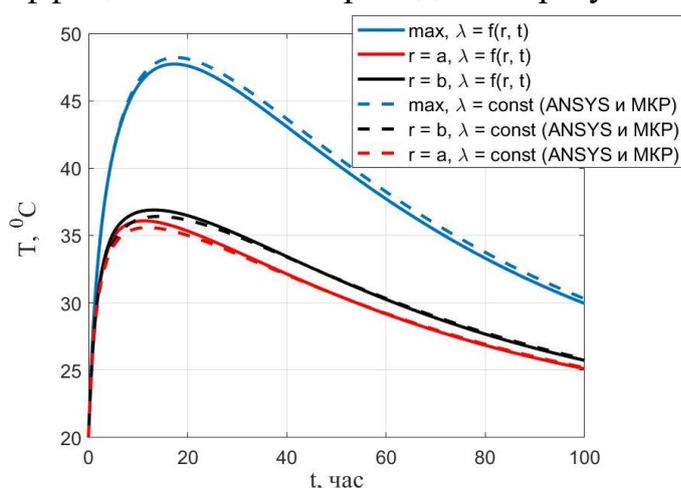


Рисунок 3 – Изменение во времени максимальной температуры, температуры у внутренней и внешней поверхности цилиндра

Из рис. 3 видно, что, несмотря на то, что с течением времени происходит изменение коэффициента теплопроводности примерно на 33%, влияние этого фактора на распределение температур в конструкции не столь существенно, и им можно пренебречь.

Также был выполнен расчет толстостенной цилиндрической оболочки в двумерной постановке совместно с изготовленным ранее фундаментом с учетом ее послойного бетонирования с технологическими перерывами. Конструкция бетонировалась тремя горизонтальными слоями высотой 1 м с перерывами  $t_{br}$ . Величина технологических перерывов варьировалась от 0 до 24 ч. Коэффициент теплоотдачи на боковых поверхностях принимался равным  $h = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а для верхней поверхности –  $h = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

На рис. 4 представлены полученные в результате расчета графики изменения во времени максимальной температуры, а также температуры на верхней поверхности при различной продолжительности перерыва между укладкой слоев  $t_{br}$ .

Из рис. 4 видно, что даже довольно длительные перерывы в бетонировании продолжительностью в сутки приводят к незначительному снижению максимальной температуры, а также максимального перепада температур между центром и поверхностью конструкции.

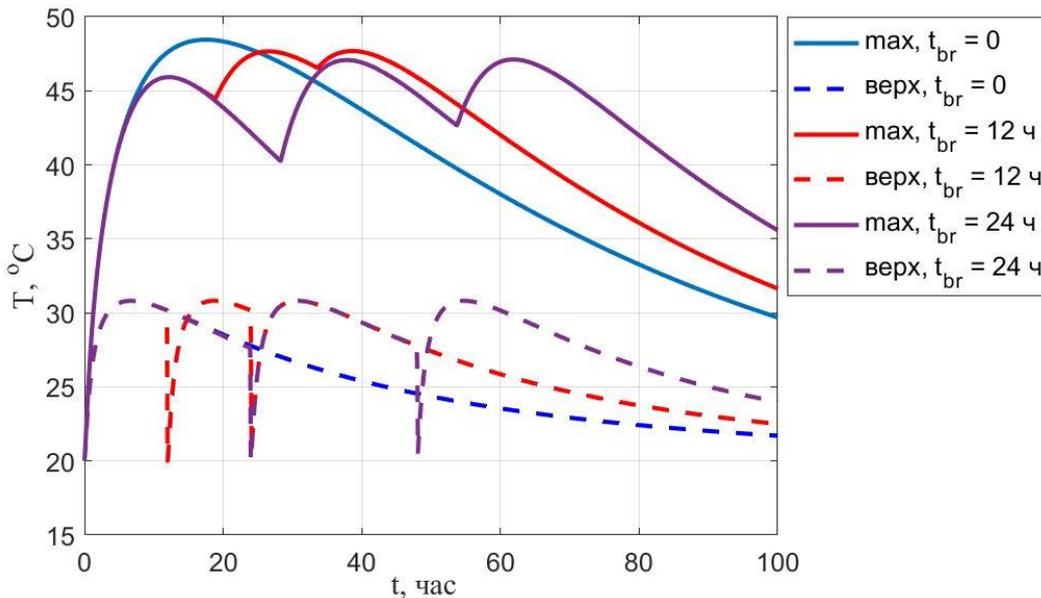


Рисунок 4 – Изменение во времени максимальной температуры, а также температуры на верхней поверхности при различной продолжительности перерывов между укладкой слоев

**Глава 3** посвящена вопросам определения напряженно-деформированного состояния при возведении толстостенных цилиндрических оболочек в одномерной осесимметричной постановке. Рассматривается случай плоского напряженного состояния (ПНС) и плоского деформированного состояния (ПДС).

В обоих случаях при наличии вынужденных деформаций  $\varepsilon_B$ , к которым относятся температурные деформации и деформации усадки, задача расчета радиально неоднородного цилиндра на каждом шаге по времени может быть сведена к дифференциальному уравнению второго порядка относительно приращения радиального напряжения  $\Delta\sigma_r$ :

$$\frac{d^2(\Delta\sigma_r)}{dr^2} + \varphi(r) \frac{d(\Delta\sigma_r)}{dr} + \psi(r)\Delta\sigma_r = \Delta f(r), \quad (15)$$

где  $\varphi(r) = \frac{3}{r} - \frac{1}{E} \cdot \frac{dE}{dr}$ ;  $\psi(r) = -\frac{1}{r} \left[ \frac{d\nu}{dr} + (1-\nu) \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{dE}{dr} \right]$ ,  $\Delta f(r) = -\frac{E}{r} \cdot \frac{d(\Delta\varepsilon_B)}{dr}$  для ПНС и  $\psi(r) = -\frac{1}{r} \left[ \frac{1-2\nu}{1-\nu} \cdot \frac{dE}{dr} \cdot \frac{1}{E} \right]$ ,  $\Delta f(r) = -\frac{E}{r(1-\nu^2)} \frac{d(\Delta\varepsilon_B)}{dr} (1+\nu)$  для ПДС.

Граничные условия для уравнения (15) имеют вид:

$$\Delta\sigma_r(a) = \Delta\sigma_r(b) = 0. \quad (16)$$

Приращение напряжения  $\sigma_\theta$  можно определить по формуле:

$$\Delta\sigma_\theta = r \frac{d(\Delta\sigma_r)}{dr} + \Delta\sigma_r. \quad (17)$$

Для плоской деформации приращения напряжения  $\sigma_z$  вычисляются по формуле:

$$\Delta\sigma_z = -E\Delta\varepsilon_B + \nu(\Delta\sigma_\theta + \Delta\sigma_r). \quad (18)$$

Решение уравнение (15) выполняется численно методом конечных разностей. Задачи определения температурных полей и напряженно-деформированного состояния решаются несвязно. Расчет напряжений во временной области выполняется после определения температурного поля пошагово. После определения приращений напряжений на каждом шаге они суммируются с напряжениями с предыдущего шага.

Помимо конечно-разностной реализации задачи в главе 3 рассматривается также ее конечно-элементное решение при помощи одномерных осесимметричных элементов (рис. 5).

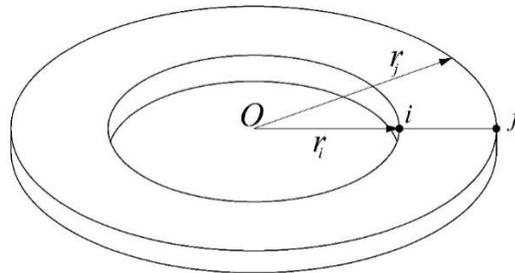


Рисунок 5 – Конечный элемент для расчета температурных полей и напряжений в одномерной осесимметричной постановке

Применительно к задаче определения напряжений на стадии возведения система уравнений МКЭ принимает вид:

$$[K]\{\Delta U\} = \{\Delta F_B\}, \quad (19)$$

где  $[K]$  – матрица жесткости,  $\{\Delta U\}$  – вектор приращений перемещений на шаге по времени,  $\{\Delta F_B\}$  – вектор приращений нагрузки, обусловленной вынужденными деформациями.

Первым этапом для контроля достоверности результатов был выполнен расчет толстостенной цилиндрической оболочки с исходными данными, приведенными выше, при постоянном во времени модуле упругости бетона  $E = 3 \cdot 10^4$  МПа с последующим сравнением решения с программным комплексом ANSYS. При моделировании в ANSYS на верхнем и нижнем торце цилиндра устанавливались закрепления от перемещений по вертикальной оси для создания условий плоской деформации.

На рис. 6 приведены графики изменения во времени напряжений  $\sigma_\theta$  у внешней поверхности, полученные путем расчета по авторской методике и в ANSYS. Расхождение результатов незначительное. Показано также решение при постоянном модуле упругости, но на основе температурного поля, определенного с учетом зависимости коэффициента теплопроводности бетона от степени гидратации. Учет этой зависимости приводит к небольшому снижению максимальных напряжений. При постоянном во времени модуле упругости температурные напряжения полностью обратимы.

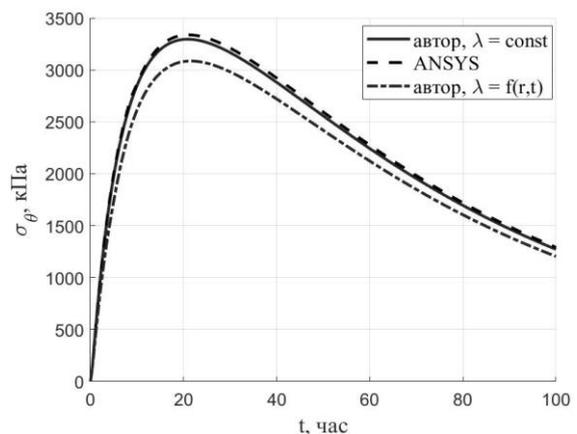


Рисунок 6 – Изменение во времени напряжений  $\sigma_\theta$  у внешней поверхности цилиндра при постоянном модуле упругости

При расчете с учетом зависимости физико-механических характеристик от степени зрелости класс бетона принимался равным В25 (прочность при сжатии в возрасте 28 сут  $R_{28} = 37$  МПа). В случае учета зависимости модуля упругости от времени по формулам (1)-(4) картина напряженно-деформированного состояния меняется кардинально. На рис. 7 приведены графики изменения окружных напряжений у внутренней и внешней поверхности, а также в середине толщи во времени. Штриховыми линиями показаны решения для случая плоского напряженного состояния. Из рис. 7 видно, что на начальном этапе у внутренней и внешней поверхности возникают небольшие растягивающие напряжения, но затем знак напряжений меняется, и в конечном итоге при  $r = a$

и  $r = b$  остаточные напряжения сжимающие, а в середине толщи – растягивающие.

На рис. 7 показан также график изменения во времени текущей прочности бетона на растяжение  $R_t$  в середине толщи. Для рассмотренного примера окружные напряжения не превышают прочность материала на растяжение.

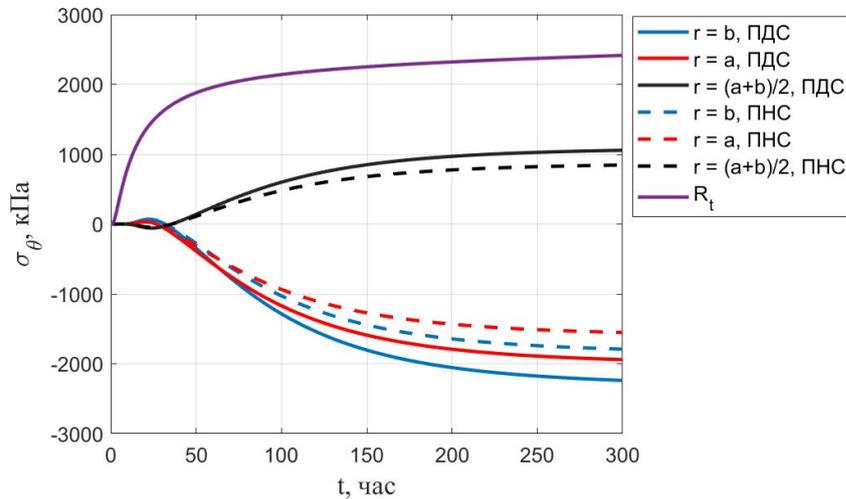


Рисунок 7 – Изменение во времени окружных напряжений с учетом зависимости модуля упругости бетона от степени его зрелости

Также в главе 3 рассмотрена задача расчета трехслойной цилиндрической оболочки, представляющей из себя стальной бак, заполненный бетоном (рис. 8).



Рисунок 8 – Трехслойная сухая защита реактора в процессе возведения

При расчете трехслойной цилиндрической оболочки принималось, что толщина стальных слоев мала по сравнению с общей толщиной конструкции. В силу относительно небольшой толщины стальных слоев, они не оказывают существенного влияния на распределение температурных полей в бетонной части

конструкции, но могут существенно повлиять на ее напряженно-деформированное состояние.

Из условия совместности окружных деформации бетона и стали на внутренней поверхности (при  $r = a$ ) для случая ПДС было получено следующее граничное условие:

$$\frac{1}{E_1} \left( a \frac{d(\Delta\sigma_r)}{dr} + \Delta\sigma_r(1 - \nu_1) \right) - \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \frac{\Delta\sigma_r \cdot a}{\delta_a} =$$

$$= (1 + \nu_s)\alpha_s\Delta T - (1 + \nu)(\alpha\Delta T + \Delta\varepsilon_{sh}), \quad (20)$$

где  $\alpha$  и  $\alpha_s$  – соответственно коэффициент линейного температурного расширения бетона и стали,  $\nu_1 = \nu/(1 - \nu)$ ,  $E_1 = E/(1 - \nu^2)$ ,  $E$  и  $E_s$  – соответственно модуль упругости бетона и стали,  $\nu$  и  $\nu_s$  – коэффициент Пуассона бетона и стали,  $\delta_a$  – толщина стальной оболочки при  $r = a$ .

Аналогичный вид имеет граничное условие при  $r = b$ . Расчет на каждом шаге по времени выполняется в два этапа. На первом этапе считается, что совместная работа бетона и стали обеспечивается как для внутренней, так и для внешней поверхности бетонного ядра. Определяются радиальные напряжения при  $r = a$  и  $r = b$ , и если на какой-либо из поверхностей после суммирования приращений напряжений с напряжениями из предыдущего шага они становятся положительными, граничные условия заменяются на

$$\Delta\sigma_r|_{r=a(r=b)} = 0, \quad (21)$$

после чего выполняется перерасчет.

При решении задачи методом конечных элементов тонкие стальные оболочки моделируются одноузловыми КЭ. Вклад одноузлового КЭ стальной оболочки в общую матрицу жесткости конструкции в случае ПДС записывается в виде:

$$K_i = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} \cdot \frac{2\pi\delta_i}{r_i}. \quad (22)$$

Вклад температурных деформаций одноузлового КЭ в вектор нагрузки при ПДС имеет вид:

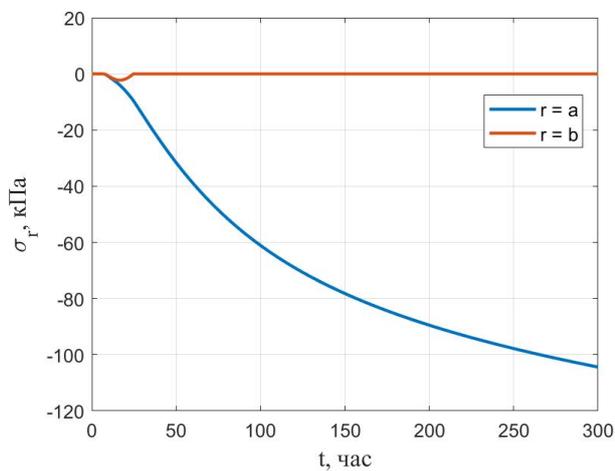
$$F_i = \frac{E_s}{1 - \nu_s} \alpha_s \Delta T \cdot 2\pi\delta_i. \quad (23)$$

Приведем пример расчета при  $a = 2,905$  м,  $b = 3,63$  м,  $\delta_a = \delta_b = 20$  мм. Указанные размеры соответствуют реальной конструкции сухой защиты реактора ВВЭР. Температура окружающей среды и коэффициенты теплоотдачи на боковых поверхностях приняты  $T_\infty = 20$  °С,  $h = 10$  Вт/(м<sup>2</sup> · К). Класс бетона В45 с  $R_{28} = 57$  МПа. Соответствующие параметры функции тепловыделения в случае быстротвердеющего бетона:  $Q_{28} = 190$  МДж/м<sup>3</sup>,  $k = 0,14$ ,  $x = 0,5$ .

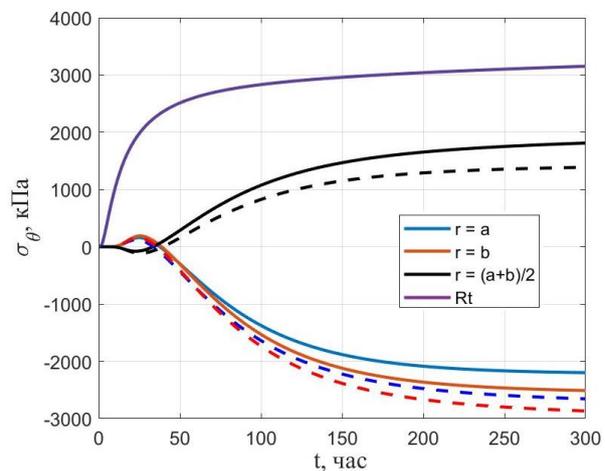
На рис. 9 показано изменение во времени радиальных напряжений при  $r = a$  и  $r = b$  для случая плоского деформированного состояния. Из данного рисунка видно, что на внешней поверхности контакт существует на небольшом

временном промежутке, когда наблюдается наиболее интенсивный рост температуры, и далее бетонное ядро и внешняя оболочка перестают работать совместно. У внутренней поверхности радиальные напряжения по абсолютному значению с течением времени возрастают. Объяснить это можно тем, что вследствие деформаций усадки бетонное ядро стремится обжать внутреннюю стальную оболочку.

На рис. 10 представлены графики изменения во времени окружных напряжений у внутренней и внешней поверхности, а также в середине толщи. Штриховыми линиями показано решение при отсутствии стальных оболочек. Наличие внутреннего и наружного стального слоя приводит к уменьшению по абсолютной величине остаточных напряжений  $\sigma_\theta$  у внутренней поверхности, однако возрастают окружные напряжения в середине толщи.



*Рисунок 9 – Изменение во времени радиальных напряжений у внутренней и внешней поверхности*



*Рисунок 10 – Изменение во времени окружных напряжений (штриховые линии – решение без учета стальных оболочек)*

В главе 4 изложены вопросы расчета НДС осесимметричных массивных монолитных конструкций в двумерной постановке. Решение выполняется методом конечных элементов с использованием треугольных и прямоугольных КЭ (рис. 11-12). Как и при решении в одномерной постановке, задача сводится к системе уравнений (19).

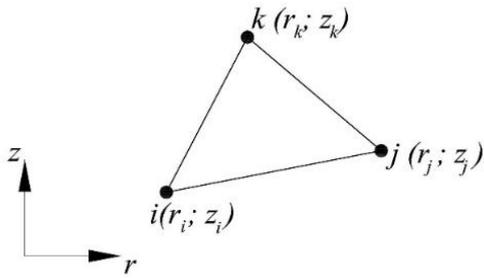


Рисунок 11 – Треугольный КЭ осесимметричной задачи

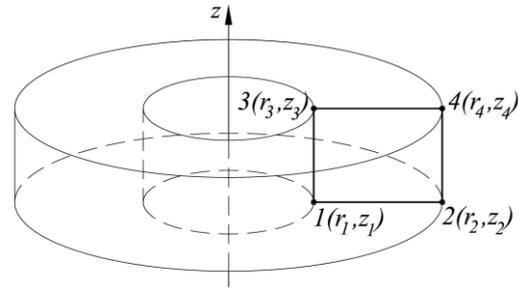


Рисунок 12 – Прямоугольный КЭ осесимметричной задачи

В главе 4 представлена задача расчета толстостенной цилиндрической оболочки при наличии внешнего ограничения на деформации, обусловленного примыканием к ранее изготовленному фундаменту, а также результаты расчета массивного монолитного фундамента ветрогенератора.

Для толстостенной цилиндрической оболочки расчет выполнялся при  $a = 1,5$  м,  $b = 2,38$  м. Высота цилиндра принималась равной  $H = 3$  м. При расчете с учетом зависимости физико-механических характеристик от времени бетон был принят классом В25, как для оболочки, так и для фундамента. Фундамент считался выполненным из старого бетона, модуль упругости которого принимался постоянным и равным  $3 \cdot 10^4$  МПа, а деформации усадки считались равными нулю.

На рис. 13 представлены графики изменения во времени максимальных окружных напряжений в цилиндрической оболочке. Сплошной линии соответствует глобальный максимум, штриховой – максимум в сечении  $z = 0$ , штрихпунктирной – в сечении  $z = H/2$ . Из рис. 13 видно, что характер кривой при  $z = H/2$  близок к решению в одномерной постановке для случая ПДС (рис. 7, черная линия). Однако данное сечение является не самым опасным.

Распределение остаточных напряжений  $\sigma_\theta$  в зависимости от  $r$  и  $z$  при  $t = 300$  ч приведено на рис. 14. Среднее значение прочности бетона при растяжении в этом возрасте составляет 1,49 МПа. Таким образом при рассмотренных условиях возможно образование технологических трещин в конструкции, которые в дальнейшем могут сказаться на ее эксплуатационных характеристиках, либо вообще поставить под вопрос возможность ее использования.

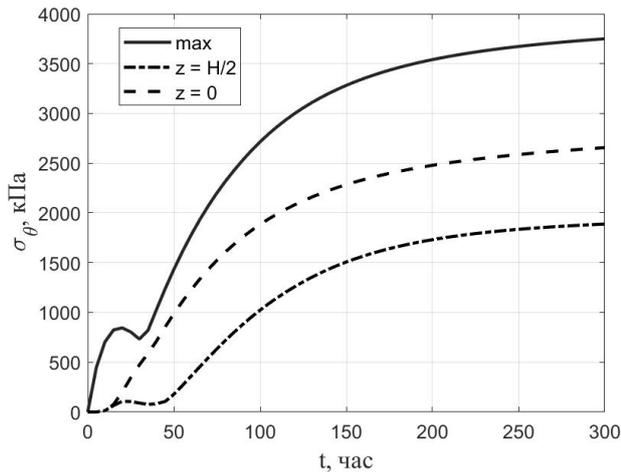


Рисунок 13 – Изменение во времени максимальных окружных напряжений в цилиндрической оболочке

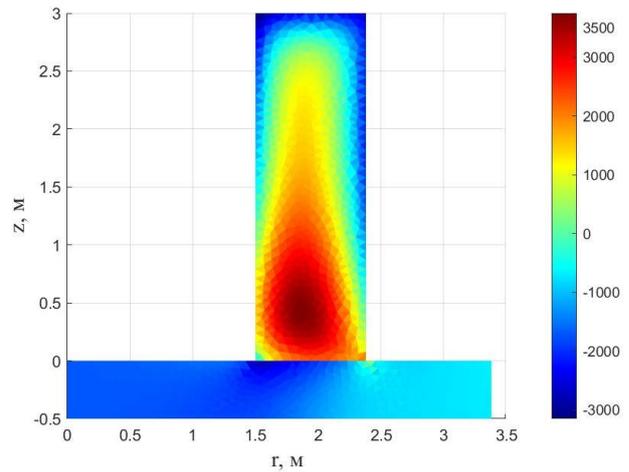


Рисунок 14 – Распределение напряжений  $\sigma_{\theta}$  (кПа) в зависимости от  $r$  и  $z$  при  $t = 300$  ч

Также для рассмотренной конструкции был выполнен расчет с учетом послойного возведения с технологическими перерывами, который показал, что влияние перерывов в укладке слоев на величину максимальных напряжений незначительно.

Приведем далее результаты расчета напряженно-деформированного состояния при возведении массивного монолитного фундамента ветрогенератора. Рассматриваемая конструкция является круглой в плане, радиусом 9 м, и имеет переменную высоту, которая меняется от 1,5 м на краю до 3 м в середине. Данная задача выбивается из начальных ограничений области исследований, однако, поскольку имеет место осевая симметрия, она может быть решена с использованием описанных ранее подходов.

Расчет температурного поля выполнялся совместно с грунтовым массивом, который принимался цилиндрической формы радиусом 15 м (рис. 15).

На верхней поверхности фундамента и верхней поверхности грунта принимались условия конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи  $h = 20$  Вт/(м<sup>2</sup> · К) (свободная поверхность, открытая для теплообмена), на боковых и наклонной поверхности фундамента коэффициент теплоотдачи принимался равным 10 Вт/(м<sup>2</sup> · К) (поверхность, закрытая опалубкой), на нижней и боковой поверхности грунта температура принималась заданной и равной 20 °С.

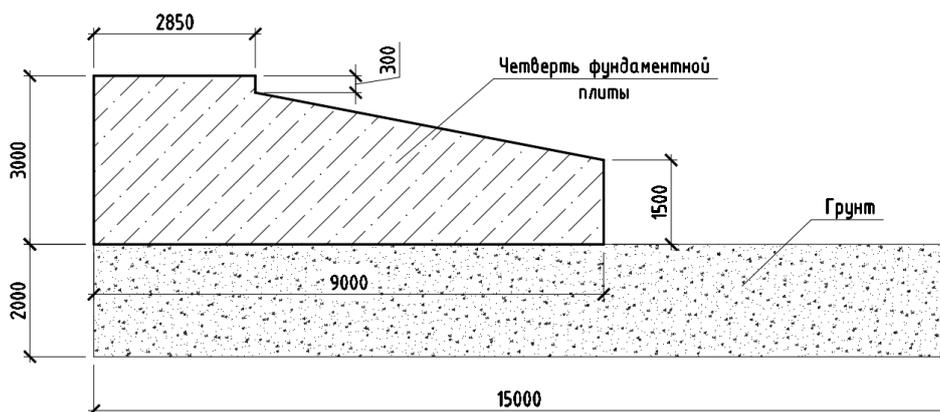


Рисунок 15 – Габариты рассчитываемого фундамента

Температура воздуха также принималась равной 20 °С. Теплофизические характеристики грунта:  $\lambda = 1,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\rho = 1600 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $c = 1875 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Модуль упругости грунта  $E_r = 300 \text{ кПа}$ . Коэффициент линейного температурного расширения грунта принимался равным коэффициенту линейного температурного расширения бетона. Нижние узлы массива грунта принимались закрепленными по  $z$ , а линия  $r = 0$  – закрепленной от радиальных смещений. Расчет выполнялся для быстротвердеющего бетона класса В25.

На рис. 16 представлен график изменения во времени максимальных окружных напряжений. На данном графике показана также кривая изменения во времени средней прочности бетона на растяжение. Рис. 16 показывает, что для рассмотренной конструкции существует риск раннего трещинообразования в возрасте примерно 50 ч.

Для исключения риска образования трещин в процессе возведения фундамента коэффициент теплоотдачи на поверхностях, контактирующих с окружающей средой, был снижен до  $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , и между подошвой фундамента и грунтом был установлен слой утеплителя из экструдированного пенополистирола толщиной 2 см с теплофизическими характеристиками  $\lambda = 0,034 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\rho = 30 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $c = 1650 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Для сравнения также выполнялся расчет при использовании данных по тепловыделению для медленнотвердеющего бетона.

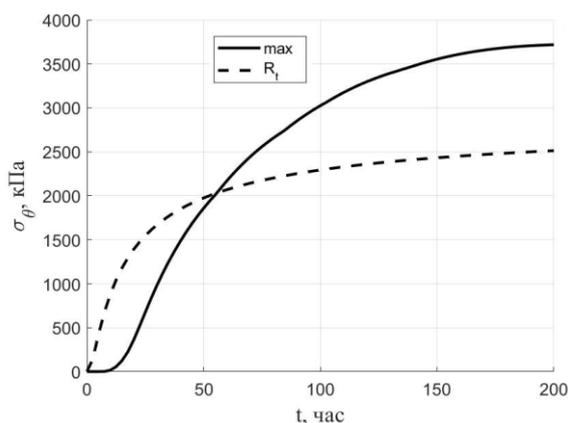


Рисунок 16 – Изменение во времени максимальных напряжений

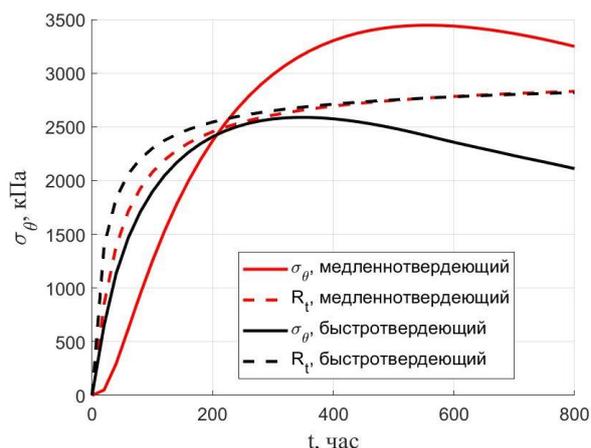


Рисунок 17 – Изменение во времени максимальных напряжений  $\sigma_{\theta}$  при ограничении теплообмена между фундаментом и окружающей средой

На рис. 17 представлены графики изменения во времени максимальных напряжений  $\sigma_{\theta}$  в случае ограничения теплоотдачи на поверхностях фундамента, обменивающихся с окружающей средой, и установки теплоизоляции под его подошвой при использовании быстротвердеющего и медленнотвердеющего бетона. Также на данном рисунке представлены графики изменения во времени текущей прочности бетона на растяжение.

Из рис. 17 видно, что в случае использования быстротвердеющего бетона максимальные напряжения  $\sigma_{\theta}$  не превышают текущую прочность на растяжение, чего не наблюдается при применении медленнотвердеющего бетона. Таким образом, замедление кинетики тепловыделения бетона не всегда позволяет снизить риск раннего трещинообразования. Большое значение также имеют условия окружающей среды, а также условия теплообмена на поверхностях конструкции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные выводы и результаты:

1. Выбраны основные соотношения модели расчета напряженно-деформированного состояния массивных монолитных конструкций при их возведении, определяющие изменение во времени механических характеристик бетона как функций от его степени зрелости, а также выполнена валидация этих соотношений путем сравнения с экспериментальными данными. Установлено,

что эффектами ползучести бетона на стадии возведения можно пренебречь (прочность при их неучете составляет не более 5%).

2. Разработана методика определения нестационарных температурных полей при возведении толстостенных цилиндрических оболочек с учетом зависимости коэффициента теплопроводности бетона от степени его гидратации, а также стадийности возведения конструкции. Установлено, что влияние переменного коэффициента теплопроводности на результирующие температурные поля не превышает 3%, и им можно пренебречь.

3. Разработаны алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния при возведении толстостенных цилиндрических оболочек в одномерной осесимметричной постановке. Решена задача определения напряженно-деформированного состояния в процессе возведения трехслойной толстостенной оболочки с наружными слоями из стали и ядром из бетона. Установлены закономерности распределения напряжений между слоями в трехслойной конструкции.

4. Разработаны алгоритмы расчета напряжений, возникающих в процессе твердения в массивных монолитных конструкциях в двумерной осесимметричной постановке. Исследовано влияние технологических перерывов между укладкой слоев на результирующее поле напряжений для конструкции в виде толстостенной цилиндрической оболочки. Учет технологических перерывов к изменению максимальных напряжений не более чем на 5%. Решена практическая задача определения температурных напряжений при возведении массивного монолитного фундамента ветрогенератора. Предложены рекомендации по снижению риска раннего трещинообразования путем регулирования условий теплообмена на поверхностях конструкции.

**Перспективы дальнейшей разработки темы:** В настоящей работе рассмотрены только конструкции, имеющие осевую симметрию. Дальнейшие исследования могут быть направлены на решение задачи определения температурных полей и напряжений при возведении массивных монолитных конструкций в трехмерной постановке.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Основные положения диссертации и результаты исследований изложены в следующих работах:**

*Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня  
ВАК РФ:*

1. **Зоалкфл, Д.А.** Определение температурных полей и напряжения при возведении массивных монолитных фундаментов под ветрогенераторы / Д. А. Зоалкфл, А. Т. Угрехелидзе, Е. Н. Пищеренко // Системные технологии. – 2023. – № 1. – С. 55-63.
2. **Зоалкфл, Д. А.** Определение температурных полей при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек / Д. А. Зоалкфл, Р. М. Курачев, А. С. Чепурненко // Вестник Евразийской науки. – 2023. – Т 15. – № 2. – URL: <https://esj.today/PDF/80SAVN223.pdf>
3. Аль-Вали, И.А.А. К вопросу о ползучести полых цилиндров под действием нормального давления/ И.А.А. Аль-Вали, Л. И. Лесняк, М. Ш. Гатиев, **Д. А. Зоалкфл**, С. В. Литвинов // Системные технологии. – 2023. – № 1. – С. 28-38.
4. **Зоалкфл, Д. А.** Определение температурных напряжений при возведении монолитных толстостенных цилиндрических оболочек / Д.А. Зоалкфл, В.С. Тюрина, А.С. Чепурненко // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2024. – Т. 3(2). – С. 50–58. – URL: <https://www.stsg-donstu.ru/jour/article/view/101>

*Статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы  
данных и системы цитирований Web of Science, Scopus:*

1. **Zoalkfl, D. A.** Determination of temperature fields and stresses during the construction of a massive monolithic foundation slab of a wind turbine tower / D. A. Zoalkfl, A. S. Chepurnenko, B. M. Yazyev, A. V. Ishchenko, S. V. Litvinov // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 402. – Article 12002. – URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/39/e3sconf\\_transsiberia2023\\_12002/e3sconf\\_transsiberia2023\\_12002.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/39/e3sconf_transsiberia2023_12002/e3sconf_transsiberia2023_12002.html)

*Статьи в других изданиях:*

1. **Зоалкфл, Д. А.** Расчет температурных полей и напряжений при возведении массивного монолитного фундамента ветрогенератора / Д.А. Зоалкфл, А.С. Чепурненко // Актуальные проблемы науки и техники. 2023. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 863-864.
2. **Зоалкфл, Д. А.** Упрощенная методика определения температурных напряжений в процессе возведения монолитных фундаментных плит / Д.А. Зоалкфл, В.С. Тюрина, А.С. Чепурненко // Строительство и архитектура – 2024: материалы международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2024. – С. 241-243.

*Авторские свидетельства на программу для ЭВМ:*

1. Расчет температурных полей и напряжений при возведении массивных монолитных осесимметричных конструкций. Правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова". Сабитов Линар Салихзанович (ru), **Зоалкфл Даниаль Аммарович** (ru), Чепурненко Антон Сергеевич (ru), Языев Батыр Меретович (ru), Гатиев Магомед Шамильевич (ru), Зиганшин Алмаз Дамирович (ru), Зинькова Виктория Анатольевна (ru). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023680535. — № 2023669552; заявл. 25.09.2023; зарег. 02.10.2023.