

С. В. НИКИФОРОВ¹, М.В. ТЕРНОВСКИЙ²

¹АО «Синергия», Санкт-Петербург, Россия

²Научно-испытательная лаборатория «Политех-СКМ-Тест», Санкт-Петербург, Россия

КОНТРОЛЬ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ МАССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ФУНДАМЕНТОВ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Аннотация. В статье описываются основные принципы контроля термонапряженного состояния при бетонировании массивных бетонных конструкций на примере фундаментных конструкций высотных зданий проектируемого комплекса в Санкт-Петербурге. Целью исследования является разработка способов контроля термонапряженного состояния при бетонировании массивных конструкций на основании определения критерия трещиностойкости бетона. Для достижения поставленной цели были выполнены расчёты температурных полей бетонной конструкции при твердении бетона в строительный период и определены критерии трещиностойкости. Основные результаты данного исследования могут быть применены при проектировании и устройстве массивных фундаментных конструкций уникальных зданий и сооружений.

Ключевые слова: бетонные конструкции, термонапряженное состояние, трещиностойкость, тепловыделение, контроль температуры, уход за бетоном.

S. V. NIKIFOROV¹, M. V. TERNOVSKIY²

¹JSC Synergiya, Saint Petersburg, Russia

²Scientific Testing Laboratory Politech-SKiM-Test, Saint Petersburg, Russia

MONITORING THERMAL STRESS STATE DURING CONCRETING OF MASSIVE FOUNDATION STRUCTURES FOR HIGH-RISE BUILDINGS

Abstract. The article outlines the core principles of monitoring the thermal stress state during the concreting of massive concrete structures, using the foundation systems of high-rise buildings in a planned complex in Saint Petersburg as a case study. The study aims to develop methods for controlling the thermal stress state during concreting by establishing criteria for concrete crack resistance. To achieve this goal, calculations of temperature fields in the concrete structure during the hardening phase were performed, and crack resistance criteria were determined. The key findings of this research can be applied to the design and construction of massive foundation systems for unique buildings and structures.

Keywords: concrete structures, thermal stress state, crack resistance, heat generation, temperature monitoring, concrete curing.

Введение

Стремительные темпы роста в различных городах мира и в нашей стране высоких и сверхвысоких зданий и сооружений вызывают изменения принципов их проектирования и строительства. Это связано с большими вертикальными и климатическими нагрузками на сооружения, ограниченностью городских территорий, необходимостью более эффективного использования материальных ресурсов и сокращения сроков ввода сооружений в эксплуатацию.

В системе «высотное здание – фундаменты – основание» наиболее нагруженными конструкциями являются конструкции подземной части, на которые передаются все действующие на здание вертикальные, ветровые и/или сейсмические нагрузки.

Основным звеном в этой системе являются фундаменты, от выбора типа которых зависит как надежное функционирование остальных несущих конструкций высотного здания, так и комфортное пребывание в них людей. Конструкции фундаментов тесно связаны с общим конструктивным решением каркаса здания и во многом определяются грунтовыми условиями в основании здания [1].

Массивные фундаментные конструкции высотных зданий имеют значительные габариты, большой объем бетона и, как правило, бетонируются блоками. Блоки образуются путем разрезки массива фундамента поперечными, а иногда и продольными швами. Разрезка на блоки бетонирования имеет большое значение для предотвращения температурного трещинообразования, их размеры и размещение предусматриваются проектом в зависимости от конструктивных соображений и от производственных факторов [2].

В массивных бетонных и железобетонных конструкциях в строительный период во время набора прочности возможно появление трещин вследствие перепада температур между ядром и поверхностью конструкции в результате реакции гидратации цемента [3]. Регулирование температурного режима выдерживания бетона является актуальной задачей, особенно для бетонов высоких классов.

Бетонирование массивных бетонных фундаментных плит и других массивных конструкций, по целому ряду технологических и производственных соображений, предпочтительно производить единым блоком по высоте. Однако это приводит к существенному разогреву массива, вследствие экзотермической реакции при твердении бетонной смеси. Возникающая при этом значительная неравномерность распределения температуры по высоте плиты, приводит к возникновению опасных растягивающих напряжений (и, соответственно, деформаций удлинения) сначала на поверхности плиты, а затем в ее центральных зонах. В этом отношении особенно опасным является зимний период.

Строительными нормами (СП 70.13330.2012, СП 435.1325800.2018, СП 311.1523800.2017) предписывается проведение мероприятий по уменьшению влияния температурно-влажностных полей напряжений в массивных монолитных конструкциях, по ограничению скорости остывания бетона, по регулированию температурного режима твердения, по расположению температурно-усадочных и технологических швов. Согласно [4] для регулирования температурного режима выдерживания бетона при возведении массивных конструкций целесообразно сочетание различных способов: рецептурных, в частности, применение низкотермичных цементов в сочетании с ограничением содержания цемента в бетонной смеси и введением добавок-замедлителей твердения и технологических, например, регулирование теплопотерь, периферийный обогрев для выравнивания температурных градиентов.

Методы и модели исследования

Тепловыделение при гидратации бетона

Кинетику тепловыделения бетона разделяют на несколько стадий (см. Рис.1):

1) Начальный гидролиз. Длится первые 30 минут с начала затворения смеси, характеризуется быстрым повышением температуры смеси на несколько градусов. Быстрая реакция происходит в результате растворения ионов в воде и реакции между трехкальциевым алюминатом и гипсом.

2) Период индукции (период покоя). Длится до 4-х часов после затворения. В период покоя прекращается гидратация цемента, бетон становится, обладает наибольшей удобоукладываемостью. Температура смеси практически не меняется (если нет теплопотерь), поскольку тепловыделение крайне мало. Поскольку растворение ионов продолжается со

временем, концентрации ионов трех- и двухвалентного силикатов в бетонной системе увеличивается.

3) Период ускоренной гидратации. В конце периода покоя снова начинается значительная гидратация за счет взаимодействия трех- и двухвалентных силикатов. Данный период характеризуется резким увеличением скорости тепловыделения и набора прочности, длится до 12 часов после затворения.

4) Период замедления. С увеличением времени скорость тепловыделения постепенно замедляется. Этот период характеризуется медленным спадом скорости выделения тепла и набора прочности, длится до 4 суток после затворения.

5) Период медленного набора прочности (фаза диффузионного контроля). Гидратация цемента достигает стационарного состояния, происходит медленное тепловыделение и набор прочности.

В отечественной практике для описания кривых тепловыделения принята зависимость И.Д. Запорожца [5]:

$$Q = Q_{max} \left[1 - (1 + A_t \tau)^{-\frac{1}{m-1}} \right], \text{ кДж} \quad (1)$$

где Q_{max} – полное тепловыделение бетона; A_t – коэффициент, характеризующий скорость тепловыделения при температуре t ; m – порядок реакции гидратации; τ – время, прошедшее с момента затворения.

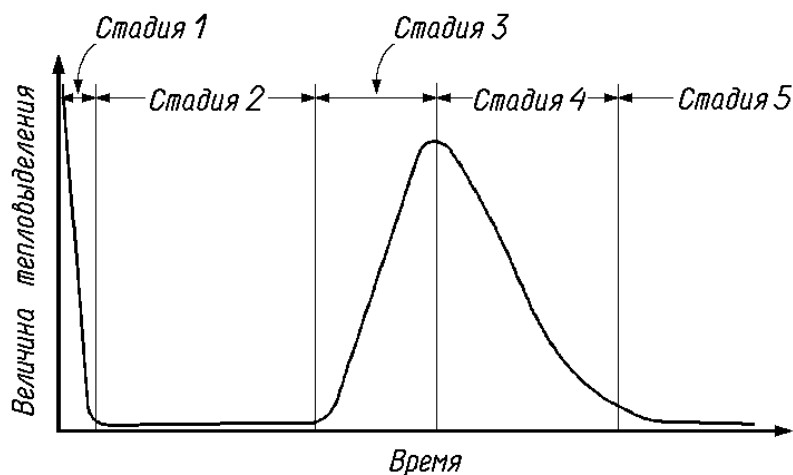


Рисунок 1 - Зависимость скорости тепловыделения бетона от времени

Вид кривой, получаемой по уравнению И.Д. Запорожца приведен на рис. 2.

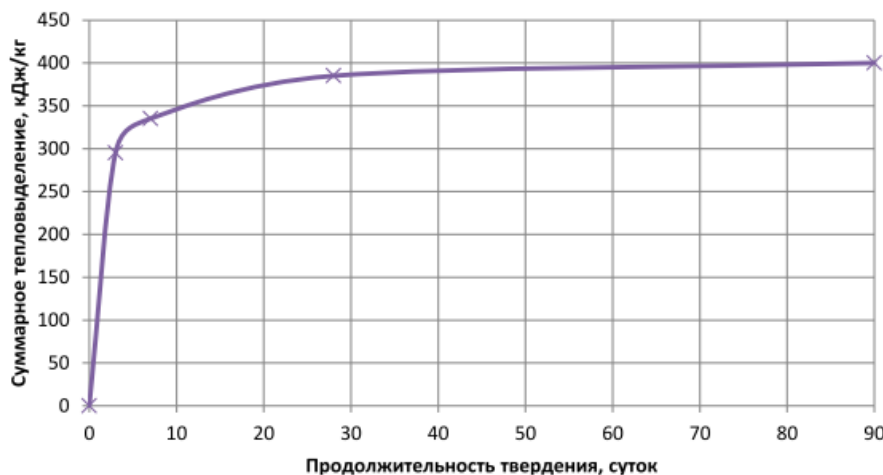


Рисунок 2 - Кривая тепловыделения по уравнению И.Д. Запорожца

Уравнение Запорожца следует применять при описании тепловыделения бетона в возрасте более 3 суток, поскольку на ранних сроках гидратации имеется большая погрешность. Эксперименты [6], проведенные для современных высокопрочных бетонов, использовавшихся в фундаментных конструкциях Лахта Центра, наглядно показали расхождение значений тепловыделения между экспериментальными результатами и результатами на основе зависимости И.Д. Запорожца на участке от 0 до 40 часов. Разница тем больше, чем ближе к времени начала твердения, что можно объяснить невозможностью учесть в уравнении (1) замедляющее действия гипса, суперпластификаторов и прочих добавок в бетон. Эта разница в результатах дает погрешность в расчетах термонапряженного состояния бетона.

Основные факторы, влияющие на тепловыделение бетона, перечислены ниже:

- 1) Удельное содержание цемента в единице объема бетонной смеси. Увеличение содержания цемента вызывает увеличение тепловыделения бетонной смеси, т.к. он является основой тепловыделения бетонов.
- 2) Вид цемента. Тепловыделение зависит от химико-минералогического состава (к примеру, шлакопортландцемент имеет на 15% меньшее выделение тепла).
- 3) Начальная температура бетонной смеси. Процесс гидратации зависит от температуры бетонной смеси, таким образом, регулируя ее начальную температуру, можно контролировать интенсивность последующего тепловыделения.
- 4) Тонкость помола. Скорость протекания процесса гидратации пропорциональна тонкости помола цемента, поскольку увеличивается его удельная поверхность.
- 5) Водоцементное соотношение.
- 6) Наличие в составе ускорителей или замедлителей твердения. Чем дальше во времени будет отсрочен набор проектной прочности бетоном, тем лучше будет температурный режим конструкции.

Критерий температурной трещиностойкости. Расчет термонапряженного состояния

Поскольку температурные градиенты являются одной из основных причин формирования напряжений, закономерно важной задачей является совершенствование алгоритма расчета температурных напряжений, включающего расчет температурных полей в ранний период возведения конструкции с учетом кинетики тепловыделения бетона, условий теплообмена и температуры окружающей среды. При расчетах термонапряженного состояния фундаментных конструкций установлено [7], что через 72 часа величины растягивающих напряжений на верхней поверхности плиты сопоставимы с пределом прочности бетона класса В25 на осевое растяжение.

Расчеты термонапряженного состояния бетонных массивов в строительный период, и сама оценка трещиностойкости достаточно сложны с практической, инженерной точки зрения. Поэтому разработка технологических регламентов бетонирования фундаментных конструкций Лахта Центра выполнялась при научно-техническом сопровождении со стороны СПбГПУ им. Петра Великого.

В подходе СПбГПУ для оценки термической трещиностойкости *бетонной фундаментной плиты коробчатого фундамента высотного здания Башня* используется деформационный критерий, предложенный П.И. Васильевым и предусмотренный в СП 41.13330.2012. Согласно этому критерию, деформации удлинения бетона не должны превышать предельной растяжимости бетона. Методика основана на применении соотношения:

$$\sigma(t) \leq \gamma_{cm} \gamma_h \varepsilon_{b_{lim}}, \quad (2)$$

где $\sigma(t)$ - температурные напряжения в момент времени t , γ_h - коэффициент, учитывающий зависимость напряжений от градиента температурных деформаций и принимаемый в

соответствии с СП41.13330.2012, ε_{lim} - предельная растяжимость бетона, определяемая экспериментально, $\phi(t)$ - коэффициент, учитывающий зависимость ε_{lim} от возраста, γ_{cm} - коэффициент условий работы, равный для массивных сооружений 1,1, для остальных – 1,0, $E_b(t)$ - начальный модуль упругости бетона.

Формулу можно переписать как:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_b(t)} \leq \gamma_{cm} \gamma_h \phi(t) \varepsilon_{lim}, \quad (3)$$

где в левой части неравенства относительные деформации удлинения в момент времени t , а в правой – предельные деформации удлинения в этот же момент времени.

Расчет термонапряженного состояния фундаментной плиты высотного здания Башни в строительный период проводился с помощью программы TERM, разработанной в СПбГПУ.

В первом блоке программы осуществляется задача определения нестационарных температурных полей в плите, уложенной на бетонную подготовку и грунтовое основание. Решается неоднородное дифференциальное уравнение теплопроводности с помощью МКЭ. Учитывается тепловыделение цемента и влияние температуры твердения на скорость тепловыделения. На верхней и боковых поверхностях плиты приняты граничные условия III рода (учитывается наличие опалубки, теплоизоляции и тепляка). На границе контакта плита-подбетонка-грунт рассмотрены граничные условия IV рода.

Второй блок программы связан с определением непосредственно термонапряжений. Разрешающая система интегродифференциальных уравнений получается путем подстановки зависимостей описывающих гипотезу плоских сечений, деформации в случае температурных воздействий, связь между напряжениями и деформациями с учетом ползучести через функции $R(t, r)$ согласно линейной наследственной теории ползучести, в условиях статической эквивалентности нулю температурных усилий по вертикальному сечению плиты. При решении системы используется МКЭ и численное интегрирование.

Важной особенностью программы является способность учитывать влияние температуры на деформативные и теплофизические характеристики бетона, что представляется чрезвычайно актуальным для задач строительного периода.

Результаты и обсуждения

Способы регулирования температурного режима при бетонировании нижней плиты коробчатого фундамента проектируемого высотного здания

Без применения мероприятий по регулированию температурного режима трещиностойкость фундаментной плиты не обеспечивается. Образование трещин происходит в начальные сроки твердения бетона от 2 до 9 суток. Для выравнивания перепада температур необходимо ограничить теплообмен фундаментной плиты с окружающей средой. Это обеспечивается путем устройства покрытия из теплоизолирующих рулонных материалов после окончания бетонирования и устройства влагонепроницаемого покрытия по данным мониторинга температуры при достижении критического перепада температур между ядром и поверхностным слоем.

Коробчатый фундамент проектируемого высотного здания (рис. 3) состоит из двух плит – верхней толщиной 1000 мм и нижней толщиной 5000 мм. Их совместную работу обеспечивают 8 диафрагм жесткости – стальных пространственных конструкций толщиной 2500 мм, расходящихся в радиальном направлении от ядра, состоящего из наружной стены толщиной 2000 мм и внутренних стен толщиной 300 мм. Высота коробчатого фундамента составляет около 17,6 м. В плане он представляет собой круг диаметром 75,8 м. Вертикально коробчатый фундамент разбит на 3 этажа за счет устройства двух промежуточных плит перекрытий толщиной 400 мм.

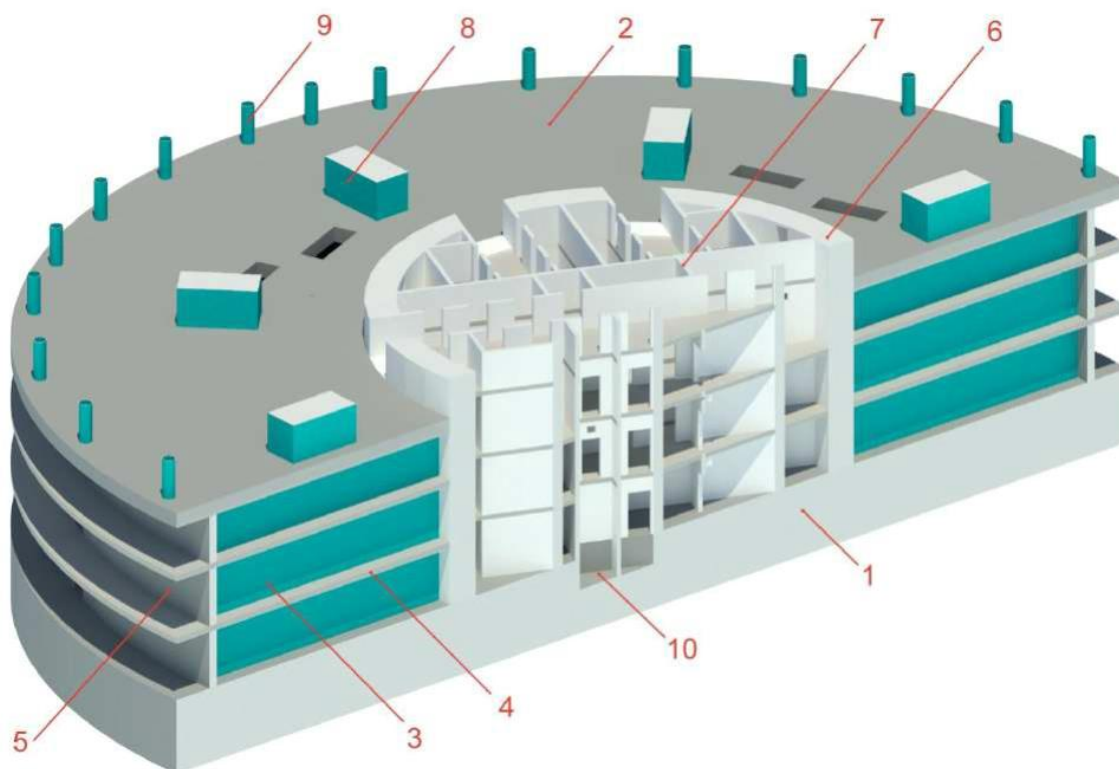


Рисунок 3 - Коробчатый фундамент высотного здания «Лахта Центр 2»

1 – Нижняя плита КФ; 2 – Верхняя плита КФ; 3 – Радиальные стены КФ; 4 – Промежуточные плиты КФ; 5 – Наружная стена КФ; 6 – Наружная стена ядра; 7 – Внутренние стены ядра; 8 – Мегаколонны; 9 – Опоры круговой дороги; 10 – Лифтовые шахты.

В конструкциях коробчатого фундамента (КФ) применяются бетоны классов В80-В100.

Для разработки мероприятий по регулированию температурного режима необходимо произвести сравнительную оценку термонапряженного состояния (ТНС) конструкции нижней плиты при разных вариантах бетонирования плиты: в одну захватку на всю высоту – 5 м и в четыре захватки-сектора в плане, каждый сектор на всю высоту.

Допускается устройство вертикальных рабочих швов бетонирования в нижней плите коробчатого фундамента, разделяющих плиту на захватки бетонирования. Расчеты выполнялись в два этапа:

Этап 1. Определение параметров тепловыделения бетона, в том числе определение максимальной температуры разогрева бетонов адиабатическим методом.

Этап 2. Расчеты ТНС конструкции фундаментной плиты.

Расчет термонапряженного состояния выполнялся в соответствии со следующими исходными данными:

1) Фундаментная плита, толщиной 5 м, имеет в плане форму круга диаметром 75,8 м, и не имеет контакта по периметру с другими конструкциями – свободный контур.

2) Предельная растяжимость бетона В80 принята равной $15,7 \times 10^{-5}$.

3) Условия бетонирования:

- наличие тепляка, обеспечивающего поддержание температуры внутри в диапазоне $+5...+10$ °С;

- температура наружного воздуха: -5 °С.

4) Для укрытия бетона принято использование теплоизоляции «Этафом», с толщиной слоя 10 мм, и возможность укладки нескольких слоев.

На первом этапе по экспериментальным данным (рис. 4) были определены параметры тепловыделения бетона.

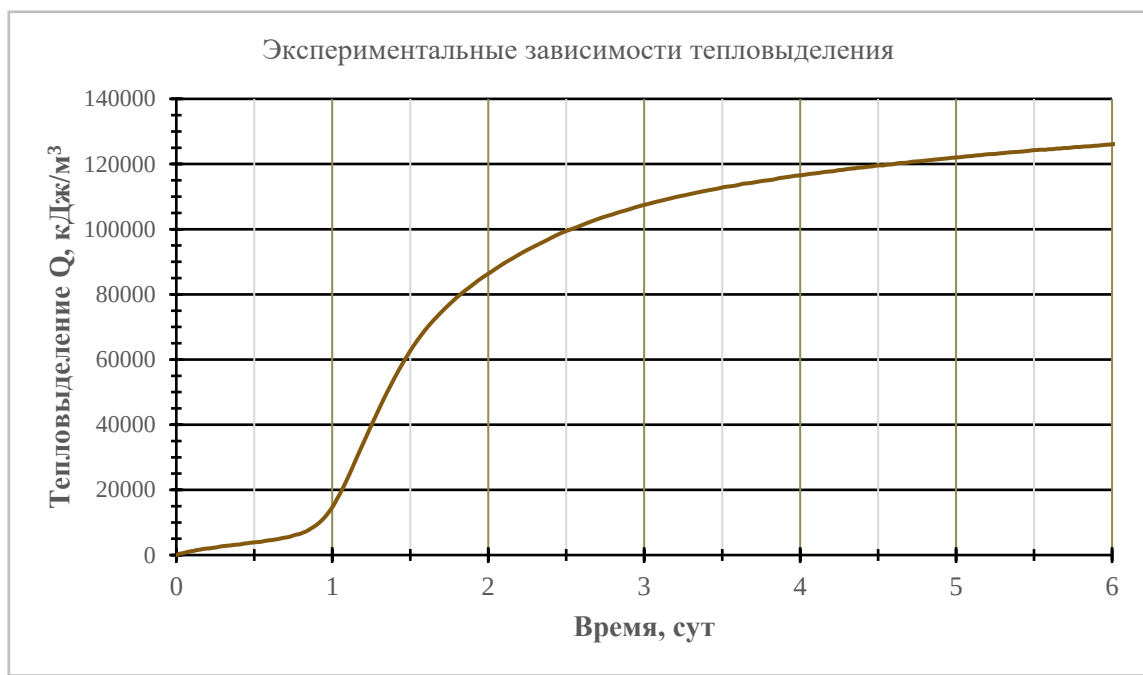


Рисунок 4 - Экспериментальные данные тепловыделения бетона В80

Бетонирование единым блоком

Расчет ТНС конструкций включал в себя оценку трещиностойкости бетона плиты с получением данных о возможных температурах разогрева бетона в контрольных точках «центр-поверхность» и расчет мероприятий по уходу за бетоном, обеспечивающих целостность массива в строительный период. Данные по результатам этих расчетов представлены в таблице 1, графические данные для состава бетона представлены на рисунках 5-7.

Таблица 1. Результаты расчета ТНС

Параметры тепловыделения: $Q_{\max}$, кДж/м³	132500
Максимальная температура адиабатического разогрева бетона $T_{\max}$, °C (при $T_{\text{нач}}=20^{\circ}\text{C}$)	74,7
Условия бетонирования: Тепляк	есть
Температура в тепляке, °C	+10
Температура наружного воздуха, °C	-5
Температура бетонной смеси, °C	+15
Результаты расчета мероприятий по уходу:	
Теплоизоляция Этафом	2 слоя по 10 мм
Снятие 1-го слоя теплоизоляции	через 15 суток
Снятие 2-го слоя теплоизоляции	через 44 суток
$T_{\max}$ верхняя поверхность, °C	52
$T_{\max}$ центр, °C	68
$T_{\max}$ боковая поверхность, °C	53

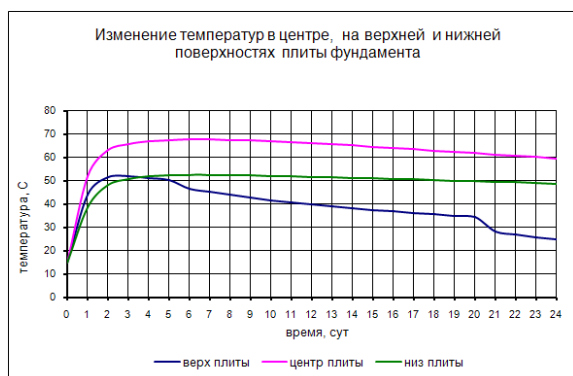


Рисунок 5 - Температура плиты в контрольных точках

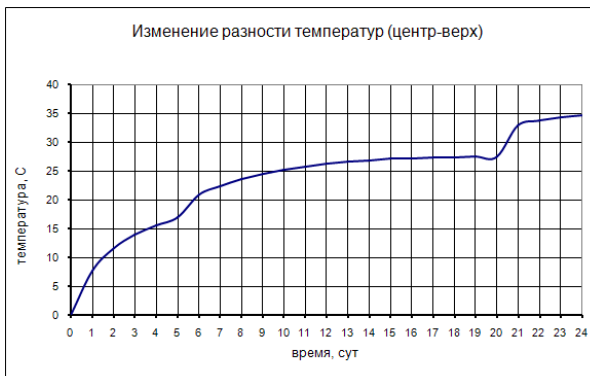


Рисунок 6 - Перепад температур плиты центр-верх

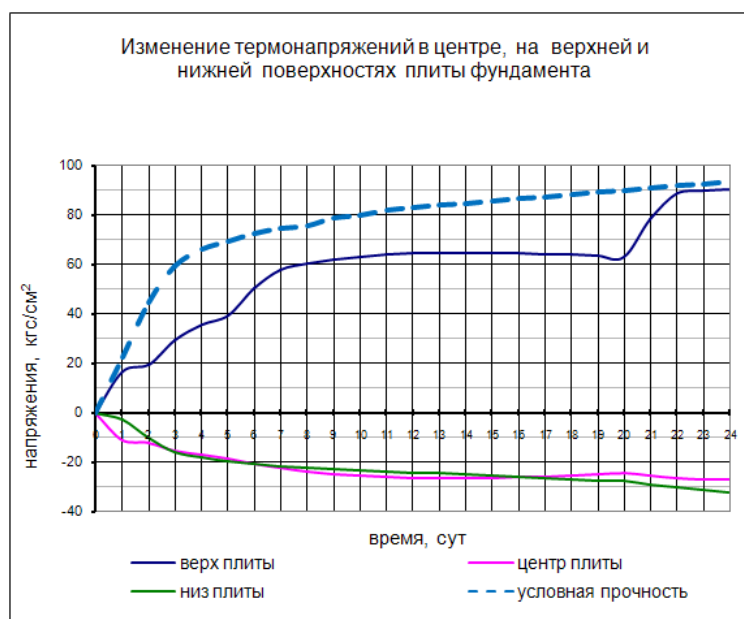


Рисунок 7 - Термонапряжения контрольных точек

Расчетная оценка тепловыделения состава бетона В80 показывает, что максимальный разогрев бетона в конструкции при заданных температурных условиях составляет 68 - 72 °С. Расчетная оценка ТНС конструкции фундаментной плиты показала, что трещиностойкость конструкции фундаментной плиты обеспечивается, при условии выполнения расчетных мероприятий по регулированию температурного режима.

Бетонирование плиты в четыре захватки-сектора

Расчет ТНС выполнялся в соответствии со следующими исходными данными:

- фундаментная плита, толщиной 5 м, не имеет контакта по периметру с другими конструкциями – свободный контур;

- плита в плане разделена на 4 захватки-сектора (см. схему на рис. 8).

Для расчетной оценки был установлен следующий порядок бетонирования:

- захватка 1 (бетонирование 1 сутки) – перерыв 28 суток,
- захватка 2 (бетонирование 1 сутки) – перерыв 28 суток,
- захватка 3.1 (бетонирование 1 сутки) – перерыв 7 суток,
- захватка 3.2 (бетонирование 1 сутки).

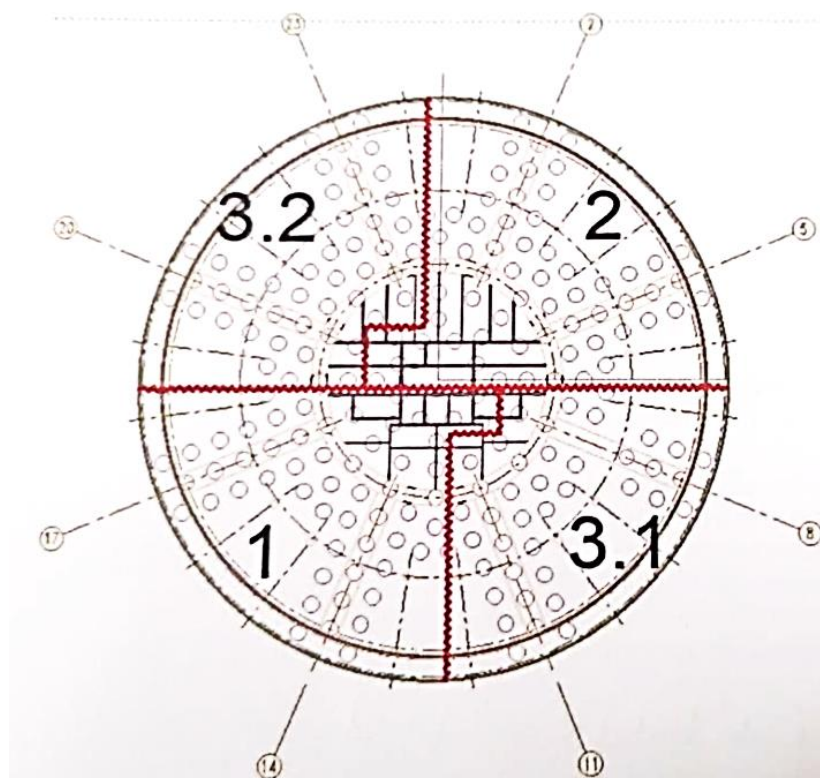


Рисунок 8 - Схема деления плиты в плане на 4 захватки-сектора бетонирования

Величина обобщенного модуля основания принята равной $100\,000 \text{ кгс/см}^2$. Предельная растяжимость бетона В80 принята равной $15,7 \cdot 10^{-5}$.

Условия бетонирования:

- наличие тепляка, обеспечивающего поддержание температуры внутри в диапазоне $+5...+10 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

- температура наружного воздуха: $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для укрытия бетона принято использование теплоизоляции «Этафом», с толщиной слоя 10 мм, и возможность укладки нескольких слоев.

Расчет ТНС конструкций включал в себя:

- 1) Оценку трещиностойкости бетона захваток с получением данных о возможных температурах разогрева бетона в контрольных точках «центр-поверхность» и расчет мероприятий по уходу за бетоном, обеспечивающих целостность массива в строительный период. Данные по результатам этих расчетов представлены в таблице 2.

- 2) Оценка трещиностойкости бетона в зонах примыкания захваток друг к другу. В результате расчетной оценки была выявлена зона (участок), в которой при определенных условиях присутствуют риски трещинообразования. Эта зона может образоваться на новой захватке, на 1-2 сутки после окончания бетонирования, располагаться вдоль границы захваток, на расстоянии примерно 2 м от шва и иметь поверхностный характер - см. рис. 9:

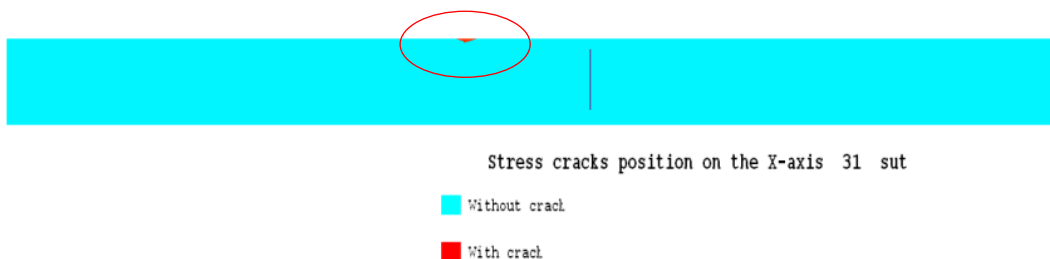


Рисунок 9 - Условное расположение зоны возможного трещинообразования на схеме прилегающих захваток

Таблица 2. Результаты расчета ТНС для отдельных захваток

Параметры тепловыделения: $Q_{\max}$, кДж/м ³	132500
Максимальная температура адиабатического разогрева бетона $T_{\max}$, °C (при $T_{\text{нач}}=20^{\circ}\text{C}$)	74,7
Условия бетонирования: Тепляк	есть
Температура в тепляке, °C	+10
Температура наружного воздуха, °C	-5
Температура бетонной смеси, °C	+12
Результаты расчета мероприятий по уходу:	Верхняя поверхность конструкции
Теплоизоляция Этафом сверху	2 слоя по 10 мм
Снятие 1-го слоя теплоизоляции	через 10 суток
Снятие 2-го слоя теплоизоляции	через 43 суток
	Боковые поверхности конструкции
Теплоизоляция Этафом сбоку	20 мм
Снятие теплоизоляции	через 20 суток
$T_{\max}$ верхняя поверхность, °C	46
$T_{\max}$ центр, °C	58
$T_{\max}$ боковая поверхность, °C	52
Обеспечение трещиностойкости конструкции	В целом обеспечена

Для оценки возможности снятия рисков трещинообразования в этой зоне были выполнены дополнительные расчеты ТНС плиты с контролем этой зоны на трещиностойкость при различных сочетаниях температур «воздух - смесь». Были рассмотрены три варианта начальной температуры смеси: +8, +10 и +12°C. Для каждого из вариантов определялась трещиностойкость бетона при различных температурах воздуха в пространстве тепляка. Результаты этих расчетов представлены в таблице 3. Графическая часть расчетов для пар температур «воздух - смесь» 12-8 представлена на рис. 11-22.

Таблица 3. Результаты оценки трещиностойкости контактной зоны захваток для состава бетона В80 при различных парах температур «воздух - смесь»

Температура воздуха в тепляке, °С	Обеспечение критерия трещиностойкости бетона контактной зоны при начальной температуре смеси (°С):		
	+8	+10	+12
+8	Не обеспечивается (5%)		
+10	Обеспечивается	Не обеспечивается (24%)	
+12	Обеспечивается	Не обеспечивается (21%)	Не обеспечивается (42%)
+15	Обеспечивается	Не обеспечивается (16%)	Не обеспечивается (37%)
+20	Обеспечивается	Не обеспечивается (11%)	Не обеспечивается (29%)
+25		Не обеспечивается (8%)	Не обеспечивается (22%)

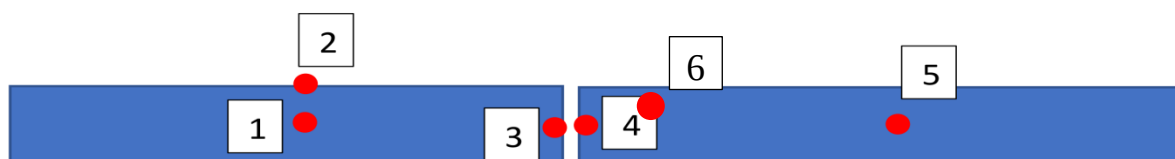
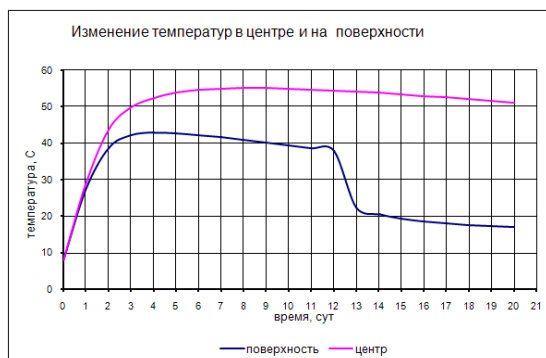


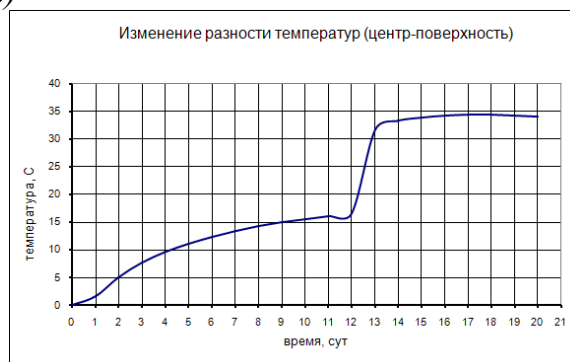
Рисунок 10 - Схема расположения контрольных точек

Вариант 12-8. Бетон В80, теплоизоляция – 20 мм везде: сбоку снимается через 12 суток, сверху – 10 мм через 10 суток, оставшиеся 10 мм через 43 сут. Температура воздуха 12 °С, бетонной смеси 8 °С.

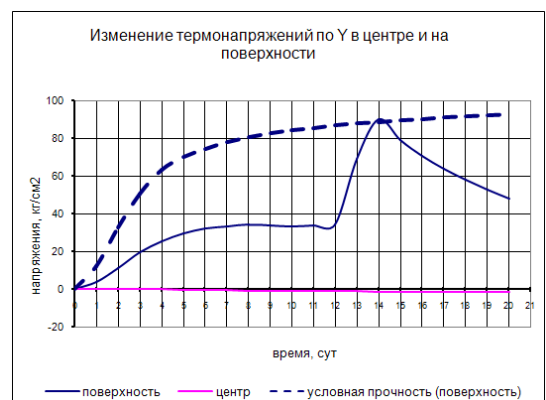
а)



б)



в)



г)

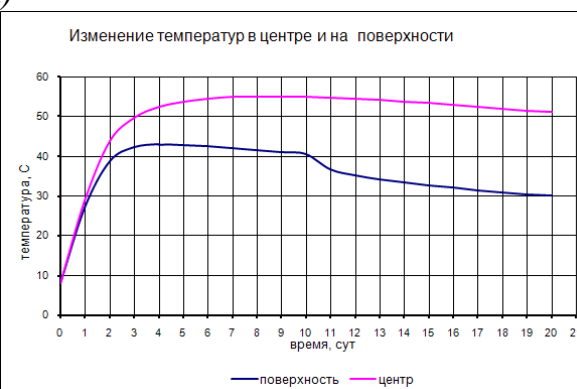
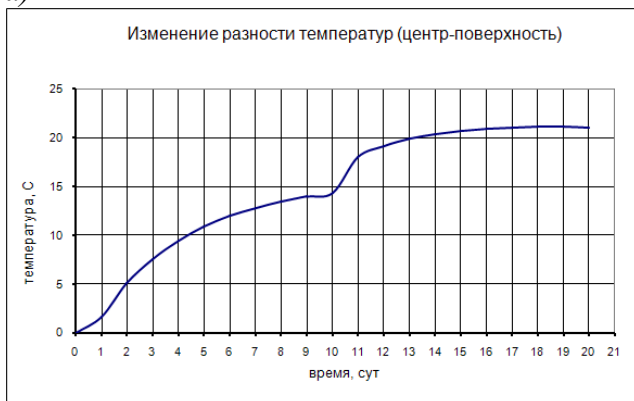
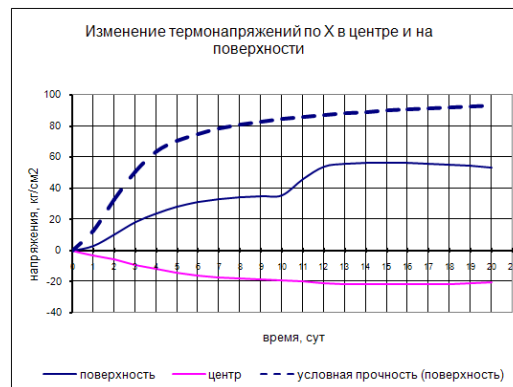


Рисунок 11 - Температура плиты в контрольных точках 1-2 (а), перепад температур плиты центр-поверхность в точках 1-2 (б), термонапряжения в контрольных точках 1-2 (в), температура плиты в контрольных точках 1-3(г)

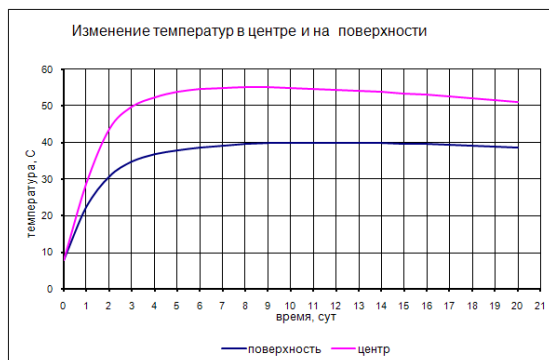
а)



б)



в)



г)

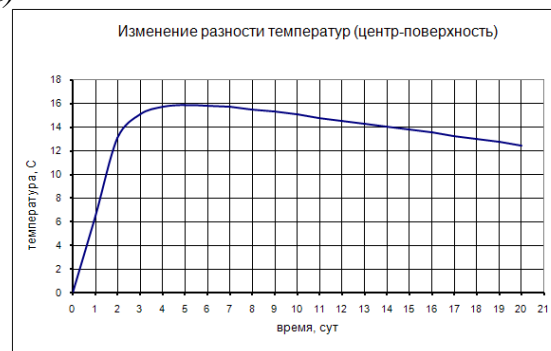
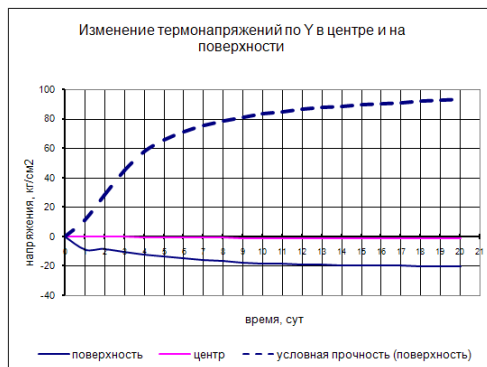
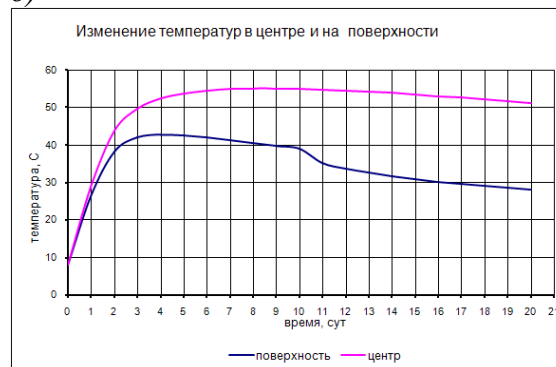


Рисунок 12 - Перепад температур плиты центр-поверхность в точках 1-3 (а), термонапряжения в контрольных точках 1-3(б), температура плиты в контрольных точках 4-5(в), перепад температур плиты центр-поверхность в точках 4-5(г)

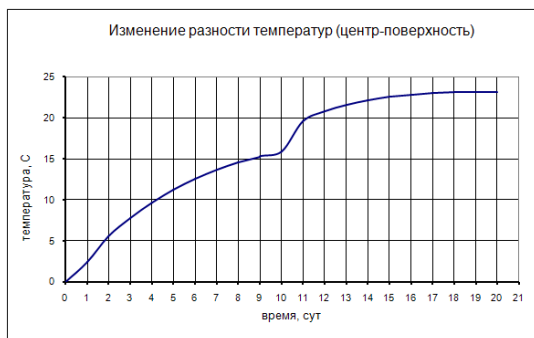
а)



б)



в)



г)

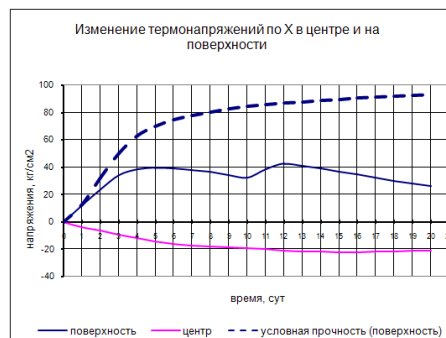


Рисунок 13 - Термонапряжения в контрольных точках 4-5 (а), температура плиты в контрольных точках 5-6(б), перепад температур плиты центр-поверхность в точках 5-6 (в), термонапряжения в контрольных точках 5-6 (г)

Заключение

Выполнено исследование термонапряженного состояния в массивных конструкциях фундамента Лахта Центр 2. Расчетная максимальная температура разогрева бетона в конструкции составила 58 °С. Расчетная оценка ТНС конструкции фундаментной плиты для варианта бетонирования отдельными захватками-секторами на всю высоту показывает, что трещиностойкость конструкции фундаментной плиты в целом обеспечивается при условии выполнения расчетных мероприятий по уходу за бетоном.

Первую захватку можно бетонировать без рисков трещинообразования при температуре в тепляке +10°С и температуре смеси не более +12°С. При бетонировании последующих захваток, из-за наличия рисков трещинообразования в контактной зоне между захватками, необходимо обеспечить температуру смеси в пределах +8°С. При температуре смеси +10°С для снятия рисков трещинообразования необходимо будет обеспечить температуру воздуха в тепляке в диапазоне +20...+25°С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. М.: Изд. ACB, 2022. 442 с.
2. Katzenbach R., Leppla S., Choudhury D. Foundation Systems for High-Rise Structures. London: Taylor & Francis Group, LLC, 2017. 292 p.
3. Poulos H.G. Tall buildings foundation design. London: Taylor & Francis Group, LLC, 2017. 561 p.
4. Доркин Н.И., Зубанов С.В. Технология возведения высотных монолитных железобетонных зданий. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2022. 238 с.
5. Лапидус А.А., Макаров А.Н. Устройство монолитных железобетонных конструкций. М., 2022. 67 с.
6. Батыновский Э.И. Технология монолитного бетонирования. Минск: Вышэйшая школа, 2021. 272 с.
7. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
8. Nguyen T.-C., Bui K.A. Thermal Cracks in Concrete Structure—The Basic Issues to Be Understood. Structural Health Monitoring and Engineering Structures. 2021. № 6. P. 229-240.
9. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Иванов С.И. Опыт бетонирования массивной густоармированной конструкции с обеспечением термической трещиностойкости. Строительные материалы. 2023. № 10. С. 15-24.
10. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. О влиянии условий выдерживания при возведении массивных монолитных железобетонных конструкций на прочность бетона. Инженерный вестник Дона. 2021. № 10.
11. Se-Jin J. Advanced Assessment of Cracking due to Heat of Hydration and Internal Restraint. American Concrete Institute Materials Journal. 2008. № 105. P. 325-333.
12. Запорожец И.Д., Огороков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона. Л., М.: Стройиздат, 1966. 313 с.
13. Ivanov E.N., Semenov K.S., Barabanshchikov Yu.G., Akimov S.V., Kuleshin A.S., Titov N.S. Concrete heat liberation in thermal stressed state analysis. Magazine of Civil Engineering. 2023. № 8(124). P. 12409.
14. Бушманова А.В., Харченко Д.К., Семенов К.В., Барабанщиков Ю.Г., Коровина В.К., Дернакова А.В. Термическая трещиностойкость массивных сталежелезобетонных конструкций. Инженерно-строительный журнал. 2018. № 3(79). С. 45-53.
15. Семенов К.В., Титов Н.С. Учет тепловыделения бетона в расчетах термической трещиностойкости массивных железобетонных конструкций. Инженерные исследования. 2024. № 1(16). С. 3-12.
16. Shen L., Ren Q., Cusatis G., Cao M., Xu L., Yang Y. Numerical study on crack thermal resistance effect on thermo-mechanical coupled behavior of concrete structure at room temperature. International Journal of Solids and Structures. 2020. Vol. 182-183, № 1. P. 141-155.
17. Семенов К.В., Барабанщиков Ю.Г. Термическая трещиностойкость массивных бетонных фундаментных плит и ее обеспечение в строительный период зимой. Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 2(17). С. 125-135.
18. Травуш В.И., Шахворостов А.И. Бетонирование нижней плиты коробчатого фундамента башни комплекса «Лахта центр». Высотные здания. 2015. № 1. С. 92-101.

19. Abdelrazaq A., Travush V., Shakhvorostov A., Timofeevich A., Desyatkin M., Jung H. The Structural Engineering Design And Construction Of The Tallest Building In Europe Lakhta Center, St. Petersburg, Russia. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2020. Vol. 9, No 3. P. 283-300.
20. Никифоров С.В. Особенности конструкции фундамента высотного здания «Лакhta Центра». Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Том 26, № 1. С. 180-192.

REFERENCES

1. Shulyatev O.A. *Foundations and Footings of High-Rise Buildings*. Moscow: ASV, 2022. 442 p.
2. Katzenbach R., Leppla S., Choudhury D. *Foundation Systems for High-Rise Structures*. London: Taylor & Francis Group, 2017. 292 p.
3. Poulos H.G. *Tall Buildings Foundation Design*. London: Taylor & Francis Group, 2017. 561 p.
4. Dorkin N.I., Zubanov S.V. *Construction Technology of High-Rise Monolithic Reinforced Concrete Buildings*. Moscow: FORUM: INFRA-M, 2022. 238 p.
5. Lapidus A.A., Makarov A.N. *Construction of Monolithic Reinforced Concrete Structures*. Moscow, 2022. 67 p.
6. Batyanovsky E.I. *Technology of Monolithic Concreting*. Minsk: Vysheishaya shkola, 2021. 272 p.
7. Trapeznikov L.P. *Thermal Crack Resistance of Massive Concrete Structures*. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 272 p.
8. Nguyen T.-C., Bui K.A. Thermal Cracks in Concrete Structure - The Basic Issues to Be Understood. *Structural Health Monitoring and Engineering Structures*. 2021. No. 6. Pp. 229-240.
9. Kapielov S.S., Sheinfeld A.V., Ivanov S.I. Experience in Concreting Massive Densely Reinforced Structures with Ensuring Thermal Crack Resistance. *Stroitelnye Materialy*. 2023. No. 10. Pp. 15-24. (in Russian)
10. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Sukhin D.P. On the Influence of Curing Conditions During Construction of Massive Monolithic Reinforced Concrete Structures on Concrete Strength. *Don Engineering Bulletin*. 2021. No. 10. (in Russian)
11. Se-Jin J. Advanced Assessment of Cracking due to Heat of Hydration and Internal Restraint. *American Concrete Institute Materials Journal*. 2008. No. 105. Pp. 325-333.
12. Zaporozhets I.D., Okorokov S.D., Pariysky A.A. *Concrete Heat Generation*. Leningrad, Moscow: Stroyizdat, 1966. 313 p. (in Russian)
13. Ivanov E.N., Semenov K.S., Barabanshchikov Yu.G., Akimov S.V., Kuleshin A.S., Titov N.S. Concrete Heat Liberation in Thermal Stressed State Analysis. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. No. 8(124). P. 12409.
14. Bushmanova A.V., Kharchenko D.K., Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G., Korovina V.K., Dernakova A.V. Thermal Crack Resistance of Massive Steel-Reinforced Concrete Structures. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal*. 2018. No. 3(79). Pp. 45-53. (in Russian)
15. Semenov K.V., Titov N.S. Accounting for Concrete Heat Generation in Calculations of Thermal Crack Resistance of Massive Reinforced Concrete Structures. *Engineering Research*. 2024. No. 1(16). Pp. 3-12. (in Russian)
16. Shen L., Ren Q., Cusatis G., Cao M., Xu L., Yang Y. Numerical Study on Crack Thermal Resistance Effect on Thermo-Mechanical Coupled Behavior of Concrete Structure at Room Temperature. *International Journal of Solids and Structures*. 2020. Vol. 182-183, No. 1. Pp. 141-155.
17. Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G. Thermal Crack Resistance of Massive Concrete Foundation Slabs and Its Provision During Winter Construction. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. No. 2(17). Pp. 125-135. (in Russian)
18. Travush V.I., Shakhvorostov A.I. Concreting of the Bottom Slab of the Box Foundation of the Lakhta Center Tower. *High-Rise Buildings*. 2015. No. 1. Pp. 92-101. (in Russian)
19. Abdelrazaq A., Travush V., Shakhvorostov A., Timofeevich A., Desyatkin M., Jung H. The Structural Engineering Design And Construction of the Tallest Building in Europe Lakhta Center, St. Petersburg, Russia. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2020. Vol. 9, No. 3. Pp. 283-300.
20. Nikiforov S.V. Features of the Foundation Design of the Lakhta Center High-Rise Building. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta*. 2024. Vol. 26, No. 1. Pp. 180-192. (in Russian)

Информация об авторах:

Сергей Владимирович Никифоров

Заместитель Генерального директора по проектированию

АО «Синергия», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sergeivnikiforov@gmail.com

Максимилиан Владимирович Терновский

Ведущий инженер

Научно-испытательная лаборатория «Политех-СКИМ-Тест», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ternovskij_mv@spbstu.ru

Information about authors:

Sergey V. Nikiforov

Deputy General Director for Design

JSC "Synergy", Saint Petersburg, Russia

E-mail: sergeivnikiforov@gmail.com

Maximilian V. Ternovsky

Lead Engineer

Research and Testing Laboratory "Polytech-SKiM-Test", Saint Petersburg, Russia

E-mail: ternovskij_mv@spbstu.ru

Статья поступила в редакцию 12.03.2025

Одобрена после рецензирования 09.06.2025

Принята к публикации 11.06.2025

The article was submitted 12.03.2025

Approved after reviewing 09.06.2025

Accepted for publication 11.06.2025