

В.И. ТРАВУШ<sup>1</sup>, С.В. НИКИФОРОВ<sup>2</sup><sup>1</sup> Российская академия архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия,<sup>2</sup>АО «Синергия», Санкт-Петербург, Россия

## ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНИРОВАНИЯ МАССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ МФК «ЛАХТА ЦЕНТР»

**Аннотация.** В статье рассматриваются технологические принципы бетонирования массивных бетонных конструкций на примере нижней плиты фундамента высотного здания Башня комплекса «Лакhta Центр» в Санкт-Петербурге. Цель исследования. Разработка рекомендаций по организации технологического процесса бетонирования, обеспечивающего устройство массивной конструкции с заданными проектными характеристиками. Для достижения поставленной цели были сформулированы основные принципы организации технологического процесса бетонирования и ухода за конструкцией, основанные на требованиях обеспечения непрерывности бетонирования и отсутствия температурно-усадочных трещин. Основные результаты данного исследования могут быть применены при проектировании и устройстве массивных фундаментных конструкций уникальных зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** бетонные конструкции, технология, бетонирование, бетонная смесь, трещиностойкость, уход за бетоном.

V.I. TRAVUSH<sup>1</sup>, S.V. NIKIFOROV<sup>2</sup><sup>1</sup> Russian Academy of architecture and construction, Moscow, Russia,<sup>2</sup> JSC “Synergy”, St. Petersburg, Russia

## TECHNOLOGY OF CONCRETING MASSIVE STRUCTURES OF THE FOUNDATIONS OF THE LAKHTA CENTER MULTIFUNCTIONAL COMPLEX

**Abstract** The article reviews the technological principles of concreting massive concrete structures, using the example of the Lakhta Center Tower the lower slab foundation in Saint Petersburg. Based on the requirement to ensure continuity in the concreting process, recommendations are provided for organizing the technological process that ensures the construction of a massive structure with specified design characteristics. The principles of curing the structure are examined to prevent the occurrence of temperature-shrinkage cracks. The main results of this research can be applied in the design and construction of massive foundation structures for unique buildings and structures.

**Key words:** concrete structures, technology, concreting, concrete mix, crack capacity, concrete curing

### Введение

27 марта 2015 года судья Книги рекордов Гиннеса вручил руководителям АО МФК «Лакhta центр» сертификат об установлении нового рекорда непрерывного бетонирования, который был зарегистрирован при заливке нижней плиты фундамента высотного здания комплекса «Лакhta Центр», продолжавшейся с 20 часов 27 февраля до 21 часа 1 марта 2015 года. За 49 часов в основание уложено 19 624 кубических метра бетонной смеси, что более чем на три тысячи кубометров превосходило зарегистрированный в Книге Гиннеса мировой рекорд [1, 2].

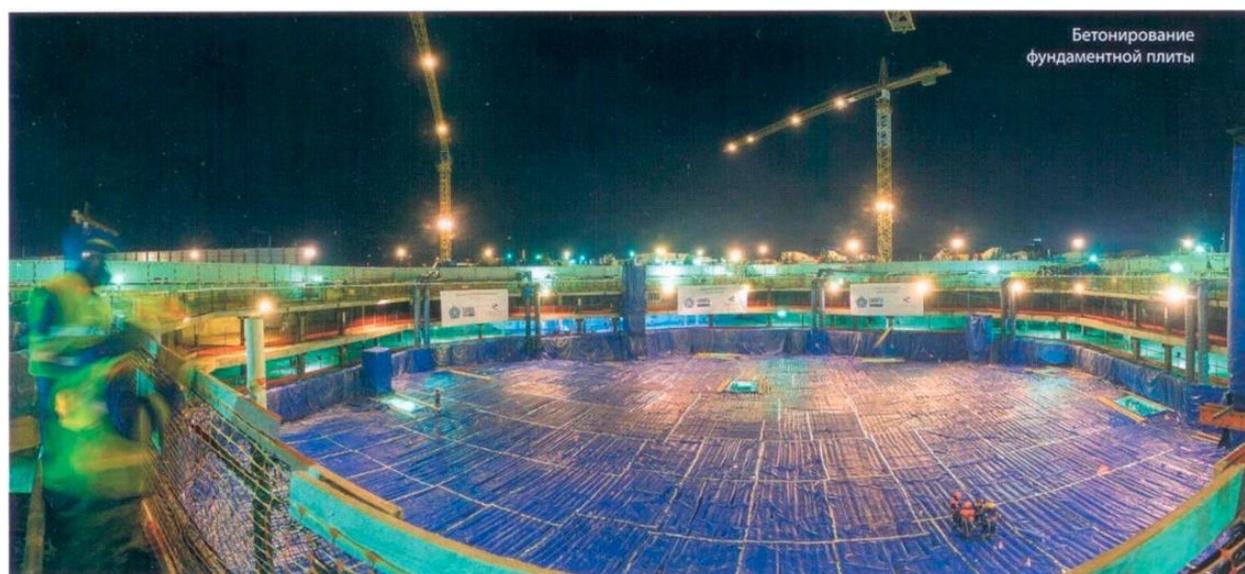


Рисунок 1. - Бетонирование фундаментной плиты коробчатого фундамента

Для бетонирования плиты был разработан специальный технологический регламент [3, 4], согласно которому бетонирование должно осуществляться непрерывно на всю высоту конструкции с равномерной укладкой смеси по всей площади от основания плиты к верху с перемещением фронта укладки смеси по вертикали.

С тех пор были зафиксированы новые рекорды, например, 7 января 2019 года при строительстве плотины Полаварам в Индии было залито 32315,5 кубометров бетона за 24 часа. Правда следует отметить, что процент армирования нижней плиты высотного здания значительно выше процента армирования железобетонного экрана плотины, что существенно усложняет процесс заливки и требует создания специальных типов бетонных смесей с высокой подвижностью.

Однако до сих пор встречается мнение [5], что непрерывное бетонирование возможно только в сравнительно простых конструкциях при незначительных объемах бетонных работ. По мнению авторов, в процессе возведения массивных монолитных фундаментов перерывы в бетонировании неизбежны, поэтому необходимо разбивать фронт работ на захватки бетонирования, между которыми устраиваются рабочие или холодные швы.

Выбор способов бетонирования и обоснование режимов выдерживания фундаментов возводимых высотных зданий зависят от температуры окружающего воздуха, сроков возведения массивных бетонируемых конструкций, а также от принятых организационно-технологических решений по строительству объекта. Важнейшей особенностью высотного строительства является сосредоточенность больших объемов монолитного бетона в пятне застройки, достигающая 50–60 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> (с учетом устройства фундаментов [4]).

На примере строительства 86-этажного здания Башни «Лахта-центр» в Санкт-Петербурге обосновываются организационно-технологические решения, принятые для возведения массивных конструкций фундаментов высотного здания, которые предусматривают определенный порядок устройства защиты и условия охлаждения бетона.

## Метод

### Конструкция фундаментной плиты высотного здания Башня

#### Конструкция плиты

Фундамент здания Башня МФК «Лахта Центр» в плане имеет пятиугольную конфигурацию с длиной каждой из боковых граней 57,25 м, состоит из нижней и верхней плит, стен и промежуточного перекрытия, что придаёт конструкции коробчатую форму. Общая высота конструкции 16,60 м, общий объем бетона около 46 тыс. м<sup>3</sup> [6]. Исходя из

технологических соображений, по очередности их возведения, вся конструкция условно разделена на три части (см. рис. 2), в том числе:

- **первая очередь** – нижняя монолитная железобетонная плита толщиной 3,6 м и объемом около 20,3 тыс. м<sup>3</sup> из бетона класса по прочности на сжатие В60;
- **вторая очередь** – средняя часть фундамента высотой 11,00 м и объемом около 15,5 тыс. м<sup>3</sup>, включающая монолитные конструкции железобетонных стен из бетона класса по прочности на сжатие В80 и железобетонного перекрытия толщиной 0,40 м из бетона класса по прочности на сжатие В60;
- **третья очередь** – верхняя монолитная железобетонная плита толщиной 2,0 м и объемом около 10,5 тыс. м<sup>3</sup> из бетона класса по прочности на сжатие В80.



Рисунок 2. - Разрез коробчатого фундамента

Нижняя монолитная железобетонная плита коробчатого фундамента [3, 4] имеет пятиугольную в плане конфигурацию с длиной боковой грани 57,25 м, размерами по диагоналям 88...93 м и по высоте 3,6 м, опирается на свайное основание и бетонную подготовку. Отметки плиты: низ -21,250 м, верх -17,650 м. Схема плиты представлена на рис. 3.

Проектные характеристики бетона нижней плиты следующие:

- класс по прочности на сжатие В60;
- марка по водонепроницаемости W8;
- марка по морозостойкости F1150.

Армирование нижней фундаментной плиты осуществляется рабочей арматурой класса А500С диаметром от 32 до 36 мм. Арматурный каркас состоит из горизонтальных сеток с шагом стержней 150 мм, равномерно распределенных по высоте конструкции плиты. Шаг между горизонтальными сетками составляет от 200 до 300 мм. Средний расход арматуры составляет 452 кг/м<sup>3</sup>. Защитный слой бетона – 68 мм. В защитном слое бетона на расстоянии 25 мм от поверхности плиты устанавливается противоусадочная сетка С-1 5Вр-1 с ячейкой 100×100 мм.

*Требования к бетону и бетонной смеси*

Бетон в конструкции нижней плиты коробчатого фундамента в возрасте не менее 90 суток с учетом фактического коэффициента вариации должен соответствовать классу по прочности на сжатие В60; марке по водонепроницаемости W8; марке по морозостойкости F1150. Требуемая прочность бетона в партиях бетонных смесей, доставленных на стройплощадку, в возрасте 90 суток нормального твердения должна быть не менее 68,4 МПа.

Бетон должен обладать минимальной экзотермией и замедленной в раннем возрасте кинетикой твердения в нормальных температурно-влажностных условиях [7]. При этом требуемая прочность бетона на сжатие должны быть следующие: в возрасте не менее 1 суток – 0 МПа, в возрасте не менее 3 суток – 15 МПа, в возрасте не менее 7 суток – 40 МПа, в возрасте не менее 28 суток – 65 МПа.

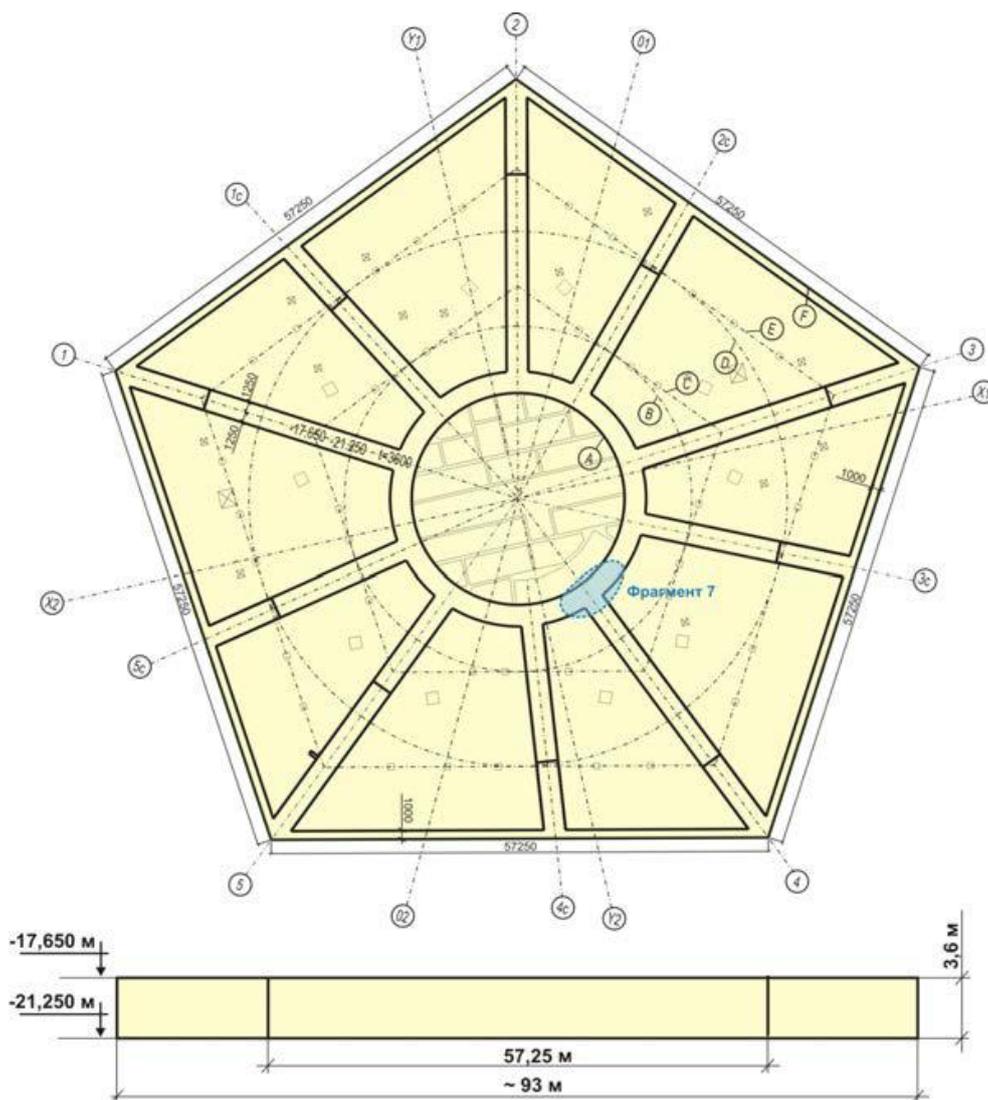


Рисунок 3 - Схема нижней плиты коробчатого фундамента

Учитывая толщину и насыщенность нижней плиты коробчатого фундамента арматурой, при бетонировании необходимо использовать высокоподвижную не расслаивающуюся смесь, относящуюся к категории самоуплотняющихся [8-10]. Поступающая на стройплощадку бетонная смесь должна обозначаться маркой обладать следующими характеристиками:

- подвижность (распływ стандартного конуса) в момент выгрузки в бункер бетононасоса – в диапазоне 60...65 см;
- расслаиваемость (по водоотделению) – не более 0,4%;
- средняя плотность – 2350 ÷ 2410 кг/м<sup>3</sup>;
- температура - +5...+15°C.

## 2. Условия производства работ и основные принципы технологии

Нижняя плита коробчатого фундамента возводилась в зимний период со среднесуточной температурой окружающей среды -6°C. Средняя температура фундаментной плиты в режиме эксплуатации около +8°C.

Главными условиями, определившими, выбор способов производства работ являлись:

- а) непрерывное бетонирование всей плиты объемом около 21,6 тыс.м<sup>3</sup> в течение 3-х суток;

б) обеспечение требуемых, проектных, характеристик бетона в конструкции в возрасте не более 90 сут;

в) обеспечение термической трещиностойкости конструкции, т.е. предотвращение термических трещин в конструкции, связанных с неравномерным саморазогревом и остыванием плиты после бетонирования [11-12].

В основе регламента бетонирования лежат следующие технологические принципы:

1. Бетонирование фундаментной плиты осуществляется непрерывно на всю высоту (толщину) конструкции с равномерной укладкой смеси по всей площади конструкции от основания плиты к верху с перемещением фронта укладки смеси по вертикали.

2. Средняя скорость бетонирования должна быть не менее 450 м<sup>3</sup>/час.

3. В целях уменьшения экзотермии бетона класса В60 соблюдаются следующие условия [7, 13]:

–бетонные смеси должны обладать низким энергетическим потенциалом – иметь минимизированный для данного класса бетона расход цемента не выше 360 кг/м<sup>3</sup> в пересчете на клинкер;

–для производства бетонных смесей применяется портландцемент, содержащий СЗА в количестве не более 8%;

–бетонные смеси, доставленные на стройплощадку, должны иметь температуру в диапазоне +5...+15оС.

4. Расчетный прирост температуры бетона в ядре плиты (относительно температуры уложенной в конструкцию смеси) не более 50°С.

5. Выдерживание бетона в конструкции осуществляется в условиях, предотвращающих термическую усадку с обеспечением:

–скорости остывания бетона в ядре плиты не более 2,0 – 3,0°С в сутки;

–перепада температур между зонами, имеющими общую границу по высоте плиты не более 20°С. Допускаемое превышение указанной критической разности температур на 2°С не приведет к образованию трещин с раскрытием, превышающим нормативное значение;

Параметры набора прочности приведены в соответствие с кинетикой твердения выбранного состава бетона. Вышеизложенные принципы, касающиеся температурных характеристик бетона и особенностей ухода за конструкцией, изображены на рис. 4.

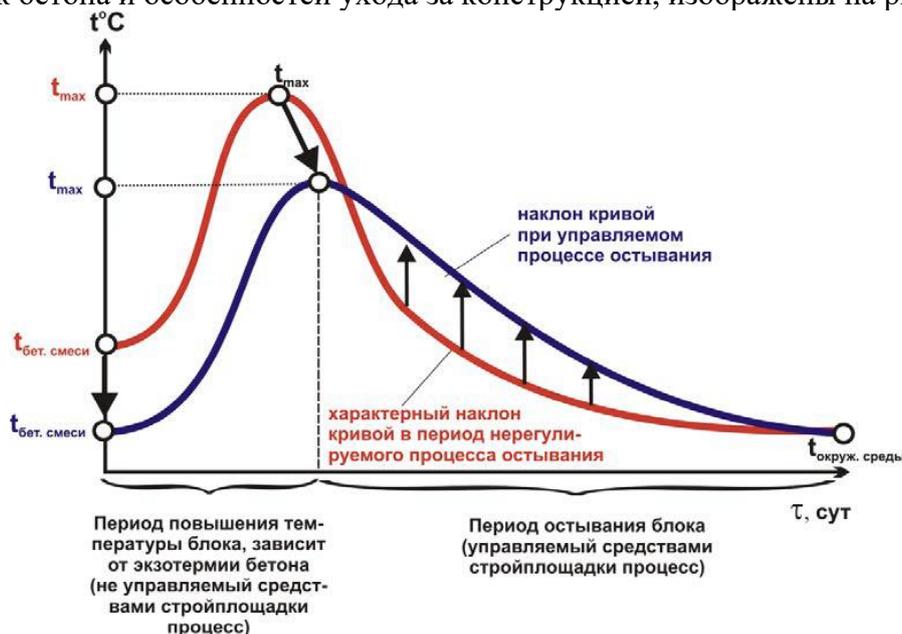


Рисунок 4 - Принципиальная схема управления температурными параметрами бетонной смеси и бетона в конструкции в процессе ее выдерживания

### 3. Приготовление бетонной смеси и бетонные работы

#### Приготовление бетонной смеси

Приготовление бетонной смеси осуществляется по стандартной технологической схеме с учетом особенности, связанной с порядком загрузки и перемешивания основных компонентов смеси и порошкообразных добавок в соответствии с составом бетонной смеси [14-15].

Особенность заключается в том, что приготовление бетонной смеси должно рассматриваться как двухстадийный процесс, состоящий из:

- стадии дозирования, загрузки и перемешивания компонентов в стационарном смесителе бетонного завода;
- стадии перемешивания в автобетоносмесителе в процессе транспортировки смесей до стройплощадки.

Первая стадия является основной, вторая – дополнительной, способствующей гомогенизации смеси и стабилизации ее консистенции при транспортировке.

Последовательность загрузки материалов в стационарный бетоносмеситель принудительного действия и длительность их перемешивания должна быть следующей:

- загрузка (через дозаторы заполнителей) щебня и песка с перемешиванием в течение 10 сек;
- загрузка воды затворения и пластифицирующих добавок;
- загрузка (через дозатор цемента) цемента и минеральных добавок шлака с перемешиванием 10 сек;
- перемешивание загруженных в смеситель материалов в течение 60...150 сек.

Наладка технологии перед началом массового производства смесей (в начале бетонирования) осуществляется по схеме на рис. 5а. При наладке технологии, после загрузки всех материалов и перемешивания в стационарном смесителе в течение 150 сек, отбираются пробы бетонной смеси для контроля заданных параметров бетонной смеси. При определении соответствия параметров бетонной смеси требуемым критериям, наладка технологии считается выполненной.

После наладки и контроля параметров первых партий смесей, приготовление осуществляется по схеме на рис. 5б с укороченным периодом перемешивания в стационарном смесителе. При этом имеется ввиду, что дальнейшее перемешивание осуществляется в автобетоносмесителе.

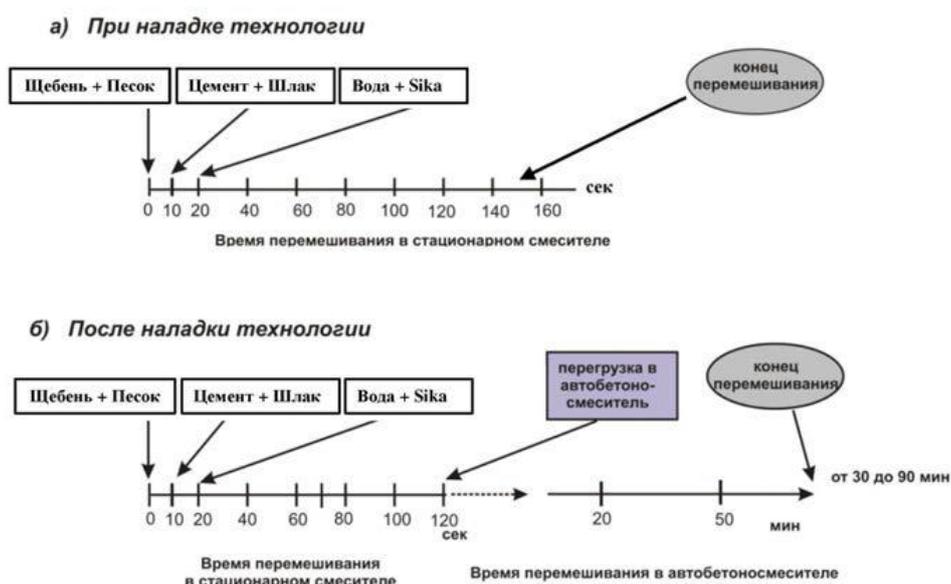


Рисунок 5 - Последовательность загрузки материалов и длительность их перемешивания

### *Бетонные работы*

Работы по бетонированию нижней плиты коробчатого фундамента начинаются при следующих условиях:

- после приёмки арматурных работ и системы мониторинга за деформациями и напряжениями в конструкции службами авторского и технического надзора;
- при устоявшейся в течение 24 часов температуре основания и арматурного каркаса не ниже +3°C;
- после выполнения подготовительных работ.

Основные виды подготовительных работ, включающих комплекс мероприятий, обеспечивающих реализацию регламентированных технологических процессов, включают следующие мероприятия:

- устройство защитного шатра;
- устройство автоматизированной системы контроля температуры;
- установка бетонолитных труб, подготовка бетононасосов и вспомогательной оснастки;
- подготовка поста для контроля качества бетонной смеси;
- прочие вспомогательные работы.

Защитный шатер предназначен для защиты от атмосферных осадков и обеспечения регламентированных требований к температурному режиму выдерживания бетона, а также для комфортной организации работ над всем фронтом бетонирования [16].

Контроль температурного режима твердения бетона производится при помощи автоматизированной системы. Регистрация температуры осуществляется с помощью датчиков, установленных в разных зонах бетонируемой плиты: в ядре и на периферии конструкции на трех высотных отметках, а также в верхней зоне плиты на участках, где планируется возведение стен коробчатого фундамента.

Бетонолитные трубы предназначены для направления бетонной смеси в нижний и средний ярусы конструкции плиты с целью предотвращения расслоения смеси, сбрасываемой сквозь горизонтальные арматурные сетки. При установке бетонолитных труб, расстановке бетононасосов и монтаже стационарных бетоноводов следует исходить из необходимости обеспечить более интенсивную укладку смесей в центральную зону плиты, в контуре опирания круглой стены ядра жёсткости.

Лабораторный пост контроля качества бетонной смеси организуется непосредственно при въезде на строительную площадку. На разгрузку (к бетононасосам) автобетоносмесители поступают только после проверки качества бетонной смеси и разрешения лабораторной службы.

Бетонная смесь, поступившая на стройплощадку с подвижностью (РК), более 65 см, имеющая признаки расслоения, возвращается на заводы – поставщики. При поступлении на стройплощадку бетонной смеси с расплывом конуса  $50 \div 60$  см, смесь направляется на заводы на строительной площадке для корректировки бетонной смеси [17].

Подача бетонной смеси в зоны укладки осуществляется одновременно всеми бетононасосами в расчете на равномерное распределение смеси по всей площади плиты (рис. б). При этом для обеспечения растекания смеси от центра к периферии конструкции, скорость укладки бетона в центральную зону плиты (в круглом контуре стен) должна быть выше, чем в периферийные зоны.

От каждого из стальных бетоноводов через гибкое звено смесь последовательно порционно подается к бетонолитным трубам. После укладки каждой порции подача смеси осуществляется в следующую бетонолитную трубу. Ориентировочная площадь распространения бетонной смеси от каждой бетонолитной трубы 130-133 м<sup>2</sup>, а скорость подъема слоя уложенного самоуплотнившегося бетона 7,0...7,5 см/час.

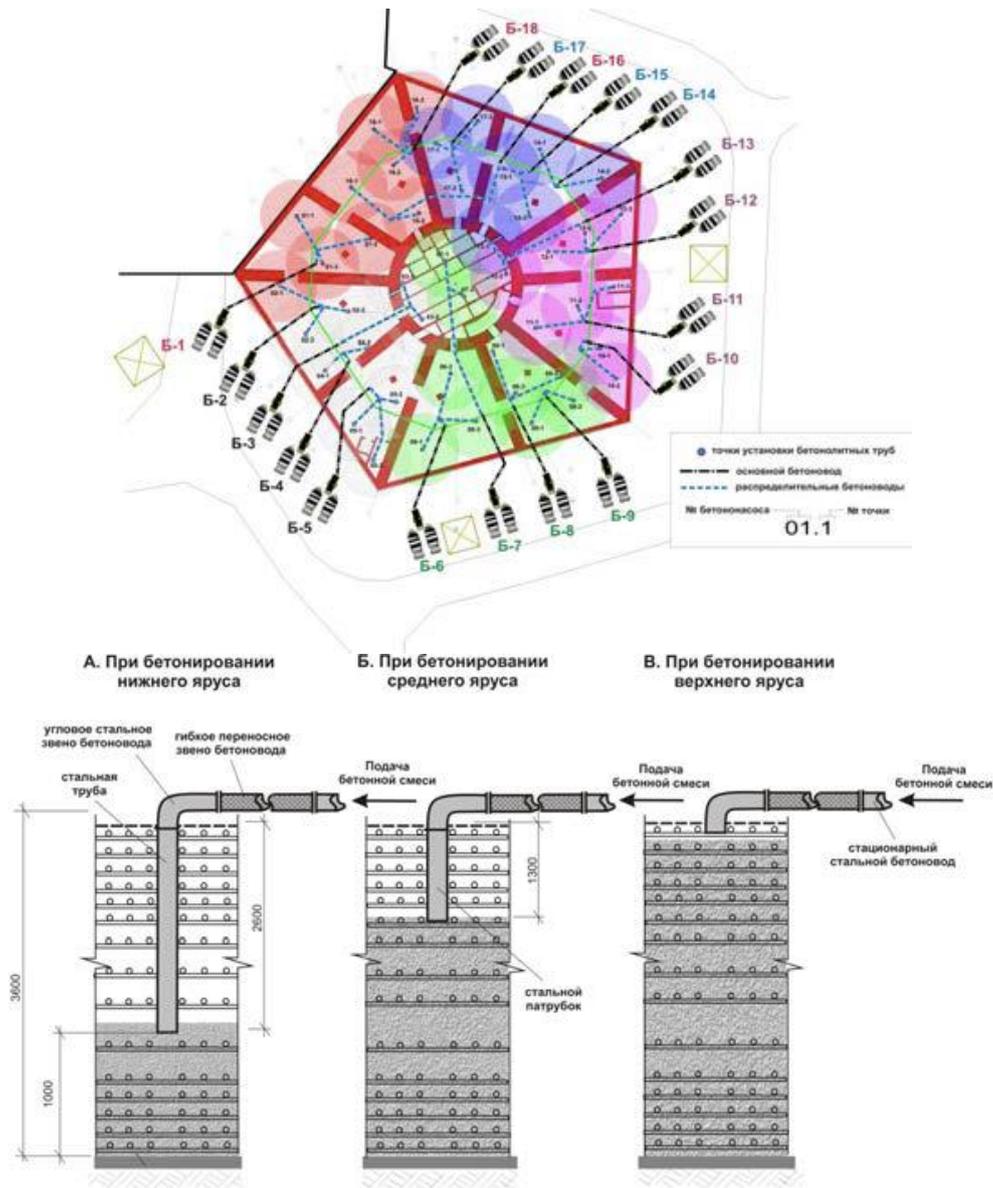


Рисунок 6 - Схема укладки бетонной смеси и направление фронта бетонирования

При использовании самоуплотняющейся бетонной смеси её уплотнение при укладке в конструкцию должно происходить под действием силы тяжести без принудительного вибровоздействия. При временной остановке укладки смеси (непредвиденных перерывах более 1 часа), перед возобновлением бетонирования допускается использование глубинных вибраторов для возбуждения поверхности уплотнившейся смеси и предотвращения горизонтальных холодных швов по всему фронту бетонирования [18].

#### 4. Уход за бетоном конструкции

После окончания бетонирования следует организовать уход за бетоном фундаментной плиты с целью обеспечения набора прочности и предупреждения появления температурно-усадочных трещин [11-13, 16]. Принципы ухода за бетоном фундаментной плиты обоснованы расчетом термонапряженного состояния конструкции и заключаются в устройстве покрытия из теплоизолирующих рулонных материалов после окончания бетонирования и устройства влагонепроницаемого покрытия по данным мониторинга температуры при достижении перепада температур между ядром и поверхностным слоем максимум 20°C.

Без применения указанных мероприятий по регулированию температурного режима трещиностойкость фундаментной плиты не обеспечивается. Образование трещин в этом случае происходит в начальные сроки твердения бетона от 2 до 9 суток.

Мероприятия по уходу за бетоном конструкций должны выполняться с учетом заданных и прогнозируемых температурных параметров (рис. 7).

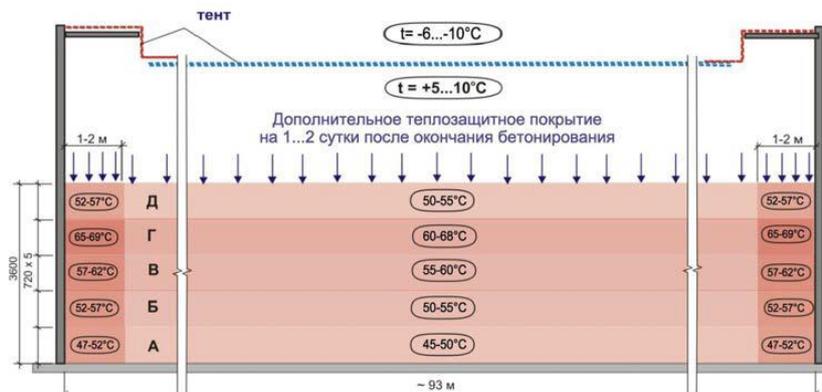


Рисунок 7 - Максимальные значения температуры в разных зонах плиты на 6-7 сутки после бетонирования

Трещиностойкость бетона в период твердения обеспечивается путем применения временного укрытия (тепняка) и поверхностной теплоизоляции.

Фундаментная плита бетонировается и выдерживается в осенне-зимний период года под тентом, где на период выдерживания бетона поддерживается температура воздуха +10°C; верхняя поверхность плиты должна быть укрыта теплозащитным покрытием с коэффициентом теплопередачи не выше значения, определяемого по результатам расчета термонапряженного состояния [19-20].

Для выбора теплоизоляционного материала используется формула:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{d}{\lambda};]$$

где  $\beta$  – коэффициент теплопередачи (Вт/м<sup>2</sup>·°C), полученный по результатам расчета термонапряженного состояния плиты;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала по ГОСТ 7076-99, указанный в спецификации материала (Вт/м·°C);

$d$  – толщина теплоизоляционного материала (м).

Для фундаментной плиты коробчатого фундамента здания Башня (см. рис. 3) при температуре наружного воздуха в осенне-зимний период -5...+5°C и температуре под тентом +10 °C мощность поверхностной теплоизоляции должна составлять не более  $\beta_{пр} = 0,75$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C), т.е. слой теплоизоляции должен иметь толщину не менее 4 см для материала Этафом с  $\lambda = 0,03$  Вт/(м·°C). При выборе другого теплоизоляционного материала его толщину определяют по формуле под требуемый коэффициент теплопередачи.

Критический перепад температуры между центром и верхней поверхностью составляет 17+3°C, между центром и нижней поверхностью – 20+3°C. Допускаемое превышение указанной критической разности температур на 3°C не приведет к образованию трещин с раскрытием, превышающим нормативное значение. Указанные перепады температур актуальны в первые 9 суток с момента укладки, а в дальнейшем могут быть выше.

Максимальная температура в ядре бетонного массива согласно расчету при начальной температуре бетонной смеси 15°C составляет 68°C, при температуре бетонной смеси 10°C – 63°C. Перед укладкой бетона необходим прогрев основания как минимум до 3°C.

Теплоизоляцию следует устанавливать, как только верхний слой приобретет достаточную для этого твердость. Срок безопасного снятия тепляка при сохранении теплоизоляции при температуре наружного воздуха до  $-10^{\circ}\text{C}$  составляет не менее 6-ти суток после укладки. При понижении температуры воздуха ниже  $-10^{\circ}\text{C}$  этот срок должен быть увеличен до 7-11 суток.

До снятия тента необходимо обеспечить теплозащиту холодных выпусков арматуры путем закрытия их сверху 3 слоями Этафома, либо одним слоем Этафома и надеванием на выпуски теплоизолирующих чехлов, типа Вилатерм. После снятия тента устанавливаются леса для монтажа арматурных каркасов стен, по которым устанавливается укрытие в виде тента. Воздух внутри тента прогревается до перепада температур между поверхностью бетона и воздухом не более  $17^{\circ}\text{C}$ . После этого с выпусков арматуры снимается Этафон и/или Вилатерм.

### Результаты и обсуждение

Описанная в настоящей статье технология устройства массивных бетонных конструкций, использовавшаяся при бетонировании нижней плиты коробчатого фундамента здания Башня МФУК «Лахта Центр», иллюстрирует возможность организации непрерывного бетонирования на всю высоту конструкции с равномерной укладкой смеси по всей площади от основания плиты к верху с перемещением фронта укладки смеси по вертикали.

При организации процесса непрерывного бетонирования необходимо руководствоваться сформулированными выше технологическими принципами, важнейшими из которых являются:

- обеспечение расчетных характеристик бетонной смеси по подвижности и расслаиваемости;
- организация бесперебойной доставки бетонной смеси на строительную площадку;
- размещение бетононасосов и бетонолитных труб, обеспечивающее равномерное распределение смеси по всей площади конструкции;
- организация ухода за бетоном с целью обеспечения набора прочности и предупреждения появления температурно-усадочных трещин.

Трещиностойкость бетона в период твердения обеспечивается путем применения временного укрытия (тепляка) и поверхностной теплоизоляции. Материал и толщина теплоизоляции определяются по результатам расчета термонапряженного состояния блока.

### Заключение

1. Технология устройства массивных бетонных конструкций, примененная при строительстве нижней плиты фундамента «Лахта Центр», демонстрирует возможность непрерывного бетонирования на всю высоту конструкции с равномерным распределением смеси и вертикальным перемещением фронта укладки.
2. Для успешной организации непрерывного бетонирования необходимо соблюдение ключевых технологических принципов, включая контроль подвижности и расслаиваемости бетонной смеси, бесперебойную доставку материала, правильное размещение бетононасосов и бетонолитных труб, а также эффективный уход за бетоном для предотвращения трещинообразования.
3. Обеспечение трещиностойкости бетона в период твердения достигается за счет применения временного укрытия (тепляка) и поверхностной теплоизоляции, параметры которой определяются на основе расчета термонапряженного состояния конструкции.
4. Реализация данной технологии требует тщательного планирования и контроля всех этапов бетонирования, включая логистику, распределение смеси и термовлажностный режим, что позволяет минимизировать дефекты и обеспечить долговечность конструкции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Илюхина Е.А., Лахман С.И., Миллер А.Б., Травуш В.И. Конструктивные решения высотного здания «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 3. С. 110-121.

2. Abdelrazaq Ahmad, Travush Vladimir, Shakhvorostov Alexey, Timofeevich Alexander, Desyatkin Mikhail, Jung Hyungil. 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. № 3. Pp. 283-300.
3. Никифоров С.В. Особенности конструкции фундамента высотного здания «Лакhta Центра» // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2024. Том 26. №1. С. 180-192.
4. Травуш В.И., Шахворостов А.И. Бетонирование нижней плиты коробчатого фундамента башни комплекса «Лакhta центр» // *Высотные здания*. 2015. №1. С. 92-101.
5. Велиджанов А.Т. Анализ основных нормативных требований при возведении монолитных фундаментов зданий и сооружений // *Актуальные исследования*. 2024. № 5 (187). С. 44-46.
6. Лакhta Центр. *Tatlin Plan*. 2018. № 36(178). 136 с.
7. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.Д. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов // *Строительные материалы* // 2022. № 10 С. 41-51.
8. Zongjin Li. *Advanced concrete technology*. 2011. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 521 p.
9. Комаринский М.В. Смирнов С.И. Бурцева Д.Е. Литые и самоуплотняющиеся бетонные смеси // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 11(38). С. 106-118.
10. Батяновский Э. И., Бондарович А. И., Калиновская Н. Н., Рябчиков П. В. Самоуплотняющийся бетон и технология бетонирования фундаментного массива с использованием 9000 кубических метров бетона // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 329-337.
11. 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.
12. Каприелов С.С., А.В. Шейнфельд, С.И. Иванов Опыт бетонирования массивной густоармированной конструкции с обеспечением термической трещиностойкости // *Строительные материалы* 2023. № 10. С. 15-24.
13. Семенов К.В., Титов Н.С. Учет тепловыделения бетона в расчетах термической трещиностойкости массивных железобетонных конструкций // *Инженерные исследования*. 2024, №1 (16). С. 3-12.
14. Баженов Ю.М. *Технология бетона*. М.: АСВ. 2011. 529 с.
15. Тихонов А. Ф., Королев К. М. *Автоматизированные бетоносмесительные установки и заводы*. М.: Высш. шк., 1990. 191 с.
16. Колчеданцев Л.М., Осипенкова Г.И. Особенности организационно-технологических решений при возведении высотных зданий // *Жилищное строительство*. 2013. № 9. С. 1-3.
17. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А. Особенности системы контроля качества высокопрочных бетонов // *Строительные материалы*. 2012. № 2. С. 63-67.
18. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Сухин Д.П. Некоторые технологические параметры устройства рабочих швов при применении самоуплотняющихся бетонных смесей // *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023. № 2(3). С. 31–39.
19. 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.
20. Ivanov, E.N., Semenov, K.S., Barabanshchikov, Yu.G., Akimov, S.V., Kuleshin, A.S., Titov, N.T. Concrete heat liberation in thermal stressed state analysis. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. 124(8). Article no. 12409. DOI: 10.34910/MCE.124.9.

## REFERENCES

1. Plyukhina E.A., Lakhman S.I., Miller A.B., Travush V.I. Konstruktivnyye resheniya vysotnogo zdaniya «Lakhta Tsentra» v Sankt-Peterburge [Structural solutions for the Lakhta Center skyscraper in St. Petersburg]. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2019. No. 3. Pp. 110–121. (rus).
2. Abdelrazaq Ahmad, Travush Vladimir, Shakhvorostov Alexey, Timofeevich Alexander, Desyatkin Mikhail, Jung Hyungil. 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.
3. Nikiforov S.V. Osobennosti konstruksii fundamenta vysotnogo zdaniya «Lakhta Tsentra» [Features of the foundation design of the Lakhta Center skyscraper]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2024. Vol. 26. No. 1. Pp. 180–192. (rus).
4. Travush V.I., Shakhvorostov A.I. Betonirovaniye nizhney plity korobchatogo fundamenta bashni kompleksa «Lakhta Tsentra» [Concreting of the lower slab of the box foundation of the Lakhta Center tower]. *Vysotnyye zdaniya*. 2015. No. 1. Pp. 92–101. (rus).
5. Velidzhanov A.T. Analiz osnovnykh normativnykh trebovaniy pri vozvedenii monolitnykh fundamentov zdaniy i sooruzheniy [Analysis of regulatory requirements for monolithic foundations]. *Aktualnyye issledovaniya*. 2024. No. 5 (187). Pp. 44–46. (rus).
6. Lakhta Tsentra. *Tatlin Plan*. 2018. No. 36(178). 136 p. (rus).

7. Kapriylov S.S., Sheynfeld A.V., Chilin I.D. Optimizatsiya parametrov tekhnologii betona dlya obespecheniya termicheskoy treshchinostoykosti massivnykh fundamentov [Optimization of concrete technology for thermal crack resistance in massive foundations]. *Stroitelnyye materialy*. 2022. No. 10. Pp. 41–51. (rus).
8. Zongjin Li. *Advanced Concrete Technology*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 521 p.
9. Komarinskiy M.V., Smirnov S.I., Burtseva D.E. Lityye i samouplotnyayushchiyesya betonnyye smesi [Cast and self-compacting concrete mixtures]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2015. No. 11(38). Pp. 106–118. (rus).
10. Batyanovskiy E.I., Bondarovich A.I., Kalinovskaya N.N., Ryabchikov P.V. Samouplotnyayushchiysya beton i tekhnologiya betonirovaniya fundamentnogo massiva s ispolzovaniyem 9000 kubichetskikh metrov betona [Self-compacting concrete and foundation concreting technology using 9000 m<sup>3</sup> of concrete]. *Nauka i tekhnika*. 2021. Vol. 20. No. 4. Pp. 329–337. (rus).
11. Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G. Termicheskaya treshchinostoykost massivnykh betonnykh fundamentnykh plit i yeye obespecheniye v stroitelnyy period zimoy [Thermal crack resistance of massive concrete foundation slabs and its provision during winter construction]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2014. No. 2 (17). Pp. 125–135. (rus).
12. Kapriylov S.S., Sheynfeld A.V., Ivanov S.I. Opyt betonirovaniya massivnoy gustoarmirovannoy konstruktсии s obespecheniyem termicheskoy treshchinostoykosti [Experience in concreting a massive densely reinforced structure with thermal crack resistance]. *Stroitelnyye materialy*. 2023. No. 10. Pp. 15–24. (rus).
13. Semenov K.V., Titov N.S. Uchet teplovydeleniya betona v raschetakh termicheskoy treshchinostoykosti massivnykh zhelezobetonnykh konstruktсий [Accounting for concrete heat generation in thermal crack resistance calculations]. *Inzhenernyye issledovaniya*. 2024. No. 1 (16). Pp. 3–12. (rus).
14. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona* [Technology of Concrete]. Moscow: ASV, 2011. 529 p. (rus).
15. Tikhonov A.F., Korolev K.M. *Avtomatizirovannyye betonosmesitelnyye ustanovki i zavody* [Automated Concrete Mixing Plants]. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. 191 p. (rus).
16. Kolchedantsev L.M., Osipenkova G.I. Osobennosti organizatsionno-tekhnologicheskikh resheniy pri vozvedenii vysotnykh zdaniy [Organizational and technological solutions for high-rise construction]. *Zhilishchnoye stroitelstvo*. 2013. No. 9. Pp. 1–3. (rus).
17. Kapriylov S.S., Sheynfeld A.V., Kiseleva Yu.A. Osobennosti sistemy kontrolya kachestva vysokoprochnykh betonov [Quality control system for high-strength concrete]. *Stroitelnyye materialy*. 2012. No. 2. Pp. 63–67. (rus).
18. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Sukhin D.P. Nekotoryye tekhnologicheskiye parametry ustroystva rabochikh shvov pri primenenii samouplotnyayushchikhsya betonnykh smesey [Technological parameters of jointing with self-compacting concrete]. *Sovremennyye tendentsii v stroitelstve, gradostroitelstve i planirovke territoriy*. 2023. No. 2(3). Pp. 31–39. (rus).
19. Bushmanova A.V., Kharchenko D.K., Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G., Korovina V.K., Dernakova A.V. Termicheskaya treshchinostoykost massivnykh stalezhelezobetonnykh konstruktсий [Thermal crack resistance of massive steel-reinforced concrete structures]. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2018. No. 3(79). Pp. 45–53. (rus).
20. Ivanov E.N., Semenov K.S., Barabanshchikov Yu.G., Akimov S.V., Kuleshin A.S., Titov N.T. Concrete heat liberation in thermal stressed state analysis. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. Vol. 124. No. 8. Art. 12409. DOI: 10.34910/MCE.124.9.

#### Информация об авторах:

##### Травуш Владимир Ильич

Российская академия архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия,  
Д-р техн. наук, проф.,  
E-mail: [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru)

##### Никифоров Сергей Владимирович

Директор по проектированию ([sergeivnikiforov@gmail.com](mailto:sergeivnikiforov@gmail.com))  
АО «Синергия», Санкт-Петербург, Россия

#### Information about author:

##### Travush Vladimir I.

Russian Academy of architecture and construction, Moscow, Russia,  
Doctor of technical sciences, professor,  
E-mail: [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru)

##### Nikiforov Sergey V.

Design Director  
Synergy, JSC, St. Petersburg, Bolshaya morskaya 24, Russia  
E-mail: [sergeivnikiforov@gmail.com](mailto:sergeivnikiforov@gmail.com)