

РАЗДЕЛ V. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.762; 691.002(032)

БЕТОН ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА «ГАЗПРОМ-ЦЕНТР»

БОНДАРОВИЧ А. И., РЯБЧИКОВ П. В., КАЛИНОВСКАЯ Н. Н.
Белорусский национальный технический университет

Введение.

К бетону монолитных массивных густоармированных конструкций, предъявляются особые требования:

1. Исключение образования рабочих швов с учетом послыоного бетонирования конструкции по высоте, что обеспечивается увеличенными сроками начала схватывания бетона.

2. Определенный диапазон вязкости бетонной смеси, обеспечивающий перекачивание смеси бетононасосом на значительные расстояния.

3. Отсутствие признаков седиментации бетонной смеси на всех технологических переделах.

4. Уменьшение температурных деформаций бетона, что обеспечивается минимальным содержанием клинкерной составляющей цемента.

5. Минимальные собственные усадочные деформации бетона для недопущения образования внутренних напряжений в бетоне и образования трещин.

Высокая прочность на растяжение для уменьшения трещинообразования.

После анализа проектной документации, а также учитывая требования заказчика по скорости бетонирования, было принято решение использовать самоуплотняющийся бетон. Технология СУБ подразумевает гравитационный способ уплотнения бетонной смеси, который требует определенной структуры бетона – с плавающим крупным заполнителем, пониженным содержанием мелкого запол-

нителя и значительным содержанием вяжущего. Данная структура бетона создает предпосылки для появления трещин в бетоне конструкции, обусловленных как собственными усадочными деформациями материала, так и температурным градиентом в теле конструкции.

Таким образом, бетонирование фундаментной плит комплекса «Газпром-центр» поставило перед технологами ряд специфических задач. То, как решались данные задачи, описано в настоящей статье.

Характеристика объекта строительства

Разработка технологии бетонирования плиты велась в соответствии с проектной документацией стадии «Строительный проект» на возведение фундаментной плиты Высотного здания Объекта разработки ООО «Инфорспроект» шифр LLC/S/BE/15/31-01-КЖ0 по объекту «Строительство многофункционального комплекса в г. Минске в границах ул. Филимонова – просп. Независимости – ул. Макаенка, 3 очередь строительства. Высотное административное здание».

Конструкция фундамента показана на рис. 1. Объем фундаментной плиты составлял $\sim 9100 \text{ м}^3$. Протяженность конструкции $\sim 82,5 \text{ м}$, высота – $3,5 \text{ м}$, ширина $\sim 37,5 \text{ м}$. Плита является ростерком для свайного фундамента, в котором обеспечивается жесткое сопряжение со сваями [1].

Проект предусматривал использование бетона со следующими характеристиками:

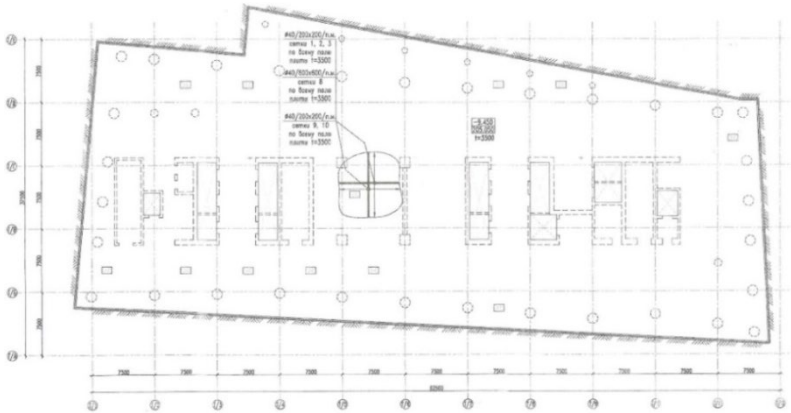
- класс бетона по прочности на сжатие – С35/45;
- марка бетона по водонепроницаемости – не ниже W12;
- марка бетона по морозостойкости – не ниже F150.

Помимо проектных характеристик при подборе состава бетона учитывались дополнительные требования для обеспечения термической трещиностойкости плиты.

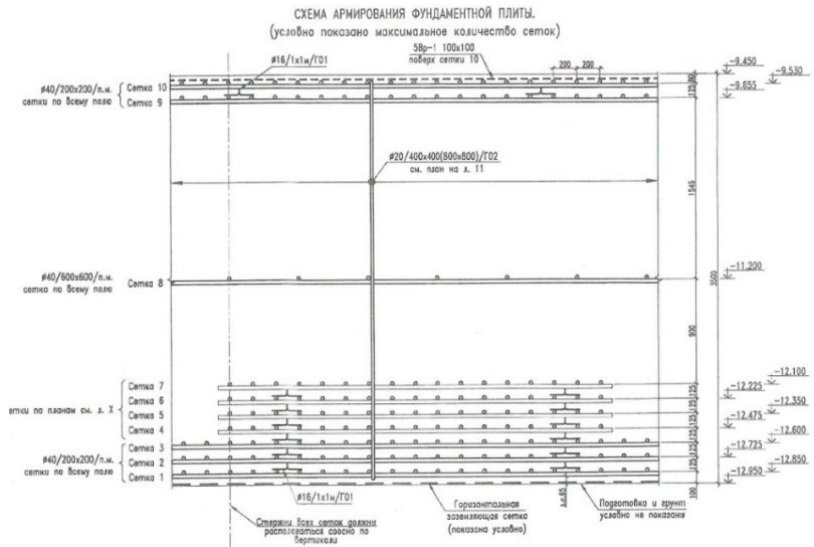
Проектом предусматривалось непрерывное бетонирование с интервалом перекрытия слоев бетона в пределах 12 часов.

Бетон производился на пяти бетоносмесительных узлах: ОАО «Минскжелезобетон», ЗСЖБК ф-л ОАО «Минскпромстрой», ООО «БелПолГрупп», ООО «Сплитплюс» и ООО «Тапас плюс». Подача бетона осуществлялась шестью бетононасосами.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ПЛИТА. АРМИРОВАНИЕ. ПЛАН СЕТОК 1, 2, 3, 8, 9, 10



а)



б)

Рисунок 1. План монолитной фундаментной плиты: а – план плиты; б – фрагмент сечения по высоте плиты [1]

Проект предусматривал использование бетона со следующими характеристиками:

- класс бетона по прочности на сжатие – С35/45;
- марка бетона по водонепроницаемости – не ниже W12;
- марка бетона по морозостойкости – не ниже F150.

Помимо проектных характеристик при подборе состава бетона учитывались дополнительные требования для обеспечения термической трещиностойкости плиты.

Проектом предусматривалось непрерывное бетонирование с интервалом перекрытия слоев бетона в пределах 12 часов.

Бетон производился на пяти бетоносмесительных узлах: ОАО «Минскжелезобетон», ЗСЖБК ф-л ОАО «Минскпромстрой», ООО «БелПолГрупп», ООО «Сплитплюс» и ООО «Тапас плюс». Подача бетона осуществлялась шестью бетононасосами.



Рисунок 2. Пример армирования фундаментной плиты



Рисунок 3. Фундаментная плита в процессе бетонирования

Материалы для бетона.

Цемент. Условия бетонирования за один прием (непрерывно, бесшовно) такого массивного сооружения, каким является фундаментная плита с объемом бетона $\sim 9100 \text{ м}^3$, определило задачи минимизации температуры саморазогрева бетона и снижения градиента температур по объему конструкции плиты.

В проектном решении конструкции фундаментной плиты не предусматривалось искусственных мер по снижению температуры саморазогрева бетона. Например, в виде устройства искусственной

системы «трубчатого» варианта охлаждения циркулирующей хладагентом с отводом теплоты, накапливающейся в процессе твердения бетона из-за тепловыделения гидратирующегося и твердеющего цемента [2].

В этой связи было предложено решить задачу по снижению температуры саморазогрева бетона за счет, во-первых, использования цемента с пониженной экзотермией в сочетании с минимально необходимым содержанием его в бетоне, а, во-вторых, за счет применения комплексной химической добавки – пластификатора, характеризующейся тормозящим гидратацию клинкерной части цемента эффектом и снижения за ее счет начального водосодержания бетона.

Приведенным условиям отвечало вяжущее, выпускаемое ОАО «Белорусский цементный завод», в виде шлакопортландцемента марки ЦЕМ II/В-III 42,5Н.

Этот вид цемента соответствует марке ЦЕМ II/В-III 42,5Н по ГОСТ 31108 [1], классу СЕМ II/В-S D (35...40) по СТБ ЕН 197-1 [3]. Он характеризуется содержанием клинкерной части 60...65 % массы (включая 3...4 % добавку гипса для регулирования сроков схватывания) и 40...35 %, соответственно, введенного в состав при помоле совместно с клинкером и гипсом доменного гранулированного шлака.

Из данных о минералогическом составе клинкера следует, что в пересчете на тонну шлакопортландцемента его клинкерная часть составляет 600...650 кг, а доля клинкерных минералов, характеризующихся наибольшей экзотермией, т. е. $C_3S \sim 58,92\%$ и $C_3A \sim 6,97\%$ от ее массы.

С учетом расхода вяжущего, примерно 400 ± 50 кг на 1 м^3 бетона, его клинкерная часть составит не более 230...290 кг/м^3 бетона, а общая доля $C_3S + C_3A \sim 150...190 \text{ кг/м}^3$ бетона, с содержанием наибольшего по тепловыделению $C_3A \sim 15...19 \text{ кг/м}^3$ (или 4,0...4,5 % от массы вяжущего).

Изложенное подтверждает соответствие выбора данного вида вяжущего цели и задачам по снижению температуры саморазогрева бетона в массиве и снижению сопровождающих это явление температурных деформаций конструкции плиты.

Крупный и мелкий заполнители.

Щебень. В качестве крупного заполнителя для бетона всех составов рекомендовался к использованию щебень гранитный произ-

водства РУП «Гранит» с прочностью, соответствующей марке по дробимости ≥ 1400 .

Для бетона нижнего слоя плиты использовался щебень гранитный фракции 5...10 мм 1-ой группы с содержанием зерен пластинчатой (лещадной) формы до 15 % массы по ГОСТ 8267-93 [4].

Для бетона среднего и верхнего слоя плиты рекомендуется использовался щебень гранитный фракции 5...20 мм 1-ой группы по ГОСТ 8267-93 [4].

Песок – природный (мытый) по ГОСТ 8736-2014 [5], применяемый в качестве мелкого заполнителя для бетона нижнего, среднего и финишного слоев плиты, с модулем крупности 2,0...2,5.

Минеральная добавка. Одной из задач при разработке составов являлось обеспечение «самоуплотнения» разрабатываемых составов бетона. То есть, получение на начальном этапе бетонной смеси, способной укладываться и формировать плотную, слитную структуру бетона без дополнительного механического побуждения. При этом обязательным условием снижения усадочных и температурных деформаций при твердении бетона являлся минимальный расход цемента и его начального водосодержания, что естественно ухудшает формуемость бетонной смеси.

С целью устранения этого противоречия и обеспечения требуемой формуемости бетонной смеси, принятой в настоящих расчетах соответствующей наибольшей из нормируемых по СТБ 1035-96 [6] марок РК-6 (расплыв конуса > 62 см), в состав бетона вводилась тонкодисперсная минеральная добавка – микрокремнезем.

Микрокремнезем – в соответствии с требованиями СТБ EN 13263-1-2012 [7] с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе; потери при прокаливании не более 4,0 %; удельная поверхность (по методу БЭТ) $\sim 15,0$ м²/г (при использовании приборов типа «ПСХ» $S_{уд}^{МК} \sim 3,0$ м²/г или 30 000 см²/г).

Химическая добавка. К использованию был предложен поликарбоксилатный суперпластификатор «Линамикс ПК», представляющий собой смесь двух типов поликарбоксилатов, в которую в качестве замедлителей потери подвижности (схватывания) дополнительно вводились натриевые соли лигносульфанатов и гидроксикарбоновых кислот.

Фибра композитная. С целью предотвращения трещинообразования на поверхности верхнего (финишного) слоя бетона плиты в его состав вводится фибра. С учетом нагнетательного (с помощью бетононасосов) метода подачи бетона в опалубку необходимо использовать ее эластичные виды. В частности, производимую в Российской Федерации и широко используемую в строительной отрасли Беларуси полипропиленовую фибру ТУ 2272-006-13429727-2007 [8] марки ВСМ-П-12.

Эффект сдерживания трещинообразования поверхностного слоя бетона за счет волокон фибры базируется на эффекте дисперсного «армирования» его структуры при хаотичном, равномерном и разнонаправленном расположении волокон фибры в объеме цементного камня и бетона в целом. При введении фибры на стадии приготовления бетонной смеси соблюдались определенные правила, обеспечивающие ее равномерное распределение в объеме смеси и затвердевшего бетона.

Вода затворения и вода для ухода за бетоном. Для затворения бетона и ухода за ним в период твердения использовалась водопроводная питьевая вода по СТБ 1114-98 [9].

Составы тяжелого самоуплотняющегося бетона.

В результате анализа имеющегося в НИИЛ бетонов и строительных материалов опыта аналогичных работ, а также выявления оптимального соотношения компонентов, были разработаны составы бетона, удовлетворяющие следующим условиям:

- формруемость смеси, соответствующей марке РК-6, т. е. расплыв конуса в стесненных условиях растекания не менее 62 см;
- сохранение пластичности смеси с течением времени и способности сохранить ее (не схватываясь до твердофазного состояния) в течение до 12 ч, обеспечивая тем самым условия для слияния ранее уложенного слоя смеси и новых ее порций без образования шва между ними в случае значительных перерывов в подаче бетона в опалубку (то есть, обеспечивая условие «бесшовного» бетонирования конструкции плиты);
- обеспечение прочности на сжатие затвердевшего бетона к возрасту в 56 суток, соответствующей классу С35/45.

Разработанные составы самоуплотняющегося бетона заявленного в проектной документации класса по прочности на сжатие С35/45, для непрерывного (бесшовного) бетонирования фундамент-

ной плиты (без дополнительного уплотнения механическим воздействием) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Составы самоуплотняющегося бетона

Участок высоты плиты, пример- ный объ- ем бетона	Расходы составляющих бетона в кг на м ³						
	Це- мент	Щебень	Пе- сок	Микро ро- кремне зем, МКУ- 85	Фиб- ра	Добав- ка	Вода
нижний (~ 2600 м ³)	450	890 (фр.5 – 10)	890	50	–	16,7	180
средний (~ 5400 м ³)	400	930 (фр. 5 – 20)	930	44	–	10,36	165 ... 170
верхний (~ 1100 м ³)	400	980 (фр.5 – 20)	880	44	0,6	12,58	165 ... 170

* Дозировка пластификатора (концентрация раствора С = 30 %) приведена в расчете от общей массы «цемент + микрокремнезем».

Формуемость бетонной смеси и ее изменение во времени.

Для оценки пригодности бетонной смеси номинальных составов бетона определялись следующие параметры:

1) удобоукладываемость оценивалась по показателю распыла конуса СТБ EN 12350-8-2012 [10], также определяли изменение удобоукладываемости во времени;

2) вязкость бетонной смеси оценивали по СТБ EN 12350-8-2012 [10]; при этом определяли время (с), требуемое для достижения распыла 500 мм (T₅₀₀);

3) подвижность самоуплотняющейся бетонной смеси при ее прохождении без расслоения и нарушения непрерывности потока через отверстия между арматурными стержнями и другие преграды оценивали по СТБ EN 12350-12-2014 [11] с использованием J-кольца с 12 стержнями (для состава среднего и верхнего слоя, фр. щебня 5...20) и с 16 стержнями (для состава нижнего слоя, фр. щебня 5...10);

4) подвижность самоуплотняющейся бетонной смеси при ее прохождении через узкие отверстия, в том числе между арматурными стержнями и другими преградами, без ее расслоения и без нарушения непрерывности потока определялась по методике СТБ EN 12350-12-2014 [11] с использованием L-ящика. Смесь нижнего слоя (щебень фракции 5...10 мм) испытывалась с использованием трех стержней, имитирующих плотно расположенную арматуру. Смесь среднего и верхнего слоев (щебень фракции 5...20 мм) испытывалась с использованием двух стержней, что соответствует реальной схеме армирования фундаментной плиты.

Результаты определения формуемости бетона приведены на рисунках 4...6 и в таблице 2.

Таблица 2

Свойства бетонной смеси

Номер состава бетона по табл. 1	$\rho_{см}^0$, кг/м ³	Воздуховлечение, %	Удобоукладываемость по растеканию конуса, см	Вязкость, с	Растворотделение, %	Сохранность свойств (текучести)
1	2440 ±20	2...3	> 62 (до 75)	5...7	~2,0	>360
2	2460 ±20	2...3	> 62 (до 72)	5...7	~3,0	>360
3	2460 ±20	3...4	> 62 (до 70)	7...10	~2,0	>360

Физико-технические характеристики бетона фундаментной плиты.

Прочность бетона на сжатие определена по ГОСТ 10180-2012 [12] и ГОСТ 18105-2010 [13] на образцах-кубах (с ребром 100 мм; в серии 4...6 образцов), твердевших в стандартизированных нормально-влажностных условиях ($t \sim 20 \pm 3$ °С; $\phi \geq 90$ %).

Прочность бетона на осевое растяжение при раскалывании определена по общепризнанной методике проф. Ахвердова И. Н. – Ицковича С. М. [14]

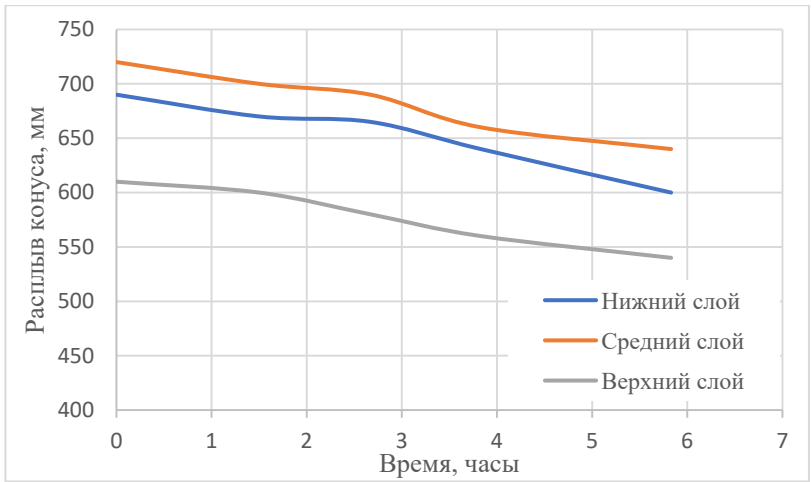


Рисунок 4. Изменение расплава конуса во времени

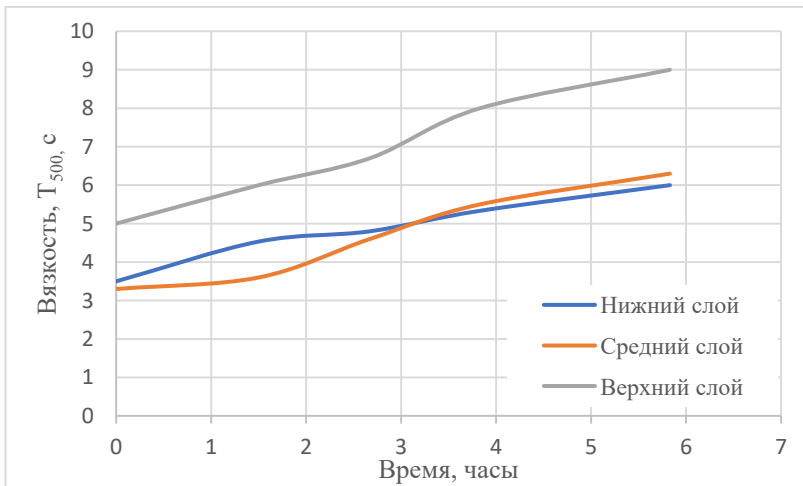


Рисунок 5. Изменение вязкости T_{500} во времени

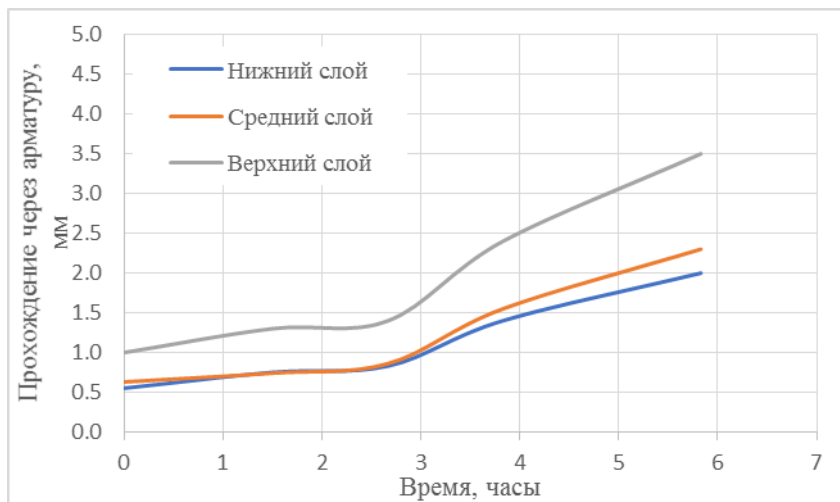


Рисунок 6. Способность прохождения через арматуру, определяемая с использованием J-кольца (12 стержней для составов нижнего слоя и 16 стержней среднего и верхнего слоя) во времени

Прочность бетона на растяжение при изгибе определена по ГОСТ 10180-2012 [12] на образцах-призмах размерами 100 x 100 x 400 мм, твердевших в нормально-влажностных условиях.

Определение *модуля упругости* провели согласно ГОСТ 24452-80 [16] путем постепенного (ступенями) нагружения образцов-призм осевой сжимающей нагрузкой с измерением в процессе нагружения образцов их деформаций.

Водонепроницаемость бетона определена в соответствии с ГОСТ 12730.5-2018 [17] на образцах-цилиндрах диаметром и высотой 150 мм (в серии 6 образцов), твердевших в стандартизованных нормально-влажностных условиях до испытаний в 28 и 56 суток.

Морозостойкость бетона определена по ГОСТ 10060.2-95 [18] третьим (ускоренным) методом при замораживании ($t = -(50...55) ^\circ\text{C}$) – оттаивании ($t = +20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ в 5 %-ом растворе хлористого натрия.

Результаты (частичные) всего комплекса испытаний по определению физико-технических свойств бетона (приведены в виде средних значений) сведены в таблицу 3.

Физико-технические характеристики бетона

Состав бетона для части плиты по высоте	Физико-технические характеристики бетона в возрасте 28/56 суток					
	Прочность, МПа			Модуль упругости бетона, ГПа	Водонепроницаемость бетона, марка*	Морозостойкость бетона, марка*
	на сжатие	на растяжение (раскалывание)	на растяжение при изгибе			
Нижней (№1)	<u>72,3</u> 75,1	<u>4,2</u> 4,5	<u>5,20</u> 5,30	<u>44,5</u> 45,5	<u>W12</u> ** W20	Не менее <u>F150</u> *** F 300
Средней (№2)	<u>70,5</u> 71,6	<u>4,0</u> 4,3	<u>5,15</u> 5,20	<u>39,5</u> 40,9	<u>W12</u> ** W20	Не менее <u>F150</u> *** F 300
верхней (№3)	<u>72,5</u> 73,0	<u>4,4</u> 4,8	<u>5,65</u> 5,65	<u>44,6</u> 45,8	<u>W12</u> ** W20	Не менее <u>F150</u> *** F 300

Примечание: над чертой данные, полученные в возрасте 28 суток.

* при значении по проекту W12 и F150;

** при достижении значений марки по водонепроницаемости W12 в возрасте 28 суток и W20 в возрасте 56 суток, испытания прекращали (фильтрация воды через образцы – отсутствовала);

*** при достижении значений марки по морозостойкости F150 в возрасте 28 суток и F300 в возрасте 56 суток, испытания прекращали (потеря прочности образцов после испытаний – отсутствовала).

Относительные линейные усадочные деформации определили по методике ГОСТ 24544-81 [15] при относительной влажности воздуха 60 %. Результаты приведены в графическом виде на рис. 7.

Полученные данные свидетельствуют, что разработанный состав бетона верхнего слоя с фиброй решает задачу минимизации усадочных деформаций, включая твердение в наименее благоприятных воздушно-сухих условиях.

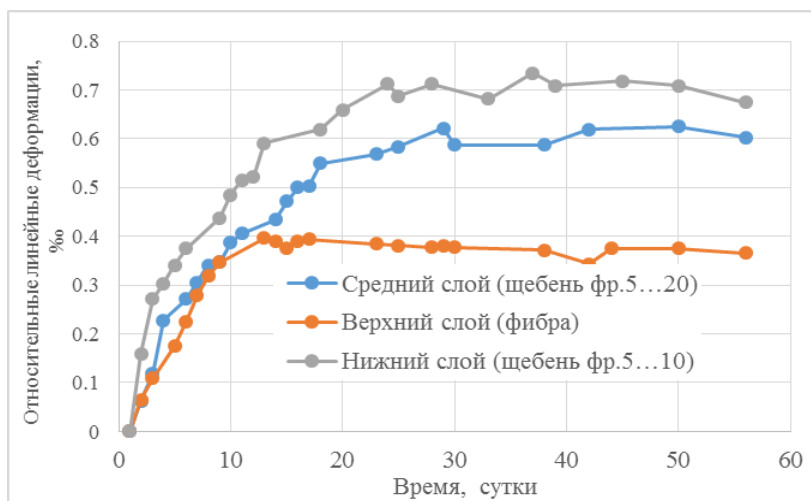


Рисунок 7. Относительные линейные деформации бетона фундаментной плиты

Одновременно выявлено, что замедление роста усадки бетона с фиброй (верхний слой) наблюдалась к 7-ми суткам твердения, а стабилизация усадки приходится, примерно, на 12–14 сутки твердения уже всех 3-х составов бетона.

На этом основании сделан вывод, что уход за бетоном в варианте водного бассейна наиболее целесообразен до возраста бетона в 14 суток; при невозможности такой продолжительности бассейнового варианта ухода он должен быть не менее 7 суток.

Заключение.

1. В процессе исследований выявлено влияние основных составляющих бетона, а также комплекса из химических и минеральной добавок на реологические свойства (растекаемость смеси), кинетику изменений ее формуемости во времени, а также на кинетику твердения (рост прочности) бетона и его свойства.

2. Определены эксплуатационные свойства бетона – марки по водонепроницаемости и морозостойкости, удовлетворяющие с запасом требованиям проектной документации.

3. В результате исследований разработаны составы самоуплотняющегося бетона класса С35/45 для зон нижней, средней и финишной части плиты, определены его прочностные, упругодеформационные свойства и усадочные деформации, что обеспечи-

ло необходимые условия для успешного проведения бетонных работ при устройстве фундаментной плиты на объекте Заказчика.

4. Качество бетона возведенной конструкции фундаментной плиты было подтверждено всей совокупностью данных (в данной статье не приведены) по контролю прочности на сжатие как разрушающими методами (контрольные образцы бетона и образцы-керны, отобранные из конструкции плиты), так и неразрушающими методами, подтвердивших соответствие прочности проектному классу С35/45. Также подтверждено соответствие проектных марок по водонепроницаемости (марка W12) и морозостойкости (марка F 150) бетона на контрольных образцах, изготовленных непосредственно на стройплощадке.

Список использованных источников:

1. Батяновский, Э. И. Самоуплотняющийся бетон и технология бетонирования 9000-го фундаментного массива / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович, Н. Н. Калиновская, П. В. Рябчиков.

2. ГОСТ 31108-2016 Цементы общестроительные. Технические условия.

3. СТБ ЕН 197-1-2015 Цемент. Часть 1. Состав, технические требования критерии соответствия общестроительных цементов.

4. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.

5. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия.

6. СТБ 1035-96 Смеси бетонные. Технические условия.

7. СТБ EN 13263-1-2012 Микрокремнезем для бетона. Часть 1. Определения, требования и критерии соответствия.

8. ТУ 2272-006-13429727-2007 Волокно строительное микроармирующее.

9. СТБ 1114-98 Вода для бетонов и растворов. Технические условия.

10. СТБ EN 12350-8-2014 Методы испытаний бетонной смеси. Часть 8. Самоуплотняющаяся бетонная смесь. Испытание на распыль.

11. СТБ EN 12350-10-2014 Методы испытаний бетонной смеси. Часть 10. Самоуплотняющаяся бетонная смесь. Испытание с применением L-образного ящика.

12. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

13. ГОСТ 18105-2018 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.

14. Ахвердов, И. Н. Исследование метода испытания бетона на растяжение посредством раскалывания образцов / И. Н. Ахвердов, С. М. Ицкович // Бетон и железобетон. – 1961. – №1. – С. 19 – 23.

15. ГОСТ 24544-81 Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести.

16. ГОСТ 24452-80 Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуансона.

17. ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.

18. ГОСТ 10060.2-95 Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости.