

УДК 693

БЕТОНИРОВАНИЕ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ ТУРБОАГРЕГАТА БЕЛОРУССКОЙ АЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Н.Н. КАЛИНОВСКАЯ, канд. техн. наук, зам. руководителя НТЦ ООО «Полипласт Северо-запад»,
Р.Ф. ОСОС, зав. лабораторией ОАО «Оргэнергострой», Е.В. КУЧУК, инженер-технолог ООО «ПолипластХИМ»

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, Белорусская АЭС, бетон с низкой экзотермией, компенсированная усадка, тепловыделение бетона

Keywords: self-compacting concrete, Belarusian nuclear power plant, concrete with low exotherm, compensated shrinkage, heat generation of concrete

В статье описан опыт возведения фундаментной плиты турбоагрегата Белорусской АЭС с применением самоуплотняющегося бетона. Приведен разработанный состав самоуплотняющегося бетона с компенсированной усадкой и низкой экзотермией. Показаны результаты по распределению температурных полей по сечению фундамента. На основании полученных результатов сделан вывод о целесообразности применения технологии самоуплотняющегося бетона для возведения особо ответственных массивных сооружений, к которым предъявляются повышенные требования по трещиностойкости.

К бетону массивных фундаментных плит предъявляются особые требования, обусловленные необходимостью получения плотного, однородного, лишенного трещин массива. Это особенно важно для фундаментных плит, испытывающих динамические воздействия, и фундаментов без гидроизоляции.

Бетонная смесь и бетон массивных монолитных конструкций должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Однородность бетонной смеси, отсутствие каких-либо признаков седиментации на всех технологических переделах;
2. Увеличенное время начала схватывания бетона, исключая образование рабочих швов при послойном бетонировании конструкции;
3. Низкая вязкость бетонной смеси для перекачивания смеси бетононасосом на расстояние до 100 м;
4. Минимальная экзотермия для уменьшения температурных деформаций и трещинообразования в бетоне;
5. Минимальная усадка — аутогенная и влажностная — для недопущения образования внутренних напряжений в бетоне и образования трещин;
6. Высокая прочность на растяжение для уменьшения трещинообразования;

7. При использовании расширяющих добавок — скорость набора прочности бетона, соответствующая выбранной расширяющей добавке;

8. Стойкость бетона к агрессивным воздействиям среды эксплуатации (замораживание/оттаивание, химическое воздействие и т.д.) для получения долговечного бетона со сроком эксплуатации не менее 50 лет.

В мировой строительной практике все более широкое применение получают бетоны гравитационного уплотнения или самоуплотняющиеся бетоны (СУБ), т.е. такие бетоны, для достижения однородности которых не требуется использование дополнительной вибрации. Применение данных бетонов определяется принятыми проектными решениями или особенностями производства. Так, применение СУБ позволяет бетонировать густоармированные конструкции сложной формы, для которых затруднено использование вибраторов, сократить сроки строительства, а также обеспечить однородную бездефектную структуру бетона за счет исключения человеческого фактора при укладке и уплотнении бетонной смеси.

Технология СУБ подразумевает гравитационный способ уплотнения бетонной смеси, который требует определенной структуры бетона — с плавающим крупным заполнителем.

Структура СУБ не является оптимальной с точки зрения получения бетона с минимальным трещинообразованием. Значительное количество цементного камня в бетоне, использование смешанного вяжущего (зола-унос, доломит, микрокремнезем, метаксаолин и другие местные материалы), компоненты которого могут ухудшать деформативные свойства бетона; высокая доля песка в смеси заполнителей и, следовательно, отсутствие каркаса из щебня приводят к тому, что усадочные деформации СУБ на 5-15% больше, чем у вибрационного бетона [1].

Большое содержание вяжущего в СУБ, и, как следствие, значительное тепловыделение в результате гидратации

цемента крайне усложняет задачу обеспечения термической трещиностойкости конструкции [2, 3].

Таким образом, использование СУБ при бетонировании массивных плит ставит перед технологом ряд специфических проблем. То, как решались данные проблемы при бетонировании фундаментной плиты турбоагрегата на Белорусской АЭС с использованием СУБ, описано в настоящей статье.

Характеристика объекта строительства

Разработка технологии бетонирования плиты велась в соответствии с РД ЭО 1.1.2.05.0696-2006 «Руководство по сооружению и сдаче в эксплуатацию фундаментов турбоагрегатов атомных станций» [4].

Конструкция фундамента показана на рис. 1. Объем фундаментной плиты составлял 1412 м³. Протяженность конструкции – около 73,6 м, высота – 4,4 м, ширина – 13,7 м.

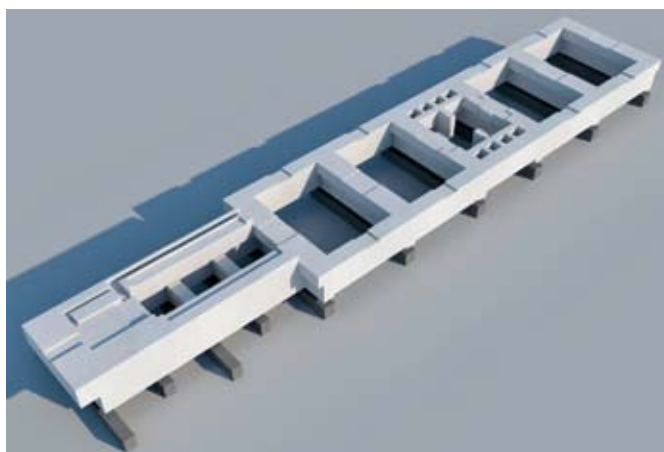


Рис. 1. Фундамент турбоагрегата

Проектом было предусмотрено использование бетона со следующими характеристиками:

- класс по прочности на сжатие – В25;
- марка по водонепроницаемости – не ниже W6;
- марка по морозостойкости – не ниже F75;
- модуль упругости – 30 ГПа.

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

- перепад температур между ядром и поверхностными слоями конструкции – не более 10°С;
- скорость подъема температуры в конструкции – не более 10°С/ч, для стыков – не более 20°С/ч,
- скорость остывания бетона – не более 5°С/ч,
- распалубка плиты допускается при разнице температур между ядром бетонированной конструкции и наружного воздуха не более 15°С.

Проектом предусматривалось непрерывное бетонирование с интервалом перекрытия слоев бетона в пределах 2-6 часов.

Генподрядчиком строительства являлось ОАО «Гомельпромстрой». Бетон производился на бетоносмесительных узлах РУП «Белэнергострой» и ОАО «Гомельпромстрой»,

располагающими современным бетоносмесительным оборудованием «БетонМаш» и Elcon (с возможностью контроля влажности инертных материалов, датчиком мощности на валу бетоносмесителя). Бетон укладывался бетононасосом Daewoo с вылетом стрелы 50 м.

Характеристика и опыт применения технологии СУБ при производстве бетонных работ

На территории Республики Беларусь применение СУБ не носит уникальный характер: данная технология успешно применялась при бетонировании массивных конструкций Гродненской и Полоцкой ГЭС и ряда других ответственных сооружений. Также разработан национальный стандарт на самоуплотняющийся бетон – ТКП 45-5.03-266-2012 [5]. Однако необходимо отметить, что при возведении фундамента турбоагрегата главной целью было обеспечение всех физико-механических характеристик совместно с недопущением образования трещин от температурных и усадочных напряжений, а не получение высокой прочности.

В Республике Беларусь с 01.03.2015 г. введен в действие ряд европейских стандартов, регламентирующих методы испытаний самоуплотняющихся бетонных смесей. В табл. 1 приведена их краткая характеристика, требования EN 206-9-2010 [12], устанавливающие значения полученных в соответствии с методами испытаний характеристик, и требования СТО 1.1.1.03.003.0911-2012 к разрабатываемому высокопрочному бетону для Белорусской АЭС. Следует отметить, что в СТО 1.1.1.03.003.0911-2012 предусмотрено нормирование характеристик для самоуплотняющихся бетонов, согласующееся с требованиями евростандартов.

Основываясь на накопленном в республике опыте применения СУБ, а также получения сложных композиционных безусадочных бетонов, содержащих расширяющие сульфоалюминатные модификаторы, был разработан состав СУБ.

При его разработке учитывались взаимоисключающие требования: значительное количество теста из вяжущего (не менее 400 л/м³) для обеспечения растекаемости бетонной смеси и минимальное количество цемента для уменьшения тепловыделения из-за его гидратации.

Для конструкции фундамента использовался клинкерный цемент ПЦ 500-Д0 производства ОАО «Красносельскстройматериалы» с теплотой гидратации около 330 Дж/г. Расход цемента по РД ЭО 1.1.2.05.0696-2006 ограничен 350 кг/м³, что недостаточно для получения СУБ. Поэтому для увеличения объема цементного теста применялось смешанное вяжущее, состоящее из клинкерного цемента ПЦ 500-Д0, расширяющей сульфоалюминатной добавки РСАМ (производитель ЗАО «Парад») и суспензии микрокремнезема «Полипласт МК 40» (ОАО «ПолипластХИМ»).

Самоуплотнение было достигнуто за счет подбора оптимального соотношения компонентов и применения поликарбоксилатного пластификатора «Реламикс ПК» производства ОАО «ПолипластХИМ».



Рисунок 2. Самоуплотняющаяся бетонная смесь

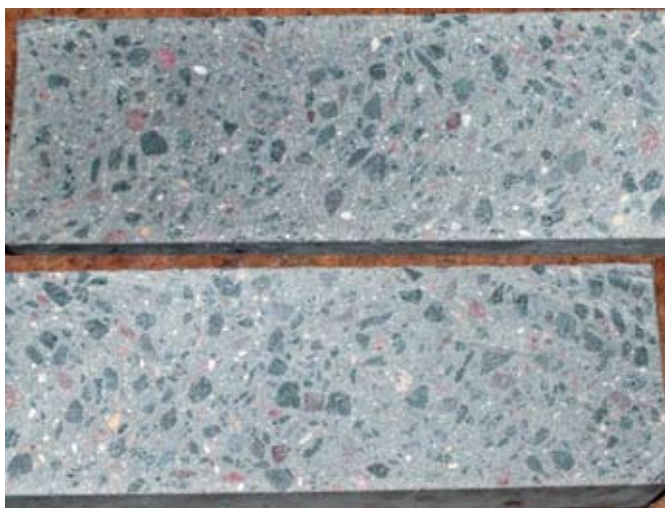


Рисунок 3. Оценка расслаиваемости бетонной смеси при падении

Проблема обеспечения термической трещиностойкости конструкции решена за счет использования комплексного вяжущего. С целью снижения температурного градиента между центром и поверхностными слоями конструкции был предусмотрен ряд дополнительных мероприятий технологического характера. В частности, для недопущения сверхнормативных перепадов температуры была произведена изоляция боковых поверхностей конструкции пенополистирольными пли-

тами толщиной 10 см с сопротивлением теплопередаче $2,9 \text{ м}^2 \cdot \text{С} / \text{Вт}$.

Снижение величины усадочных деформаций обеспечивалось за счет: снижения расхода клинкерного цемента; применения сульфоалюминатной расширяющей добавки; влагоизоляции всей поверхности бетона (опалубка на боковых поверхностях, пленка на верхней поверхности) в течение 14 сут.

В соответствии с этим был предложен следующий состав СУБ: расход цемента – $350 \text{ кг} / \text{м}^3$, расширяющаяся добавка – 8% от массы цемента ($28 \text{ кг} / \text{м}^3$), микрокремнезем – 11% от массы цемента по сухому веществу ($38,5 \text{ кг} / \text{м}^3$), содержание заполнителей – $1816 \text{ кг} / \text{м}^3$: 50% – мелкий заполнитель крупностью до 5 мм, 50% – гранитный щебень фр. 5-20. В/Вяж=0,47. Добавка «Реламикс ПК» – 0,4% от массы вяжущего по сухому веществу.

С целью оценки возможности сегрегации бетонной смеси непосредственно в конструкции была осуществлена лабораторная формовка разработанного состава СУБ с укладкой бетонной смеси в вертикальную форму сечением $150 \times 150 \text{ мм}$ и высотой 850 мм. При этом бетонная смесь укладывалась в один прием и падала с высоты 850 мм. После набора требуемой прочности данный образец был распилен, и выполнен визуальный анализ содержания крупного заполнителя во всех зонах образца. Как видно на рис. 3, бетон не имеет признаков сегрегации.

Производство бетонных работ осуществлялось в соответствии с ППР, разработанными Институтом «Оргэнергострой», в которых указаны требования к исходным материалам, состав бетона, процессы приготовления, транспортирования, укладки бетонной смеси, ухода за бетоном, правила отбора проб.

Перед началом бетонных работ были проведены опытные замесы бетона разработанного состава в промышленных условиях, по результатам которых обеспечены все требуемые физико-механические характеристики бетона.

Согласно графику производства работ бетонирование велось в течение 34 часов, т.е. в среднем скорость укладки составила около $40 \text{ м}^3 / \text{ч}$.

Характеристики самоуплотняющейся бетонной смеси определялись в соответствии с СТО 1.1.1.03.003.0911-2012

Таблица 1

Характеристика бетонной смеси	Стандарт на метод испытания	Требования СТО 1.1.1.03.003.0911-2012	Фактические значения
Класс по удобоукладываемости SF	EN 12350-8	SF 1 PK=550-650 мм	PK=580-650 мм
Сохранение удобоукладываемости в пределах класса по удобоукладываемости	EN 12350-8	В пределах SF1 в течение не менее 2 часов	$T \geq 2$ часа
Класс по вязкости T500	EN 12350-8	VS2 $T_{500} \geq 2$ с	$T_{500} = 3-5$ с
Класс по способности прохождения J-кольцо	EN 12350-12	PJ $1 \leq 10$ мм с 12 стержнями	$\Delta \leq 10$ мм
Класс по сопротивлению расслаиваемости на сите	EN 12350-11	SR $2 \leq 15\%$	2-4%

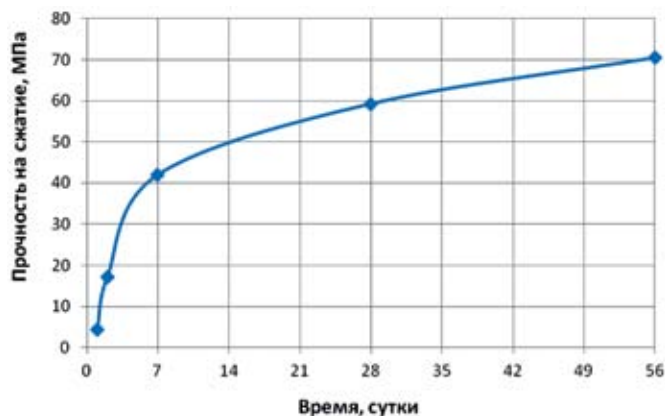


Рис. 4. Прочность бетона на сжатие, определенная на образцах-кубах по ГОСТ 10180-2012

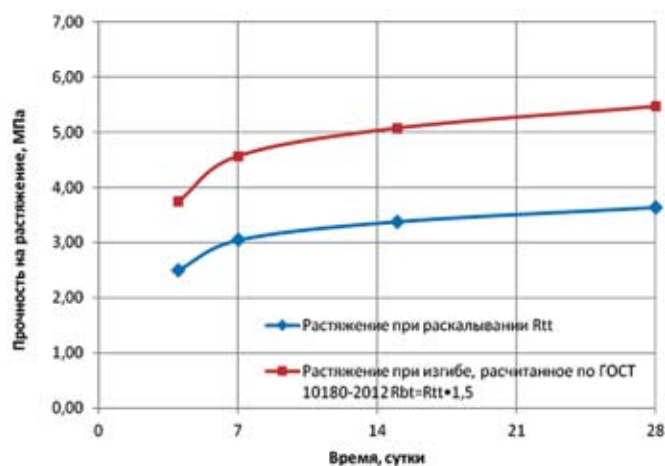


Рис. 5. Прочность бетона на растяжение при раскалывании, определенная на образцах-кубах по ГОСТ 10180-2012, и прочность при растяжении при изгибе, рассчитанная по табл. Л1 ГОСТ 10180-2012

[6], методы испытаний в котором согласуются с требованиями EN 206-9-2010 [7]. Требования к бетонной смеси и фактические значения приведены в табл. 1.

При бетонировании фундамента с определенной частотой производился отбор проб бетона для контроля необходимых физико-механических характеристик бетона – плотности, прочности на сжатие, растяжении при раскалывании, модулю упругости, морозостойкости, водонепроницаемости. Согласно испытаниям, выполненным РУП «Институт БелНИИС», бетон удовлетворял всем требованиям проекта, что подтверждено протоколами аккредитованной лаборатории.

Результаты изменения прочности на сжатие и на растяжение при раскалывании во времени приведены на рис. 4 и 5. Испытание проводилось по ГОСТ 10180-2012.

Значение модуля упругости по двум сериям образцов, определенное по ГОСТ 24452-80 [8] в возрасте 28 сут., составило 32 ГПа.

С целью лабораторного моделирования возможных относительных деформаций в зависимости от условий выдерживания были изготовлены образцы-призмы размерами 100x100x400 мм, которые в течение первых 7 сут. твердения выдерживались в нормально-влажностных условиях, а затем в течение 49 сут. – при относительной

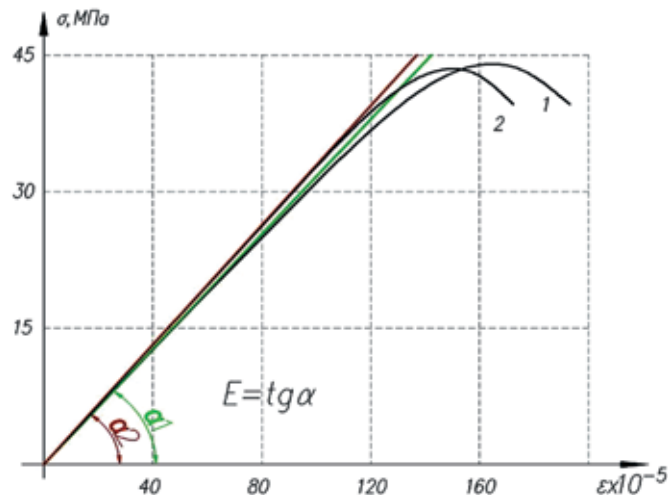


Рис. 6. Модуль упругости самоуплотняющегося бетона

влажности 60%. Относительные деформации бетона, определенные по ГОСТ 24452-80, приведены на рис. 7. При выбранной схеме выдерживания в течение 56 сут. отрицательные деформации бетона не были зафиксированы. Результаты определения деформаций бетона подтвердили известный факт [9]: применение сульфалюминатных модификаторов должно сопровождаться качественным влажностным уходом за бетоном в течение как минимум 5-7 сут. Выбор сульфалюминатной добавки соответствовал невысокой скорости набора прочности бетона – 4,3 МПа на 1-е сутки. Применение расширяющих модификаторов на основе СаО, проявляющих большую часть расширяющего потенциала в течение первых 12 часов твердения, могло бы привести к нарушению связи «арматура – бетон».

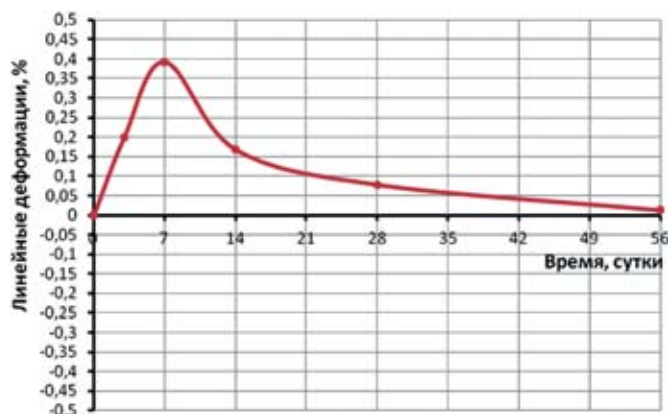


Рис. 7. Линейные деформации СУБ

По результатам эксперимента было решено обеспечить изоляцию поверхность конструкции фундамента в течение 14 сут.

Принятые технологические решения – применение расширяющей добавки и длительный влажностный уход за бетоном – были с успехом отработаны на реальной конструкции и обеспечили полное отсутствие усадочных трещин на поверхности бетона. Данный результат является значимым ввиду большой протяженности конструкции – 73,6 м, а также с учетом ее сложной формы, т.е. большого количества точек концентрации напряжений.

Контроль распределения температур в конструкции

Сложнейшей задачей при бетонировании фундаментной плиты являлось обеспечение термической трещиностойкости конструкции. Предварительная оценка тепловыделения бетона фундамента производилась в соответствии с [3].

Контроль за температурой бетона начался в момент изготовления бетонной смеси и был прекращен через 11 сут., когда разность температур между поверхностными слоями бетона и среднесуточной температурой опустилась ниже 5°C.

Температура бетонной смеси составляла 10-13°C, среднесуточная температура окружающего воздуха в первые 7 сут. бетонирования колебалась от -7 до +6°C.

Точки измерения температуры показаны на рис. 8.



Рис. 8. Схема расположения скважин

Учитывая большое количество экспериментальных данных, в настоящей статье показано распределение температур в наиболее массивной части конструкции.

Контроль распределения температурных полей в теле фундамента выполнялся с использованием температурных скважин и велся по следующей схеме: 1) через час после укладки бетонной смеси в конструкцию; 2) в течение 1-х сут. бетонирования — через каждые 2 часа; 3) в течение следующих 3-х сут. — через каждые 4 часа; 4) в течение последующих 7 сут. — через каждые 8 часов.

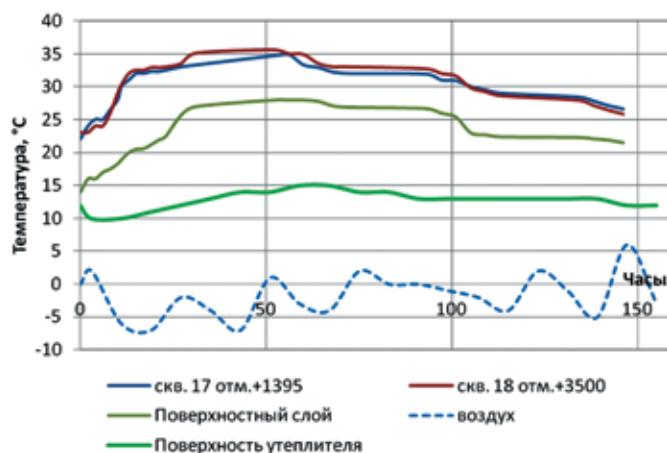


Рис. 9. Распределение температур в фундаменте. Скважины расположены в одной вертикальной плоскости по высоте конструкции

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что основные факторы, обеспечивающие термическую трещиностойкость конструкций, оказались в пределах значений, предусмотренных технологией

производства бетонных работ, т.е. разность температур в теле блока не превышала 10°C, при этом максимальная температура ядра бетона была не выше 40°C, а средняя температура остывания конструкции — не более 5°C в час. Таким образом, предпринятые меры обеспечили отсутствие температурных трещин.

Выводы:

1. Результаты определения технологических характеристик бетонной смеси и физико-механических свойств бетона фундаментной плиты показали, что принятая технология самоуплотняющегося бетона позволяет полностью выполнить требования проекта.

2. Помимо обеспечения всех физико-механических характеристик было выполнено основополагающее требование — отсутствие трещин различной природы в теле бетона и на поверхности конструкции.

Контроль температуры бетона показал, что принятые технологические решения — ограничение содержания цемента и использование наполнителей, теплоизоляция поверхности конструкции, низкая температура бетонной смеси — обеспечили термическую трещиностойкость плиты.

Исключение усадочных трещин было достигнуто за счет использования расширяющегося сульфоалюминатного модификатора и влагоизоляции поверхности бетона в течение 14 сут.

3. Технология самоуплотняющегося бетона может рекомендоваться для бетонирования особо ответственных массивных сооружений, к которым предъявляются повышенные требования по трещиностойкости.

Библиографический список

1. Физико-механические свойства тяжелого самоуплотняющегося бетона: дисс. ... канд. техн. наук: специальность 05.23.05 Строительные материалы и изделия / Котов Дмитрий Святославович; научный руководитель Блещик Н.П.; Научно-исследовательское Республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС».
2. Selbstverdichtender Beton für massige Bauteile. BTF International. — 2016. — Vol. 82, ss. 44-54.
3. DAfStb-Richtlinie «Massige Bauteile aus Beton», 2010.
4. РД ЭО 1.1.2.05.0696-2006 Руководство по сооружению и сдаче в эксплуатацию фундаментов турбоагрегатов атомных станций.
5. ТКП 45-5.03-266-2012 (02250) Бетонные и железобетонные изделия и конструкции из самоуплотняющегося бетона. Правила изготовления.
6. СТО 1.1.1.03.003.0911-2012 Бетоны для строительных конструкций и радиационной защиты атомных электростанций.
7. EN 206-9-2010 Concrete — Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC).
8. ГОСТ 24452-80 Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.
9. Collepardi M., Borsoi A., Collepardi S., Olagot J.J.O., Troli R. Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions // Cement and Concrete Composites. Vol. 27, Issue 6. — 2005, pp. 704-708.