

Стратегические предложения по разработке новых типовых проектов опор и фундаментов ВЛ и ПС

Архипов И.Л., Звягинцев А.В., ПАО «ФСК ЕЭС»,
Качановская Л.И., к.т.н., Романов П.И., к.т.н.,
НИЛКЭС ООО «ПО «Энергожелезобетонинвест»

Аннотация

Статья посвящена вопросам необходимости комплексной разработки современных базовых серий железобетонных опор и фундаментов для ВЛ 220–750 кВ. Актуальность внедрения новейших разработок в реальное строительство определяется тем, что 70% затрат при строительстве составляет стоимость конструкций. Долговечность современных железобетонных конструкций сопоставима со сроками службы металлических опор, а их стоимость вдвое ниже. Доступность новых типовых проектов широкому кругу специалистов обеспечит возможность выпуска проектов ВЛ необходимой надежности при минимальной стоимости проектирования, строительства и эксплуатации.

Ключевые слова:

опоры, фундаменты, секционированные железобетонные центрифугированные стойки, наномодифицированный бетон, типовые проекты

Почти 15 лет после выхода в свет седьмой редакции Правил устройства электроустановок (ПУЭ) и перевода типовых проектов опор и фундаментов в разряд «материалов для проектирования» не утихают споры о рациональных способах разработки проектов ВЛ. Использование старых типовых решений конструкций или их индивидуальная разработка? Что может обеспечить создание современных проектов ВЛ, гарантирующих надежность объектов при минимальной стоимости затрат на их проектирование, строительство и эксплуатацию?

На наш взгляд, однозначного ответа на этот вопрос до сих пор не удалось найти по той причине, что, говоря о «типовых решениях», мы представляем себе привычные всем тома с чертежами опор и фундаментов, выпущенные в прошлом веке, согласованные во всех инстанциях, опробованные на практике, но отмененные в связи с выходом новой версии ПУЭ, в которой заложены повышенные требования к надежности линий электропередачи.

Индивидуальные проекты новых конструкций, обеспечивая оптимальные решения в конкретных условиях, предъявляют высокие требования к квалификации разработчиков, и, как

правило, нуждаются в проведении испытаний и выпуске нормативной документации, из-за чего времени и средств, отведенных на разработку проекта ВЛ, часто не хватает.

Решение проблемы в современных условиях может быть найдено путем комплексной разработки базовых серий конструкций на основании результатов новейших научных и технологических достижений. Требования к выпуску документации должны содержать:

- проведение оптимизационных расчетов конструкций с использованием всех возможностей вычислительной техники;
- разработку конструктивных решений с учетом новых материалов, современных заводских технологий;
- проведение необходимых испытаний;
- подготовку необходимых нормативных документов для оперативного внедрения их в строительство новых ВЛ.

Реальная оптимизация проектных решений может быть достигнута в том случае, если проектировщики ВЛ будут снабжены необходимым комплексом вспомогательных программ для расчета несущей способности опор и фундаментов для условий, встречающихся на трассе ВЛ. Отсутствие программ ведет к увеличению трудозатрат на проектирование и не позволяет выбрать оптимальное с точки зрения надежности и стоимости решение. Зачастую принимаются самые тяжелые и дорогостоящие варианты опор и фундаментов.

Доступность новых типовых проектов широкому кругу специалистов позволит оперативно выполнять серию необходимых расчетов для установки конструкций в конкретных условиях, обеспечит возможность выпуска проектов ВЛ необходимой надежности при минимальной стоимости строительства и эксплуатации.

Кроме того, наличие проверенного базового варианта конструктивных решений позволит оперативно модифицировать опоры для условий, отличающихся от принятых при разработке основной серии, получая оптимальные (практически индивидуальные) конструкции для конкретных ВЛ.

Актуальность вопроса внедрения новейших разработок в реальное строительство становится очевидной, если учесть, что 70% затрат на строительство ВЛ составляет стоимость опор и фундаментов.

Вопросы необходимости пересмотра старых типовых проектов были поставлены после выхода в свет седьмой редакции ПУЭ в 2003 году:

- в рамках НИОКР ПАО «ФСК ЕЭС» в 2007–2009 годах разработана базовая серия стальных многогранных опор для ВЛ напряжением 220–500 кВ;
- новые решетчатые опоры для ВЛ 220–500 кВ уже находятся в разработке;
- назрела необходимость выпуска современных железобетонных опор и фундаментов для ВЛ 220–500 кВ.

Простые в монтаже железобетонные опоры, опыт эксплуатации которых насчитывает уже более 60 лет, в 2 раза дешевле металлических опор, рассчитанных на восприятие тех же нагрузок. Стоимость строительства ВЛ с их применением в среднем на 30% ниже, чем при использовании металлических конструкций. Эти преимущества железобетонных опор стали основанием их широкого использования на ВЛ всех классов напряжений, включая 750 кВ. Более 60% эксплуатируемых опор в нашей стране — железобетонные. Сложности с транспортировкой длинномерных центрифугированных стоек в настоящее время преодолены при разработке новой версии всем известных опор.

Современные железобетонные опоры, как и прежде, выполняются на базе центрифугированных стоек, изготавливаемых в конических или цилиндрических опалубках длиной

26 или 20 метров соответственно. Для сокращения расходов на перевозку стойки при изготовлении делятся на секции, которые соединяются между собой на строительной площадке при помощи болтов. Конструкция соединительного узла, помещаемого в опалубку перед центрифугированием, позволила обеспечить выпуск полностью готового изделия и отказаться от варианта приварки внешних фланцев после изготовления стоек. Короткие секции обладают повышенной жесткостью, что снижает их повреждаемость при транспортировке. Новые конструкции обладают повышенной долговечностью за счет использования современной арматуры, бетона повышенного класса прочности В60 и водонепроницаемости не ниже W12.

Новейшие научные разработки по созданию специальных составов наномодифицированных бетонов позволили добиться резкого увеличения их функциональных характеристик (прочности, водонепроницаемости, морозостойкости, огнестойкости), обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства конструкций в течение всего срока эксплуатации объектов. Использование этих технологий в заводских условиях позволяет решить задачу увеличения надежности ВЛ при существенном сокращении затрат на строительство.

К настоящему времени подготовлена материальная база для разработки типовых проектов железобетонных опор для ВЛ 220–500 кВ, сборных фундаментов, свай, стоек для опор ВЛ и оборудования ПС всех напряжений с использованием последних конструктивных разработок и научных открытий в области создания бетонов повышенной долговечности. Пройдены важные этапы внедрения современных конструкций в практическое строительство:

Кратко перечислим уже сделанное совместными усилиями ПАО «Россети», ПАО «ФСК ЕЭС» и разработчиков конструкций.

1. Подготовлена нормативная база для внедрения современных опор.

Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» рекомендует использование железобетонных опор из секционированных стоек для ВЛ 110–750 кВ.

«Нормы технологического проектирования ВЛ напряжением 35–750 кВ» (СТО 56947007-29.240.55.016-2008, введенные в действие 20.11.2014) предписывают применение на ВЛ 35–500 кВ железобетонных опор из секционированных стоек [1].

В настоящее время любая центрифугированная стойка, запроектированная по ГОСТ 22687-85 и типовым сериям 3.407.1-151 и 3.407.1-152, может быть выполнена в секционированном варианте. Секционированные стойки аттестованы в ПАО «Россети».

Введен в действие Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.29.120.90.247-2017 «Железобетонные опоры ВЛ 35-750 кВ на базе центрифугированных секционированных стоек. Технические требования» [2].

Разработана технологическая карта по монтажу типовой опоры 500 кВ, изготовленной в секционированном варианте. Разработана серия технологических карт по монтажу вновь разработанных современных опор ВЛ 110 кВ и Инструкция по их эксплуатации.

2. Накоплен опыт использования железобетонных опор из секционированных стоек при техническом перевооружении существующих ВЛ.

Для замены старых опор и создания аварийного резерва ПАО «Россети» рекомендуют использовать модификации унифицированных железобетонных опор, изготовленные с применением секционированных конических стоек типа СК22 и СК26.

Согласно сложившейся практике, при выборочной замене конструкций опор и формировании аварийного запаса должны использоваться те же марки опор, которые были установлены

Табл. 1. Замена железобетонных опор на аналогичные опоры из секционированных стоек

Заменяемая опора			Опора, предлагаемая для замены	
Марка опоры	Стойка по проекту	Количество стоек	Марка опоры	Стойка
ПБ110-5	СК2,СК2п, СК2пр	1	ПБ110-5(с)	СК22.1-2.1-СБ.К.Д.
ПБ220-1	СК5,СК4а, СК5п,СК5пр	1	ПБ220-1(с)	СК26.1-6.1-СБ.К.Д.
ПБ330-1	СК5,СК4а СК5п,СК5пр	2	ПБ330-1(с)	СК26.1-2.0-СБ.К.Д.
ПБ500-5н	СК15	2	ПБ500-5н(с)	СК26.1-1.1-СБ.К.Д.

при строительстве ВЛ. Наличие в эксплуатации более 2000 типов опор, в которых использованы порядка 34 типоразмеров железобетонных стоек, и отсутствие во многих случаях исходной документации на опоры потребовало дифференцированного подхода к их замене в зависимости от конкретной ситуации.

В целом, все существующие варианты подбора опор-аналогов для их замены на новые опоры из секционированных стоек сводятся к следующим:

- замена опор последней унификации на аналогичные опоры;
- замена опор старой унификации на опоры более поздней разработки с учетом области их применения;
- разработка недостающих чертежей опор на основании расчета нагрузок для конкретных ВЛ.

Во всех случаях при заказе к марке заменяемой опоры добавляется буква (С).

В настоящее время любая железобетонная опора может быть заменена на опору из секционированных стоек. Металлические конструкции тоже могут найти свои аналоги среди железобетонных опор. Например, опора 2П220-1-11,5 может быть заменена на железобетонную ПБ220-1. Примеры замены железобетонных опор на секционированные аналоги на объектах ПАО «ФСК ЕЭС» приведены в таблицах 1 и 2.

Табл. 2. Замена железобетонных опор старой унификации на типовые опоры более поздней разработки

Заменяемая опора			Опора, предлагаемая для замены	
Марка опоры	Стойка по проекту	Количество стоек	Марка опоры	Стойка
П220	СН220, СН200п, СН200пр	1	ПБ220-1(с)	СК26.1-6.1-СБ.К.Д.
ПС220-1	СЦ (∅560, L = 22 м)	2	ПБ330-1(с)	СК26.1-2.0-СБ.К.Д.
ПВС330А-1	Б30п	2		
ПБ500	СЦ4,СЦ4-1, СЦ4п, СЦ4пр	2	ПБ500-5н(с)	СК26.1-1.1-СБ.К.Д.
ПВС500	СК4а	2		
ПВС500-2	СЦ5	2		

В помощь службам эксплуатации разработан «Альбом железобетонных опор ВЛ 35–500 кВ. Модификации унифицированных опор на базе секционированных стоек», который снабжен пояснительной запиской, трактующей общие подходы к замене опор в эксплуатации без изменения места положения опоры и ее функциональных характеристик. Альбом содержит как монтажные схемы модифицированных опор, так и схемы опор-прототипов, схемы сборки стоек из отдельных секций, способ обеспечения заземления секционированных стоек, правила маркировки, транспортировки и хранения конструкций.

Эта информация используется заказчиком для организации замены старых опор, строителями для монтажа новых конструкций и службами эксплуатации в процессе обслуживания ВЛ.

Опыт замены опоры ПБ500-5Н ВЛ 500 кВ Тамбов — Пенза-2 на участке Верхне-Донского предприятия МЭС Центра на аналогичную опору из секционированных стоек показал, что процесс объединения секций на строительной площадке не вызвал никаких технических проблем [3].

При этом всеми специалистами было отмечено существенное облегчение процесса доставки секционированных стоек на пикет по сравнению с проблемами перевозки длинномерных стоек. По результатам работ по техническому перевооружению на этой ВЛ были разработаны технологические карты для замены свободностоящих опор portalного типа с внутренними связями.

3. Разработаны новые конструкции железобетонных опор из центрифугированных секционированных стоек для конкретных ВЛ напряжением 110, 220, 330, 500 кВ.

Оптимальные конструкции новых опор ВЛ, рассчитанных с учетом требований ПУЭ-7 и всех действующих нормативных документов, разрабатываются по заказу для конкретных ВЛ в короткие сроки в процессе проектирования линий электропередачи. Новые решения предлагаются уже на стадии разработки основных технических решений (ОТР) проекта ВЛ для сравнения стоимости строительства ВЛ при использовании металлических и железобетонных опор.



Рис. 1. Замена опоры ПБ500-5н на ПБ500-5н(с) на ВЛ 500 кВ Тамбов — Пенза 2

Табл. 3. Расчетные данные опоры 2СПБ500-3В
(ПУЭ-7. Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ)

Расчетные климатические условия		Район по ветру IV (WO = 800 Па)			Район по ветру III (WO = 650 Па)			Район по ветру II (WO = 500 Па)	
		Район по гололеду							
		IV (25 мм)	III (20 мм)	V (30 мм)	IV (25 мм)	III (20 мм)	II (15 мм)	III (20 мм)	II (15 мм)
		Ветер при гололеде 200 Па			Ветер при гололеде 160 Па				
Провод	Марка	3 x AC 300/66							
	σГ	153 МПа							
	σ–	153 МПа							
	σЭ	102 МПа							
Трос	Марка	ОКГ Тц — ... 14,6/88							
	σтах	382 МПа							
Габаритный пролет, м	290	325	265	295	330	375	330	375	
Ветровой пролет, м	320	325	320	360	395	395	415	495	
Весовой пролет, м	362	406	331	369	412	469	412	469	

В качестве примера приведем порталную опору 2СПБ500-3В (рисунок 2), спроектированную для условий ВЛ 500 кВ Ростовская — Андреевская — Тамань [4].

Опора рассчитана для работы в условиях высоких ветровых и гололедных нагрузок (до 4 районов по ветру и гололеду). При этом, минимальный габарит между проводом и землей увеличен до 10 м. Каждая коническая стойка опоры состоит из двух секций длиной по 13 м. За счет использования бетона повышенной прочности (класса В60) удалось уменьшить массу арматуры и сократить общую стоимость стоек. Несомненным успехом новой опоры является конструкция закладных деталей, при помощи которых организовано соединение секций между собой и стоек с фундаментами. Соединительные элементы располага-

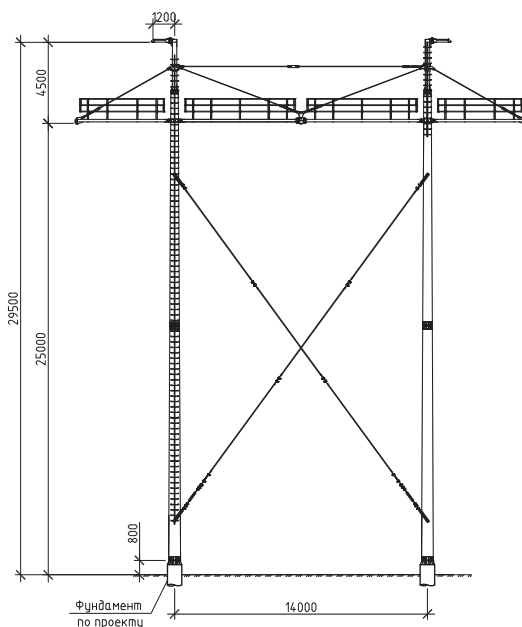


Рис. 2. Схема промежуточной свободностоящей порталной опоры 2СПБ500-3В

ются внутри опалубки, крепятся к арматурному каркасу до процесса центрифугирования, за счет чего достигается их перпендикулярное положение относительно продольной оси стойки, что обеспечивает прямолинейность собираемых элементов опоры. Увеличенный габарит обеспечен за счет установки опоры на фундаменты, изготовленные из цилиндрических секций диаметром 800 мм.

Опоры успешно прошли испытания на полигоне ОРГРЭС (рисунки 3 и 5). Расчеты стоимости строительства ВЛ500 кВ с ее использованием показали, что за счет невысокой стоимости самих конструкций общие затраты на каждый километр трассы на 30% ниже, чем при использовании металлических опор.

4. Разработана серия железобетонных опор из центрифугированных секционированных стоек для ВЛ 110 кВ по заказу ПАО «Россети».

Серия опор включает в себя унифицированные конструкции промежуточных и анкерно-угловых одноцепных и двухцепных опор. Конструкции разработаны в обычном и повышенном вариантах. Обычные опоры устанавливаются в пробуренный котлован, а повышенные — на фундаментную секцию диаметром 800 мм. Возможны варианты использования фундаментов, индивидуально разработанных для сложных грунтовых условий, в которых закрепление опор при помощи цилиндрических фундаментов не целесообразно.

Все опоры рассчитаны в двух вариантах для подвески тяжелых и легких марок проводов: АС185/29, АС240/32 и АС95/16, АС120/19, АС150/24 и грозозащитного троса типа МЗ-В-ОЖ-Н-Р для II и III районов по ветру и гололеду.

Всего разработано 8 типов промежуточных и 15 типов анкерно-угловых опор. На рисунке 4 приведен обзорный лист промежуточных опор.

Фундаментные секции спроектированы на базе центрифугированных цилиндрических стоек диаметром 800 мм, имеющих фланцы для соединения со стойками опор.

Нормативная документация для новых опор включает в себя:

- технические требования к опорам и способам их закрепления;
- технологические карты на монтаж всех типов опор и фундаментов;
- инструкции по монтажу опор и фундаментов;
- инструкцию по эксплуатации железобетонных опор из секционированных стоек.

В процессе разработки подготовлены проекты трех патентных заявок на защиту разработанных конструктивных решений.



Рис. 3. Общий вид опоры, подготовленной к испытаниям

Напряжение ВЛ (кВ)	110			
Цельность	Общестроительная			
Тип опоры	Промежуточные		Промежуточные пологие	
Район по ветру (К, Па)	2-3 (500-650)	2-3 (500-650)	2-3 (500-650)	2-3 (500-650)
Район по эквиваленту (В, мкс)	2-3 (15-20)	2-3 (15-20)	2-3 (15-20)	2-3 (15-20)
Марки проводов	АС 95/16 АС 120/19	АС 150/24 АС 185/29 АС 240/32	АС 95/16 АС 120/19	АС 150/24 АС 185/29 АС 240/32
Марка армирующего прута	9.2-ПЗ-В-ОК-Н-Р			
Эскиз опоры				
Марка опоры	СТВ110-1	СТВ110-3	СТВ110-5Ф	СТВ110-7Ф
Монтажная схема	16.006-1Экз.2.003	16.006-1Экз.2.004	16.006-1Экз.2.005	16.006-1Экз.2.006
Масса железобетона, т	6,91	7,01	7,28	7,35
Масса металлоармирующей конструкции, кг	531	516	665	703
Марка сварноарматурных стержней	Стержень ОК1260.65-1	Стержень ОК1260.65-3	Стержень ОК1260.65-5	Стержень ОК1260.65-7

Рис. 4. Обзорный лист одноцепных промежуточных опор 110 кВ



Рис. 5. Монтаж двухцепной промежуточной опоры на испытательном полигоне в г. Хотьково

Все типы конструкций прошли испытания на полигоне «ИЦ ОРГРЭС».

Технико-экономические расчеты показали, что затраты на НИОКР окупятся в короткие сроки.

Использование новых конструкций по этой серии планируется с 2018 года.

Востребованность железобетонных опор нового поколения очевидна и для ВЛ напряжением 220–500 кВ.

Целесообразность использования современных железобетонных опор при строительстве ВЛ напряжением 110–500 кВ подтверждается перечнем их основных характеристик:

- соответствие требованиям ПУЭ-7 и всей действующей нормативной документации;
- возможность эффективно заменять собой стальные решетчатые и многогранные опоры более чем в 60% случаев;
- минимальный землеотвод;

- увеличенный срок службы до 100 лет;
- простота доставки до строительной площадки без использования специальной техники и получения разрешения на транспортировку длинномерных конструкций;
- высокая скорость монтажа при минимальном количестве земляных работ (стойка опоры или фундаментная секция устанавливается в пробуренный котлован);
- десятикратное увеличение скорости строительства в сравнении с решетчатыми опорами;
- низкая стоимость изготовления (вдвое дешевле металлических опор) и сокращение стоимости строительства ВЛ при их использовании на 25–40%;
- высокая коррозионная стойкость, что особенно важно для сокращения проблем эксплуатации подземной части опор;
- возможность увеличения высоты опор за счет использования фундаментных секций;
- вандалоустойчивость.

5. Проведены предварительные расчеты новых фундаментов, свай и стоек для опор ВЛ и оборудования ПС с использованием наномодифицированного бетона повышенной долговечности и современной арматуры.

Специальные добавки в бетон позволяют улучшить его основные показатели, в числе которых несущая способность бетона (в том числе на растяжение), водонепроницаемость, морозостойкость, огнестойкость.

Научные исследования по созданию специальных составов бетона, проведенные специалистами кафедры «Инженерной химии и естествознания» Петербургского государственного университета путей сообщения и сотрудниками НИЛКЭС, позволили увеличить долговечность бетона без увеличения стоимости конструкций. По данным физико-химических исследований установлено, что в продуктах гидратации наномодифицированного бетона обнаружено повышенное количество гидросиликатов кальция, обладающих волокнистой или игольчатой структурой, которые оказывают микроармирующее действие на структуру затвердевшего бетона [5]. Сравнение результатов испытаний одноцепных и двухцепных анкерных опор ВЛ 110 кВ на полигоне «ИЦ ОРГРЭС» показало, что при одинаковом армировании и расчетных нагрузках количество трещин в стойках опор, изготовленных с использованием наномодифицированного бетона, резко сократилось.

Уже сейчас целесообразно заказывать на крупных железобетонных заводах страны унифицированные конструкции, выполненные по старым типовым проектам, из наномодифицированного бетона. Добавки изготавливаются в промышленных масштабах. Их цена невелика, а использование предлагаемой технологии позволяет добиться необходимой прочности бетона при сокращении объемов цемента. Срок службы новейших конструкций будет составлять не менее 100 лет. При этом их стоимость не увеличится.

Опыт использования конструкций, изготовленных с применением современных добавок в бетон, накоплен в смежных областях строительства: при изготовлении дорожных покрытий, плит для взлетно-посадочных полос аэродромов, к которым предъявляются очень высокие требования по прочности, морозостойкости, трещиностойкости, истираемости [6, 7].

Расчеты показали, что при разработке серии новых типовых проектов унифицированных фундаментов, свай, стоек, выпускаемых с использованием технологии вибрирования, расход стали может быть сокращен на 15–25% за счет использования новых свойств бетона и современной арматуры.

Выводы:

Накопленный опыт разработки конструкций и результаты научных исследований по получению бетонов нового поколения сделали возможным решение новых стратегических задач, в числе которых разработка серии типовых проектов:

- унифицированных железобетонных опор из секционированных центрифугированных стоек для ВЛ 220–500 кВ;
- унифицированных железобетонных фундаментов, свай, стоек для опор ВЛ и оборудования ПС с использованием современной арматуры и наномодифицированного бетона повышенной долговечности.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО 56947007-29.240.55.192-2014 Нормы технологического проектирования ВЛ напряжением 35–750 кВ. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2014.
2. СТО 56947007-29.29.120.90.247-2017 Железобетонные опоры ВЛ 35–750 кВ на базе центрифугированных секционированных стоек. Технические требования. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС», 2017.
3. Качановская Л.И., Романов П.И. Секционированные центрифугированные железобетонные стойки для ремонта и технического перевооружения ВЛ 35–500 кВ // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2016, № 6(39). С. 24–27.
4. Качановская Л.И., Романов П.И., Касаткин С.П. Железобетонная опора из секционированных центрифугированных стоек для ВЛ 500 кВ // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2015, № 6(33). С. 66–69.
5. Соловьева В.Я., Масленникова Л.Л., Абу-Хасан М., Степанова И.В., Ершиков Н.В., Бойкова Т.И., Макаров В.В., Касаткин С.П. Физико-химические основы процессов твердения инновационного бетона для дорожных покрытий // Естественные и технические науки, 2017, № 2(104). С. 150–155.
6. Соловьева В.Я. Масленникова Л.Л., Ершиков Н.В., Бойкова Т.И., Касаткина А.В., Соловьев Д.В., Кабанов А.А., Касаткин С.П. Механизм защитного действия ремонтных составов на цементной основе в дорожных покрытиях // Транспортное строительство, 2016, № 10. С. 13–15.
7. Boykova T.I., Solovyova V.Y., Solovyov D.V. Effective repair and refurbishment compound for the strengthening of a road concrete pavements. Procedia engineering, Elsevier Ltd, may 2017.