



Разрабатываем полимерные консоли



Анатолий ЛУКЬЯНОВ
Anatoly M. LUKYANOV

Юрий ЧЕПЕЛЕВ
Yuri G. CHEPELEV



Александр БАРДИН
Alexander N. BARDIN

Лукьянов Анатолий Михайлович — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Чепелев Юрий Георгиевич — заведующий отделом ВНИИЖТ, Москва, Россия.
Бардин Александр Николаевич — заведующий отделом ВНИИЖТ, Москва, Россия.

Development of Polymer Consoles
(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 67)

Статья знакомит с разработкой новых полимерных консолей для высокоскоростного транспорта.

Приведены результаты исследования электрофизических характеристик стеклопластиковых стержней. Показана возможность более широкого использования стеклопластика на основе эпоксидного связующего.

Полимерные консоли испытаны на механическую и электрическую нагрузки, как и новейшие конструкции оконцевателей. Проверка проводилась в том числе и под напряжением грозового импульса.

Ключевые слова: высокоскоростной транспорт, консоли, контактная сеть, полимеры, стеклопластик, электрическая прочность, механические свойства, надежность.

Полимерные материалы, рекомендуемые для использования в устройствах и узлах контактной сети, должны обладать комплексом свойств, иметь большую механическую и электрическую прочность и длительно (не менее 20 лет) сохранять эти качества в условиях воздействия различных атмосферных факторов (влаги, изменения температуры, солнечных лучей, различных загрязнений в воздухе).

Особый интерес для деталей и устройств контактной сети представляют стеклопластики — полимерные материалы, в которых в качестве армирующего материала используется стеклопластиковый наполнитель.

Опыт применения полимерных материалов в устройствах контактной сети России и за рубежом изложен в [1, 2]. При этом показательны результаты испытания новейших несущих элементов контактной сети, изготовленных на основе композитных материалов. В первую очередь это относится к консолям контактной сети.

В зависимости от числа перекрываемых путей, как известно [3], консоли

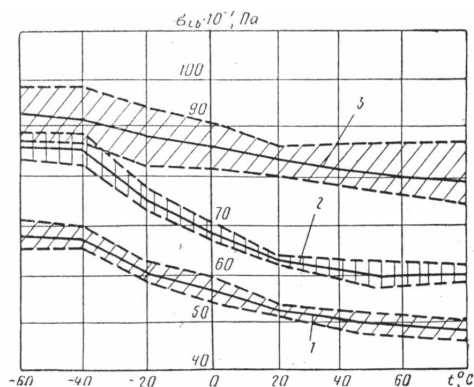


Рис. 1. Зависимость прочности при растяжении стеклопластиковых стержней от температуры: 1 – на полиэфирном связующем; 2 – на эпоксидно-полиэфирном связующем; 3 – на эпоксидном связующем.

делятся на однопутные, двухпутные, многопутные. Применение полимерных консолей позволяет отказаться от фиксаторных кронштейнов, облегчить опорные и поддерживающие конструкции контактной сети, значительно повысить стабильность несущего троса, что является необходимой предпосылкой надежности сетей при высоких скоростях движения поездов. Использование таких консолей значительно повышает безопасность производства работ под напряжением.

1.

На первом этапе разработок, которыми нам поручили заниматься, необходимо было определить, на каком связующем должны быть изготовлены полимерные конструкции.

Исследованиям подверглись образцы на полиэфирном, эпоксидно-полиэфирном (содержание смол ЭД и ПН 1:2) и эпоксидном связующих. Арматура стеклопластиковых стержней представляет собой стекложгут – алюмоборосиликатного состава стекла с замасливателем № 289. Содержание стекла в композите по массе составляет 70%.

Методики механических испытаний изложены в [4]. Испытания на растяжение стеклопластика проводили в диапазоне изменения температуры от -60°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Как при повышенных, так и пониженных температурах вместе с обычными образцами в камеру искусственного климата поме-

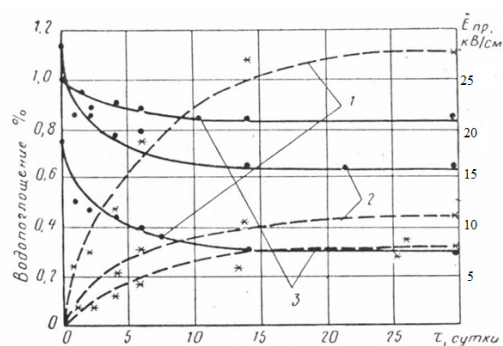


Рис. 2. Зависимость электрической прочности $E_{пр}$ (-), водопоглощения (--) стеклопластиковых стержней от времени пребывания в воде. Обозначения те же, что на рис. 1.

щали контрольный образец с вмонтированной в него термопарой. Повышение прочности материала (рис. 1) сопровождалось увеличением разброса результатов испытаний.

Наибольшая прочность наблюдалась у стеклопластиковых стержней на эпоксидном связующем. В области положительных температур она уменьшалась.

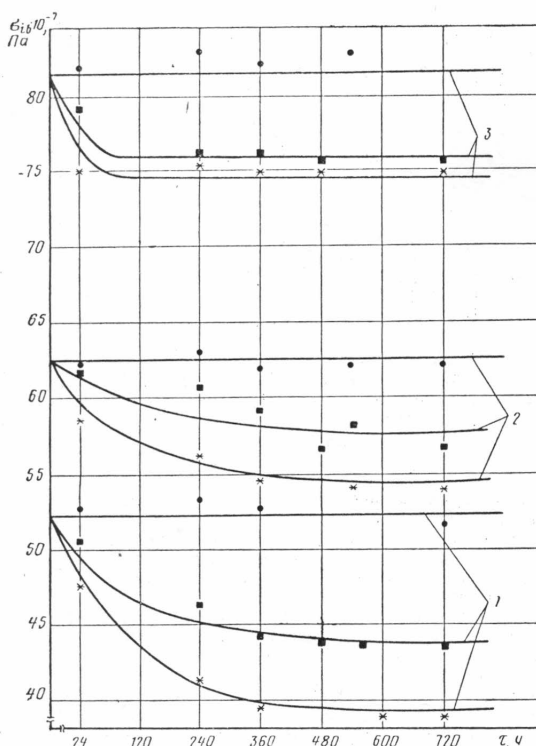
Анализ полученных зависимостей свидетельствует о необходимости учитывать снижение прочности материала при расчете стержней, работающих в условиях повышенных температур.

Водопоглощение стержней определяли согласно действующих в России методик. Стеклопластиковые стержни на основе эпоксидного связующего характеризуются значительно меньшим водопоглощением по сравнению со стержнями на основе эпоксидно-полиэфирной и полиэфирной смолы (рис. 2). В первом приближении определено время достижения образцами равновесного состояния, то есть момент насыщения влагой материала. Оно составляет не менее чем 30 суток.

Снижение механической прочности стеклопластиков (рис. 3) установлено от времени действия влаги. Так, выдержка образцов при температуре 80°C после пребывания в воде 720 ч позволила зафиксировать снижение прочностных данных у стеклопластиков на полиэфирном связующем – на 25,31%, на эпоксидно-полиэфирном – на 14,4%, на эпоксидном – на 9,7%.



Рис. 3. Зависимость механической прочности σ стеклопластиковых стержней от времени τ при относительной влажности 98% и температуре 20°C (●), в воде при температуре 20°C (■), в воде при температуре 80°C (★).



Электрическую прочность стержней (рис. 2) исследовали напряжением промышленной частоты. Напряжение прикладывали вдоль волокон к образцам толщиной 10 мм. Стержни на основе эпоксидного связующего характеризуются более высокой электрической прочностью по сравнению с другими. В первые семь суток увлажнения электрическая прочность образцов резко снижается, что обусловлено интенсивным поглощением влаги. После 15 суток пребывания в воде она стабилизируется.

Исследования электрической прочности в зависимости от температуры проводили в диапазоне 20–80°C (рис. 4). Они показали, что с повышением температуры прочность снижается, причем наиболее сильно у стеклопластиковых стержней на эпоксидно-полиэфирном связующем,

меньше — у стержней на эпоксидном связующем.

Анализ зависимости удельного объемного сопротивления стеклопластиковых стержней от продолжительности выдержки в воде показал (рис. 5), что величина ρ_v в первые сутки их пребывания в водной среде резко падает. Наименьшее снижение ρ_v наблюдается у стержней с эпоксидным связующим.

На основании данных исследования установлено, что для изготовления конструкций полимерных консолей следует использовать стеклопластиковые трубы на эпоксидном связующем.

Прочностные характеристики стеклопластиков труб, рекомендуемых для изготовления консолей при растяжении, сжатии, изгибе, даны в таблице 1.

Трубчатые профили изготавливали по технологии пултрузии.

Таблица 1

Прочностные характеристики стеклопластиковых труб, рекомендуемых для полимерных консолей контактной сети

Тип материала	Предел прочности, МПа			Модуль упругости, ГПа	
	растяжения	сжатия	изгиба	растяжения	сжатия
СПП – Э	850	431	890	52–53	30–38
СПП – Эв	920	660	1000	52–57	33–38
СПП – Эп	780	435	830	52–55	34–38

Кратко ознакомим читателя с процессом пултузии:

- непрерывный стекложгут протягивается через фильеру, при этом он пропитывается связующим с одновременным нагревом, способствующим отвердеванию связующего;

- полимерное изделие подвергается дополнительной обработке поверхности и нарезается на куски определенной длины;

- при необходимости армирование полимерного изделия можно осуществлять в направлении, отличное от 0° ;

- процесс производства — непрерывный.

Для заполнения внутренней полости композитных труб использовался пенополиуретановый наполнитель (ППУ) с закрытой структурой ячеек. Такое решение позволяет предотвратить накопление конденсата в ходе эксплуатации.

Процесс залива внутренней полости трубы производился с помощью смешительно-дозировочной установки, которая предназначена для литья двухкомпонентных полиуретановых систем.

Подготовка внешней поверхности трубы к нанесению защитного покрытия осуществляли, используя не содержащую хромата эпоксидную грунтовку с активной антикоррозийной защитой.

Покрытие состояло из двухкомпонентной универсальной полиуретано-акриловой эмали. Такая эмаль обладает высокими защитными свойствами — длительным временем со-

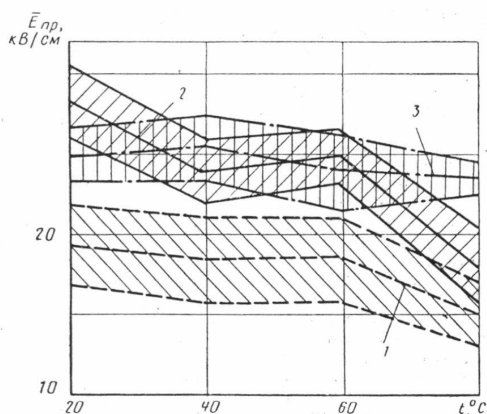


Рис. 4. Зависимость электрической прочности $E_{пр}$ стеклопластиковых стержней от температуры. 1 — на полиэфирном связующем; 2 — на эпоксидно-полиэфирном связующем; 3 — на эпоксидном связующем.

хранения открытой плёнки, стойкостью к УФ-излучению и атмосферным воздействиям, высокой водостойкостью, а также повышенной трекинго-эрозионной стойкостью.

2.

Одним из основных вопросов механического расчета полимерных консолей является определение их геометрических размеров.

Консоли из стеклопластиковых труб рассчитывали на растягивающую нагрузку 70 кН и изгибающий момент в плоскости ушка оконцевателя 4 кН·м (разрушающая сила при изгибе 8 кН).

В результате проведенных работ был подобран трубчатый элемент с внешним диаметром 60 мм, внутренним — 44 мм.

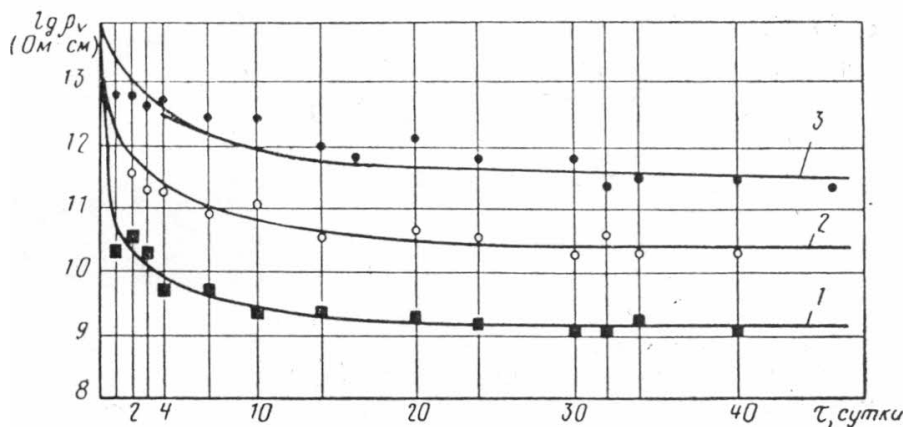


Рис. 5. Зависимость удельного объемного сопротивления ρ_v стеклопластиковых стержней от продолжительности τ выдержки в воде. 1 — на полиэфирном связующем; 2 — на эпоксидно-полиэфирном связующем; 3 — на эпоксидном связующем.



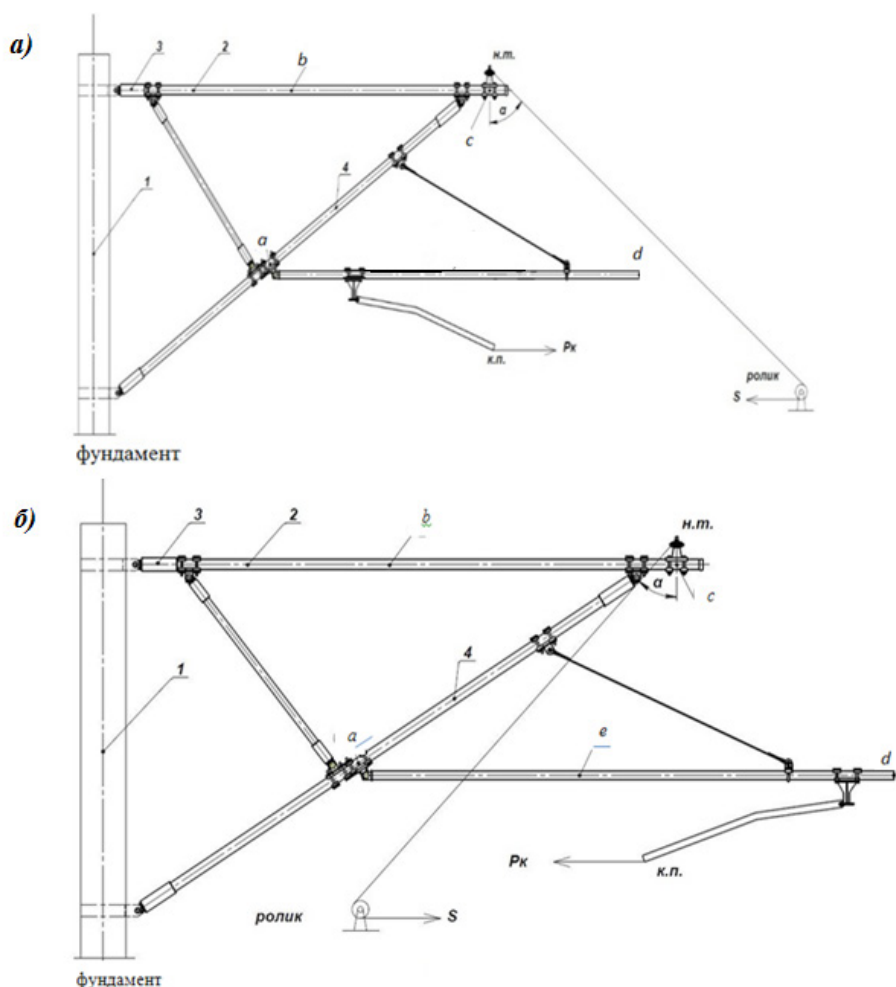


Рис. 6. Разработанные полимерные консоли: а – прямого нагружения; б – обратного нагружения; 1 – опорная стойка; 2 – горизонтальный элемент консоли; 3 – фитинги консолей; 4 – подкос консоли; а, b, c, d, e – точки измерения прогиба элементов консолей.

После подбора диаметров стеклопластиковой трубы приступили к выбору материала, из которого должен быть изготовлен оконцеватель.

Остановились на том, что первая партия оконцевателей будет изготовлена из алюминия. Соединение стеклопластиковой трубы и оконцевателя – механическое (на болтах).

Вторая партия оконцевателей была изготовлена из полиамида. Соединение трубы с оконцевателем клеевое.

Исследование прочности предложенных оконцевателей производили на образцах консоли длиной 1200 мм.

Разрушение соединения стеклопластиковой трубы с полиамидным оконцевателем происходило, как правило, по металлу оконцевателя – разрыв «ушка» или самого

«тела» оконцевателя. Среднее значение разрушающей силы соединения «стеклопластиковая труба – оконцеватель из полиамида 66» – 2050 кг.

Характерный вид разрушения образцов с алюминиевыми оконцевателями – смятие стеклопластиковой трубы в месте ее соединения с болтами оконцевателя (пластическая деформация болтов). Такой вид разрушения наблюдали у всех образцов такого соединения. Среднее значение разрушающей силы «стеклопластиковая труба – алюминиевый оконцеватель» – 5150 кг. На основании проведенных исследований принято решение доработать узел соединения оконцевателя из полиамида в части увеличения прочности оконцевателя.

Изгиб. Испытания по определению разрушающей нагрузки и разрушающего

Таблица 2

Значения прогибов при прямом нагружении [мм]

S, кгс	Pk, кгс	Наименование нагрузок	Точка a	Точка b	Точка c	Точка d
			Суммарный прогиб	Суммарный прогиб	Суммарный прогиб	Суммарный прогиб
300	250	Допускаемая	20	19	21	224
500	500	Испытательная	37	32	33	310
Прогиб при испытательной нагрузке			37	32	33	310
Длина стержня			3626	3378	3378	3441
Фактический относительный прогиб			1/98,0	1/105,6	1/102,4	1/11,1

Таблица 3

Значения прогибов при обратном нагружении [мм]

S, кгс	Pk, кгс	Наименование нагрузок	Точка a	Точка b	Точка c	Точка d	Точка e
			Суммарный прогиб	Суммарный прогиб	Суммарный прогиб	Суммарный прогиб	Суммарный прогиб
260	250	Допускаемая	16	13	16	73	2
560	460	Испытательная	20	15	18	246	41
Прогиб при испытательной нагрузке			20	15	18	246	41
Длина стержня			3626	3378	3378	3061	3061
Фактический относительный прогиб			1/181,3	1/225,2	1/187,7	1/12,4	1/74,7

изгибающего момента трубчатых элементов консоли с алюминиевыми оконцевателями проводили на образцах длиной 1300 мм. В среднюю часть образца прикладывалась вертикальная сила. Испытания проводили до разрушения образцов. Среднее значение разрушающей нагрузки составило 2800 кг, разрушающего изгибающего момента – 8,91 кНм.

Испытания по определению величины прогиба в контрольных точках консоли прошли на собранных образцах (рис. 6). Материал стержней консоли – односторонне армированный стеклопластик, покрытый разработанным защитным слоем. Материал оконцевателей стержней – алюминий.

Нагрузки, прикладываемые к конструкции консоли, измерялись динамометром по ГОСТ 13837. На каждой ступени нагружения производились замеры прогибов (см. таблицы 2, 3) в точках *a, b, c, d, e* с помощью прогибомера.

Испытания консоли в сборе при прямом нагружении показали:

– прогибы стержней консоли в стандартном исполнении не соответствуют «Техническим требованиям к полимерным консолям» в части предельно допустимо-

го относительного прогиба – 1/100 длины стержня;

– в случае, когда крепление подкоса сдвинуто к оконцевателю, прогибы всех стержней консоли (кроме фиксатора) близки к предельному значению, установленному в технических требованиях – 1/100 длины стержня;

– видимые повреждения элементов консоли при испытательной нагрузке отсутствуют, нет проскальзывания крепежной арматуры;

– стеклопластиковый стержень фиксатора не соответствует норме предельно допустимого относительного прогиба.

При обратном нагружении:

– прогибы всех стержней консоли (кроме фиксатора) соответствуют «Техническим требованиям к полимерным консолям» в части предельно допустимого относительного прогиба;

– видимых повреждений элементов консоли при испытательной нагрузке не возникает, нет проскальзывания крепежной арматуры;

– стеклопластиковый стержень фиксатора не соответствует техническим требованиям, кроме того он теряет устойчивость при испытательной нагрузке.





Высоковольтные испытания. Испытания электрической прочности разработанных полимерных консолей как с прямым, так и обратным фиксатором проводились по ГОСТ 1516.2. Целью их являлась проверка электрической прочности изоляции консоли, стержня и подкоса, в частности:

- испытания электрической прочности в сухом состоянии и под дождем;
- испытания электрической прочности изоляции при воздействии стандартного грозового импульса.

При проведении испытаний в сухом состоянии стержень и подкос были закреплены горизонтально. На один конец стержня или подкоса подавали напряжение 145 кВ. Второй конец был заземлен. Приложенное напряжение выдерживали в течение двух минут. За это время не произошло перекрытие изоляции как самого стержня, так и подкоса.

Испытания под дождем — использовалась специальная дождевальная установка. На один конец стержня подали напряжение 125 кВ. Второй конец был заземлен. Дождь падал равномерно под углом 45° к горизонтали. Параметры дождя определялись в соответствии с ГОСТ, проводимость воды составляла 110 мкСм/см. Время выдержки образцов составляло 5 минут. Перекрытие изоляции не произошло.

Во втором случае стержень был закреплен вертикально. На один его конец подали напряжение 70 кВ. Второй конец был заземлен. Параметры дождя были такие же, как и в предыдущем опыте. Приложенное напряжение выдерживали не менее 5 минут. За это время не произошло перекрытия изоляции.

Испытания напряжением грозового импульса. На один конец стержня и подкоса подавали импульс с формой волны 1,2/50 мкс и амплитудой 240 кВ. Второй конец был заземлен. Приложенное напряжение выдерживали 5 минут. За это время не произошло перекрытия изоляции.

Определение величины напряжения пробоя изоляции в сухом состоянии. Стержень и подкос были закреплены вертикально. Один из концов испытуемых элементов был зазем-

лен. На другой конец подавали плавно растущее переменное напряжение промышленной частоты. По достижении величины 236 кВ (максимальной для испытательной установки) напряжение выдерживали в течение двух минут. За это время не произошло пробоя или перекрытия изоляции.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны новые полимерные консоли для высокоскоростного транспорта.
2. Для обеспечения достаточной устойчивости стержней консоли в части предельно допустимого относительного прогиба необходимо увеличить диаметр основных стержней, используя стеклопластиковые стержни D70/d55 и D80/d65, а также доработать узел соединения оконцевателя со стеклопластиковым стержнем консоли и конструкцию самого оконцевателя из полиамида в целях увеличения его прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов В. Д., Горошков Ю. И., Лукьянов А. М. и др. Полимерные материалы в устройствах контактной сети. — М.: Транспорт, 1984. — 224 с.
2. Горошков Ю. И., Ильин В. Н., Лукьянов А. М., Чепелев Ю. Г. Применение полимерных изоляторов в устройствах контактной сети электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1987. — 48 с.
3. Горошков Ю. И., Бондарев Н. А. Контактная сеть. — М.: Транспорт, 1981. — 400 с.
4. Потапов В. Д., Лукьянов А. М., Горошков Ю. И. Исследование прочности полимерных стержней изолирующих элементов // Вестник ВНИИЖТ. — 1977. — № 7. — С. 24–26.
5. Гершман И. С., Гершман Е. И. Фундаментальные основы разработки материалов и конструкций системы токосъема высокоскоростного железнодорожного транспорта по результатам исследования взаимодействия токосъемных элементов с контактным проводом // Интеллектуальные системы на транспорте: Материалы 3-й международной научно-практической конференции. — СПб., 2013. — С. 300–306.
6. Chen Shaokuan, Wang Xiu-dan, Bai Yun, Liu Haidong, Mao Bao-huo. Tiedao xuebao J. China Railway Soc. 2013. 35, № 12, pp. 37–42.
7. Oberleitung Sicut SX — Zulassung und Betriebserfahrung in Ungarn. Kökényesi Miklós, Kunz Dietmar. Elek. Bahnen. 2013. 111, № 6–7, pp. 440–444.
8. Phase separation sections — passing with minimum constraints Arnaud Bastian, Christian Courtois, Alexandre Machet, La Plaine Saint Denis Elek. Bahnen. 2011, 4–5, pp. 197–203. ●

Координаты авторов: **Лукьянов А. М.** — (495) 684–2470, **Чепелев Ю. Г.** — yuriychepelev@yandex, **Бардин А. Н.** — bardin.aleksandr@vniizht.ru.

Статья поступила в редакцию 10.03.2015, принята к публикации 16.04.2016.